

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ABOUBEKR BELKAID-TLEMCEM

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil



Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en

Génie Civil Option : Structure.

Présenté par :

M. RABHI MOHAMED AMINE

Thème :

Influence du sable de dune sur le comportement des mortiers soumis aux attaques de l'acide sulfurique H_2SO_4

Soutenu le 27 Septembre 2023. Devant le jury composé de :

Mr BEZZAR Abdelillah	Professeur	Président
M^{me} SAIL Latifa	Professeure	Examinatrice
Mr. TALEB Omar	Maître de conférences A	Encadrant
Mme .YOUSSARI Fatima Zohra	Doctorante	Co-encadrante

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

*Le présent travail a été mené au sein du laboratoire de Génie Civil à l'Université
ABOUBEKR BELKAID TLEMCEN-CHEYOUANE.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à **M. TALEB Omar**, Maître de conférences au département de Génie Civil qui a été l'élément déclencheur de ma passion pour ce sujet en me guidant et en supervisant mon travail au laboratoire.*

Ses précieux conseils et orientations m'ont été d'une aide incomparable.

*Je tiens également à remercier vivement **Mme .YOUSSARI Fatima Zohra** pour ses conseils judicieux, son aide précieuse et ses orientations indispensables tout au long de ce travail.*

*Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance à **M. BEZZAR**, professeur au département de Génie Civil de me faire l'honneur de présider le jury.*

*Je tiens aussi à remercier **Mme SAIL Latéfa**, professeure au département de Génie Civil pour avoir accepté d'expertiser ce modeste travail.*

*Je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail notamment le personnel du laboratoire de recherche de Génie Civil de faculté de Technologie à l'Université de TLEMCEN et spécialement **Docteur Hennaoui Mustapha**, **Mme Bouklikha Fadia** et **Monsieur Hakim** pour leur précieuse aide et leur disponibilité tout au long du déroulement de ce projet.*

Dédicaces

“

Je dédie ce mémoire,

*À mon **cher** père,*

*À ma **chère** mère (ALLAH YARHAMHA),*

Que nulle dédicace ne puisse exprimer ce que nous leurs devons, pour tout leur sacrifice, leur bienveillance, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

*À mon cher frère **Ahmed**, pour son encouragement permanent,*

À mes chers oncles, puisse Dieu vous donner santé, bonheur et surtout réussite,

*À mon cher ami **Oussama**, pour son aide et son soutien dans les moments difficiles,*

À mes amis de toutes les promos, à tous mes amis proches ou loins. Et sans oublier mes enseignants qui m'ont soutenu durant toutes mes années d'études. À tous ceux qui me sont chers, à vous tous,

Merci.

”

Med Amine

Résumé

Ce mémoire de recherche explore l'impact du sable de dune sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité des mortiers utilisés dans l'industrie de la construction. L'étude se penche sur les interactions complexes entre les matériaux de construction, les environnements d'exposition, les propriétés mécaniques des mortiers, la durabilité, et le mécanisme des attaques des sulfates H_2SO_4 sur les mortiers.

Dans un premier temps, le sable de dune a été caractérisé afin de comprendre comment il pourra influencer les performances des mortiers, et cela grâce à une comparaison avec un sable concassé. Cette analyse a révélé des différences significatives dans la granulométrie, les masses volumiques absolue et apparente, le module de finesse, la consistance, l'absorption d'eau, la teneur en eau, ainsi que d'autres paramètres essentiels des matériaux.

Une autre partie de la recherche a été consacrée à l'examen de la réaction des mortiers face à des environnements agressifs, notamment vis-à-vis de l'exposition à l'acide sulfurique H_2SO_4 . Les résultats ont montré que la composition des mélanges de mortier, notamment la proportion de sable de dune ou de sable concassé, avait un impact significatif sur leur durabilité. Les mélanges à base de sable concassé ont été caractérisés par une résistance mécanique supérieure alors que les mélanges contenant une proportion plus élevée de sable de dune ont une résistance mécanique réduite surtout en particulier en présence d'acide sulfurique.

Enfin, cette recherche offre des résultats sur les interactions qui peuvent exister entre les matériaux utilisés, les conditions environnementales appliquées et les propriétés des mortiers. Elle souligne l'importance cruciale d'adapter les mélanges de mortiers en fonction des exigences spécifiques du projet et de l'environnement prévu afin de garantir la durabilité et la résistance à long terme. Les résultats ont des implications pratiques pour les professionnels de l'industrie de la construction en contribuant à l'amélioration continue des normes et des pratiques pour répondre aux défis futurs en matière de durabilité.

Mots clés : Sable de dune, Sable concassé, Mortier, Durabilité, Attaque sulfatique, Résistance mécanique, Environnement agressif, Composition du mortier.

Abstract

This research study explores the impact of dune sand on the mechanical characteristics and durability of mortars used in the construction industry. The study looks at the complex interactions between building materials, exposure environments, mortar mechanical properties, durability, and the mechanism of sulphate attack H_2SO_4 on mortars.

As a first step, dune sand was characterized in order to understand how it might influence mortar performance, by means of a comparison with crushed sand. This analysis revealed significant differences in grain size, absolute and apparent densities, fineness modulus, consistency, water absorption, water content and other key material parameters.

Another part of the research was devoted to examining the reaction of mortars to aggressive environments, in particular to exposure to sulphuric acid H_2SO_4 . The results showed that the composition of mortar mixes, in particular the proportion of dune sand or crushed sand, had a significant impact on their durability. Mixes based on crushed sand were characterized by superior mechanical strength, whereas mixes containing a higher proportion of dune sand had reduced mechanical strength, particularly in the presence of sulphuric acid.

Finally, this research provides results on the interactions that can exist between the materials used, the environmental conditions applied and the properties of the mortars. It highlights the crucial importance of adapting mortar mixes to the specific requirements of the project and the anticipated environment in order to ensure long-term durability and resistance. The results have practical implications for professionals in the construction industry, contributing to the continuous improvement of standards and practices to meet future sustainability challenges.

Keywords : Dune sand, Crushed sand, Mortar, Durability, Sulfatic attack, Mechanical strength, Aggressive environment,

ملخص

يكشف هذا البحث تأثير اختيار الرمال، مع التركيز على رمال الكثبان الرملية، على خصائص ومتانة الملاط المستخدم في مجال البناء. تتطرق هذه الدراسة إلى التفاعلات المعقدة بين مواد البناء وبيئات التعرض والخصائص الميكانيكية للملاط وكذا المتانة وآلية تأثير الكبريتات، مع التركيز على حمض الكبريتيك (H_2SO_4) على الملاط.

بدأنا بفحص تفصيلي لأنواع مختلفة من رمال الكثبان الرملية، بالإضافة إلى تكوينها المعدني، من أجل فهم كيفية تأثير هذه الخصائص على أداء الملاط، مقارنة بالرمال المسحوقة الشائعة الاستخدام. كشف هذا التحليل عن اختلافات كبيرة في حجم الجسيمات، والكثافة المطلقة والظاهرة، ومعامل الدقة، والاتساق، وامتصاص الماء، ومحتوى الماء، والمعايير الأساسية الأخرى للمواد.

تم تخصيص جزء رئيسي من البحث لفحص تفاعل الملاط مع البيئات العدوانية، بما في ذلك التعرض لحمض الكبريتيك (H_2SO_4). وأظهرت النتائج أن تكوين خليط الملاط، بما في ذلك نسبة رمال الكثبان الرملية أو الرمال المسحوقة، كان له تأثير كبير على متانتها. وأظهر الخليط المكون من الرمال المطحونة قوة ميكانيكية فائقة في الظروف العادية، بينما أظهر الخليط الذي يحتوي على نسبة أعلى من رمال الكثبان الرملية انخفاضا في القوة الميكانيكية، لا سيما في وجود حمض الكبريتيك.

في النهاية، يوفر هذا البحث نظرة متعمقة على التفاعلات المعقدة بين مواد البناء والظروف البيئية وخصائص الملاط. ويؤكد على الأهمية الحاسمة لتكييف خليط الملاط مع المتطلبات المحددة للمشروع والبيئة المقصودة لضمان متانتها ومقاومتها على المدى الطويل. للنتائج آثار عملية على المتخصصين في صناعة البناء من خلال المساهمة في التحسين المستمر للمعايير والممارسات لمواجهة تحديات الاستدامة في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: رمال الكثبان الرملية، الرمال المسحوقة، الملاط، المتانة، الهجوم السلفاتي، القوة الميكانيكية، البيئة العدوانية، تكوين الملاط.

Table des Matières

Remerciements	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص	V
Table des Matières.....	VI
Liste des Figures	XI
Liste des Tableaux	XIV
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Durabilité Aux Attaques Acides.....	4
1. Introduction	5
2. La durabilité.....	6
3. Les attaques sulfuriques	6
3.1. Définition de l'attaque sulfurique	6
3.2. Sources des sulfates	7
4. Mécanismes d'attaques.....	9
4.1. Processus d'attaque par les sulfates internes	10
4.2. Processus d'attaque par les sulfates externes	11
4.3. Exemples de l'attaque par les sulfates	12
4.3.1. Le cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4).....	12
4.3.1.1. Formation de gypse secondaire.....	12
4.3.1.2. Formation d'ettringite secondaire	13
4.3.2. Le cas de sulfate de magnésium Mg SO_4 (double action)	13
4.3.2.1. Substitution des ions Ca_2^+ par les ions Mg^{2+} dans les C – S – H	13
5. Attaque par les acides	13
5.1. Définition	13
5.2. La source des acides.....	14
5.3. Les différents types des acides.....	15
5.3.1. Les pluies acides (cas extrême des eaux douces).....	15
5.3.2. Les acides minéraux.....	15
5.3.3. Les acides organiques	16

Table des Matières

6. Mécanisme d'attaque des acides.....	16
7. Actions des acides.....	18
8. Réactions chimiques.....	18
8.1. Influence de sable de dune sur la résistance du mortier aux attaques acides	19
9. Les différents travaux réalisés.....	20
9.1. Etude de la durabilité des mortiers à base de sable de dune dans des milieux acides	20
9.2. Propriété physico-mécanique et durabilité du mortier à base de sable de dune	21
9.3. Propriétés du mortier autoplaçant fabriqué avec différents types de sable	23
9.4. Effet du remplacement des granulats fins par du sable des dunes du désert sur les propriétés fraîches et la résistance des mortiers autoplaçants.....	24
9.5. Effet de la charge de nitrate de sodium sur le transport des électrolytes par le tubule rénal.....	26
9.6. Influence des fibres d'acier sur la performance en flexion du béton incorporant des granulats de béton recyclé à sable dunaire.....	28
9.7. Caractérisation expérimentale d'un nouveau béton sable durable en un environnement agressif.....	28
10. Conclusion	32
Chapitre 2 : Sable De Dune.....	33
1. Introduction	34
2. Définition du sable de dune.....	35
2.1. Mécanismes de formation	36
3. Utilisation du sable de dune dans la construction	36
3.1. Diverses utilisations	36
3.2. Utilisation du sable de dunes dans le béton.....	38
3.3. Les aspects économiques	38
3.4. Intérêt de l'utilisation du sable de dune	38
4. Type des dunes.....	39
4.1. Les avant-dunes	39
4.2. Les falaises dunaires	39
4.3. Les dunes perchées	40
4.4. Les cordons dunaires artificiels	40
5. Différentes formes des dunes	41

Table des Matières

5.1.	Dune de barkhane	41
5.2.	La dune parabolique	41
5.3.	Les dunes en étoile.....	41
5.4.	Dunes du Pilat. Dunes longitudinal.....	41
6.	Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction	42
7.	Les différents milieux de la dune.....	42
7.1.	Les dunes mobiles.....	42
7.2.	Les dunes noires (arbres).....	42
7.3.	La dune verte (appelée aussi avant dune ou dune embryonnaire).....	43
7.4.	La dune blanche ou jaune	44
7.5.	La dune grise	45
7.6.	La dune brune (dune boisée ou frange forestière)	45
7.6.1	Les types des sables selon leurs provenances.....	46
8.	Classification des sables	46
8.1.	Granulométrie	46
8.2.	Analyses minéralogique	47
9.	Les mortiers	47
9.1.	Composition d'un mortier	48
9.2.	Propriétés des mortiers.....	49
9.2.1.	La fluidité	49
9.2.2.	La maniabilité.....	49
9.2.3.	Le pouvoir de rétention d'eau	49
9.3.	Utilisation des mortiers	50
9.4.	Rôle du mortier dans la construction	50
9.5.	Caractéristiques principales des mortiers.....	50
9.5.1.	La Prise	50
9.5.2.	Les Types de mortiers.....	50
9.5.2.1.	Les mortiers de ciment	50
9.5.2.2.	Les mortiers de chaux	51
9.5.2.3.	Les mortiers bâtards	51
9.5.2.4.	Les mortiers de ciment réfractaire.....	51
9.5.2.5.	Le mortier de plâtre	51
9.5.2.6.	Le mortier de réparation	52

Table des Matières

9.5.2.7. Le mortier d'isolation thermique	52
9.5.2.8. Le mortier de pierre	52
10. Conclusion	53
Chapitre 3 : Matériels et Méthodes.....	54
1. Introduction	55
2. Le sable.....	55
3. Le ciment.....	55
4. L'eau de gâchage	56
5. Propriétés physiques du Ciment.....	56
5.1. Masse volumique apparente du ciment	56
5.2. Masse volumique absolue (Voluménoètre)	57
5.3. Mesure de la finesse du ciment	58
5.4. Consistance du ciment.....	59
5.5. Essai de prise du ciment	61
6. Les Propriétés physique des sables	62
6.1. Analyse granulométrique	62
6.2. Module de finesse d'un sable.....	64
6.3. Masse Volumique Apparente.....	65
6.4. Masse volumique absolue	65
6.5. Equivalent de sable	66
6.6. Foisonnement du sable.....	67
6.7. Absorption de sable.....	69
7. Formulations des mortiers.....	70
7.1. Évaluation de la durabilité des mortiers à base d'additions minérales	70
3.7.1 Composition des échantillons de mortiers.....	70
7.2. Taux de l'eau de gâchage (E/C).....	71
8. Composition des mortiers.....	71
8.1. Le malaxage	71
8.2. Préparations des éprouvettes et déroulement des essais	72
8.3. Confection des éprouvettes.....	72
8.3.1. Préparation des solutions.....	72
3.8 Procédure expérimentale	73
9. Conclusion.....	74

Table des Matières

Chapitre 4 : Interprétation des résultats	75
1. Introduction	76
2. Résultats et discussions	76
2.1. Affaissement	76
2.2. Perte de masse en solution acide	78
2.3. Interprétation des résultats	79
2.4. Résistance mécanique	81
2.5. Résistance Mécaniques des éprouvettes immergées dans H ₂ SO ₄	81
2.5.1. Résistance à la compression	81
2.5.2. Résistance à la flexion	81
2.5.3. Interprétation des résultats	82
2.6. Résistances Mécaniques des éprouvettes immergées dans l'eau	85
2.6.1. Résistance à la compression (H ₂ O)	85
2.6.2. Résistance à la flexion (H ₂ O).....	85
2.6.3. Interprétation des résultats.....	86
3. Conclusion	88
Conclusion générale.....	90
Références bibliographiques	93

Liste des Figures

Figure 1.1 : Cas pathologiques d'éléments en béton en contact avec des sulfates. [1]	7
Figure 1.2 : L'origine des sulfates interne ou externe. [4]	8
Figure 1.3 : L'attaque par les sulfates. [4].....	9
Figure 1.4 : La formation de l'ettringite secondaire. [4] [6]	10
Figure 1.5 : Epreuve de mortier après cinq ans de dégradation[2]	11
Figure 1.6 : Attaques des sulfates externes. [9]	12
Figure 1.7 : La détérioration des silos-tours en béton par l'attaque des acides [14]. [13]	14
Figure 1.8 : Epreuve de mortier conservé dans H ₂ SO ₄ . [28].....	20
Figure 1.9 : Perte de masse du mortier. [28].....	21
Figure 1.10 : Résistance mécaniques en compression pour les éprouvettes conservées dans H ₂ SO ₄ et HCL. [28]	21
Figure 1.11 : Résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition aux sulfates. [32]	22
Figure 1.12 : Résistance à la flexion en fonction de la durée d'exposition aux sulfates. [32]	22
Figure 1.13 : Résistance à la compression du mortier fabriqué avec diverses teneurs fines en calcaire. [30].....	24
Figure 1.14 : Effet de la teneur en DS sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers fabriqués avec du mélange de sable CS/DS et b) Effet de la teneur en DS sur la résistance à la compression des mortiers fabriqués avec du mélange de sable RS/DS. [31]	25
Figure 1.15 : Évolution de la résistance à la compression à la rupture des mélanges conçus. [32]	27
Figure 1.16 : Évolution de la résistance à la traction à la rupture des mélanges conçus. [32].	27
Figure 1.17 : (a) Échantillons conservés dans Eau (b) Échantillons conservés dans le milieu agressif. [34].....	29
Figure 1.18 : Résistance à la compression des bétons conservés dans l'eau [34].....	30
Figure 1.19 : Effet de milieu agressif sur la résistance à la compression. [34].....	30
Figure 1.20 : Résistance à la flexion des bétons conservés dans l'eau. [34]	31
Figure 1.21 : L'effet de milieux agressifs sur la résistance à la flexion. [34]	31
Figure 2.1 : Image satellite du Sahara Algérie. [35]	35
Figure 2.2 : Sable de dune La barkhane. [37].....	35
Figure 2.3 : Morphologie de la barkhane. [37].....	36

Liste des Figures

Figure 2.4 : Types de dunes. A : barkhanes ; B : dunes paraboliques ; C : dunes longitudinales.....	41
Figure 2.5 : sable de dune noire [44].....	43
Figure 2.6 : sable de dune verte [44]	44
Figure 2.7 : sable de dune blanche. [43]	44
Figure 2.8 : sable de dune grise. [44].....	45
Figure 2.9 : sable de dune brune. [43]	46
Figure 2.10 : Exemple d'un mortier. [51].....	48
Figure 2.11 : Composition d'un mortier. [48]	48
Figure 3.1 : Ciment utilisé dans la confection du mortier normalisé. [55].....	56
Figure 3.2 : Essais de mesure de la masse volumique apparente.....	57
Figure 3.3 : Essais de mesure de la masse volumique absolue (Pycnomètre).	58
Figure 3.4 : Perméabilimètre Blaine.	59
Figure 3.5 : Appareil de Vicat manuel.....	60
Figure 3.6 : Courbe de la consistance du ciment	60
Figure 3.7 : Début et fin de prise du ciment.....	61
Figure 3.8 : Essai d'analyse granulométrique.....	62
Figure 3.9 : Analyse granulométrique des sables	64
Figure 3.10 : Essai de détermination de la masse volumique apparente des sables.	65
Figure 3.11 : Essai de détermination de la masse volumique absolue des sables.....	66
Figure 3.12 : Essai de détermination d'équivalent des sables.....	67
Figure 3.13 : Essai de foisonnement du sable et teneur en eau	67
Figure 3.14 : Courbe de foisonnement du sable et teneur en eau. Sable de dune.....	68
Figure 3.15 : Courbe de foisonnement du sable et teneur en eau. Sable concassé.....	69
Figure 3.16 : Essai d'absorption d'eau des sables.	69
Figure 3.17 : Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier.	72
Figure 3.18 : Organigramme résumant le travail expérimental.....	74
Figure 4.1 : Affaissement en fonctions des différentes formulations de mortiers.....	77
Figure 4.2 : Eprouvette du mortier conservée en H ₂ SO ₄	79
Figure 4.3 : Variation de la masse des échantillons de mortier immergés dans une solution de H ₂ SO ₄ , mesurée quotidiennement.	79
Figure 4.4 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers immergés dans H ₂ SO ₄	82

Liste des Figures

Figure 4.5 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers immergés dans H ₂ SO ₄	83
Figure 4.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers immergés dans l'eau.....	86
Figure 4.7 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers immergés dans l'eau	87

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Composants du béton menacés par la corrosion. [22].....	17
Tableau 1.2 : Composition en grammes des différents constituants des mortiers. [32].....	22
Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment (en %).....	56
Tableau 3.2 : L'essai de consistance	60
Tableau 3.3 : Début et fin de prise.	61
Tableau 3.4 : Résumé des résultats des essais sur le ciment	61
Tableau 3.5 : Analyse granulométrique du sable concassé	62
Tableau 3.6 : Analyse granulométrique du sable de dune.	63
Tableau 3.7 : Module de finesse des deux sables.....	64
Tableau 3.8 : La masse volumique apparente des Sables.....	65
Tableau 3.9 : La masse volumiques absolue des sables.....	66
Tableau 3.10 : Equivalent des sables	67
Tableau 3.11 : Essai de foisonnement du sable et teneur en eau.....	68
Tableau 3.12 : Coefficients d'absorption des sables.	70
Tableau 3.13 : Résumé des résultats des essais sur les deux sables.....	70
Tableau 3.14 : Les différentes compositions des mortiers.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4.1 : Affaissement des déférentes formulations.	76
Tableau 4.2 : Variation de la masse des échantillons immergés dans H ₂ SO ₄ , mesurée quotidiennement.....	778
Tableau 4.3 : Résistances à la compression des éprouvettes immergées dans H ₂ SO ₄	81
Tableau 4.4 : Résistances à la flexion des éprouvettes immergées dans H ₂ SO ₄	81
Tableau 4.5 : Résistances à la compression des éprouvettes immergées dans l'eau.	85
Tableau 4.6 : Résistances à la flexion des éprouvettes immergées dans l'eau.	85

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie de la construction repose sur l'utilisation de matériaux de qualité et de techniques durables pour garantir la longévité des structures. Parmi ces matériaux, le mortier, en tant que composant essentiel, joue un rôle crucial dans la résistance et la stabilité des ouvrages. La recherche d'améliorations continues dans la composition du mortier est donc une préoccupation constante pour les professionnels du génie civil. Cette mémoire se consacre à l'examen de **L'influence du sable sur le mortier**, en mettant en lumière les divers aspects qui contribuent à sa durabilité et à ses performances.

L'influence du sable de dune sur la résistance des mortiers cimentaires aux attaques acides représente le paramètre clé de ce sujet de recherche. Les caractéristiques du sable de dune, telles que sa granulométrie, sa porosité et sa composition minéralogique, jouent un rôle déterminant dans la réaction des mortiers en présence d'acides corrosifs.

Cette étude vise à apporter une contribution significative au domaine de la construction en éclairant les choix de matériaux et les pratiques de construction pour améliorer la durabilité et la performance des ouvrages. Les résultats obtenus auront des implications pratiques pour les professionnels du génie civil et de la construction, contribuant ainsi à l'évolution continue des normes et des technologies de construction.

Ce mémoire de fin d'études est organisé sur quatre chapitres, chacun explorant un domaine spécifique de la relation complexe entre le sable, le mortier et ses caractéristiques.

Le premier chapitre examine la durabilité du mortier lorsqu'il est soumis à des attaques acides, en se concentrant particulièrement sur l'acide sulfurique H_2SO_4 . Les attaques acides constituent l'un des principaux défis pour les matériaux de construction, il est donc essentiel de comprendre comment le mortier réagit dans de telles conditions afin de garantir la stabilité à long terme des ouvrages.

Le deuxième chapitre se penche sur le choix entre deux types de sable couramment utilisés dans la composition du mortier: le sable de dune et le sable concassé. Ces deux matériaux présentent des caractéristiques distinctes en termes de granulométrie, de composition minérale et d'origine. Cette comparaison permettra d'évaluer leur influence respective sur les propriétés mécaniques et la durabilité du mortier.

Le troisième chapitre est dédié à la caractérisation approfondie des matériaux de

Introduction générale

construction, notamment des essais au laboratoire portant sur les propriétés physiques et mécaniques du sable concassé, du sable de dune, du ciment et du mortier. Ces données serviront de fondement solide à notre analyse comparative.

Enfin, dans le dernier chapitre a trait à l'étude de l'effet de différentes proportions de sable de dune et de sable concassé sur le comportement du mortier. Ainsi, des éprouvettes de mortier ont été conservées dans l'eau et exposées à l'acide sulfurique H_2SO_4 sur des périodes de 7, 14, 21 et 28 jours. Pendant ces essais, des mesures de perte de masse et d'affaissement des différents types de mortiers ainsi que des tests de compression et de flexion ont été réalisées.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale avec perspectives d'étude.

Chapitre 1 : Durabilité Aux Attaques Acides

1. Introduction

Lorsqu'il s'agit d'évaluer la durabilité d'un matériau face aux attaques acides, il est essentiel de considérer des matériaux couramment utilisés, tel que le mortier. Ce dernier est une combinaison de ciment, sable et d'eau, utilisée pour lier les briques ou les pierres dans les constructions.

L'acide sulfurique H_2SO_4 est un acide puissant couramment utilisé dans diverses industries et peut également être présent dans certains environnements, tels que les usines chimiques ou les laboratoires. Lorsque le mortier est exposé à l'acide sulfurique, il peut subir des dommages et une dégradation progressive.

L'attaque acide sur le mortier peut se produire de différentes manières. Tout d'abord, l'acide sulfurique peut réagir chimiquement avec les composants du mortier, notamment le ciment. Cette réaction chimique peut entraîner la dissolution des composants du mortier, affaiblissant ainsi sa structure et sa résistance mécanique.

De plus, l'acide sulfurique peut pénétrer à travers les pores et les fissures du mortier, ce qui peut entraîner une corrosion des armatures métalliques intégrées dans le matériau, telles que les barres d'acier. La corrosion des armatures métalliques peut provoquer une expansion et une fissuration supplémentaires du mortier, entraînant une détérioration accrue.

Pour améliorer la durabilité du mortier face aux attaques acides, plusieurs mesures peuvent être prises. L'utilisation de ciments résistants à l'acide ou de ciments spéciaux conçus pour résister à la corrosion chimique peut être bénéfique. De plus, l'ajout d'adjuvants ou d'additifs spéciaux dans le mortier peut améliorer sa résistance à l'attaque acide.

Il est également important de prendre en compte les conditions d'exposition, telles que la concentration de l'acide sulfurique, la température et la durée d'exposition. Des concentrations élevées d'acide sulfurique et des conditions d'exposition prolongées peuvent augmenter les risques de dommages sur le mortier.

En conclusion, la durabilité du mortier face aux attaques acides, y compris l'acide sulfurique, est un facteur clé à considérer lors de la conception et de l'utilisation de ce matériau dans des environnements susceptibles d'être exposés à de tels agents corrosifs.

La sélection de ciments résistants à l'acide, l'utilisation d'additifs spéciaux et la gestion appropriée des conditions d'exposition peuvent contribuer à améliorer la durabilité et à minimiser les dommages causés par l'acide sulfurique sur le mortier.

2. La durabilité

La durabilité des matériaux de ciment se définit comme leur capacité à maintenir leur résistance et à continuer à fournir un service efficace tout au long de leur durée de vie. Pour atteindre cette durabilité, ils doivent résister aux divers mécanismes de dégradation auxquels ils peuvent être exposés, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaque chimique.

Les raisons de la possible détérioration de la durabilité sont multiples et peuvent résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du mortier. Ces facteurs peuvent inclure des processus physiques, mécaniques ou chimiques. Les réactions chimiques internes, notamment celles impliquant des alcalis, de la silice et des carbonates alcalins, ainsi que les attaques chimiques externes provoquées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et le dioxyde de carbone, peuvent contribuer à la détérioration.

Il est important de noter que la détérioration de la durabilité résulte rarement d'une seule cause, mais plutôt d'une combinaison de facteurs. Cependant, dans de nombreux cas, les matériaux de ciment peuvent résister de manière satisfaisante à ces défis et maintenir leur intégrité au fil du temps. [1]

3. Les attaques sulfuriques

3.1. Définition de l'attaque sulfurique

La résistance du béton à l'attaque des sulfates est un facteur crucial pour sa durabilité, et ce problème est aussi vieux que le béton lui-même. Des études ont été menées sur ce sujet depuis près de 100 ans.

L'attaque sulfatique provoque une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires», qui se forment après l'hydratation du ciment, entraînant une expansion importante et des détériorations chimico-mécaniques telles que des modifications des propriétés de transport et de la porosité, des fissures, ainsi que des pertes de résistance et de cohésion. Cette détérioration graduelle conduit finalement à la ruine du matériau

cimentaire, avec une durée dépendante de l'attaque sulfatique (nature, teneur et concentration des sulfates en contact) ainsi que du type de ciment utilisé. [2]



Figure 1.1 : Cas pathologiques d'éléments en béton en contact avec des sulfates. [1]

3.2. Sources des sulfates

Il existe deux types d'attaques sulfuriques : les attaques externes causées par les Sulfates présents dans l'environnement du béton, et les attaques internes où les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. Lorsque l'attaque sulfurique provient de l'extérieur, des couches de gypse, d'ettringite secondaire et de thaumasite se forment à partir de la surface exposée aux sulfates. Cette attaque est souvent combinée à l'attaque par le cation correspondant, en fonction de la provenance des sulfates. Ces derniers peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ainsi qu'avec les C-S-H ou la portlandite, ce qui contribue à la dégradation du béton. De plus, l'attaque sulfurique externe peut également être combinée à une attaque acide, accélérant ainsi la destruction de la pâte hydratée. [3]

Lors d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent principalement des sulfates de calcium présents dans le béton dès sa fabrication. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif résultant de la réaction est l'ettringite. Cependant, ce n'est pas seulement l'ettringite secondaire qui endommage le béton lors d'une attaque par les sulfates externes, mais également la formation de gypse, qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le

dé laminage des couches superficielles. [2]

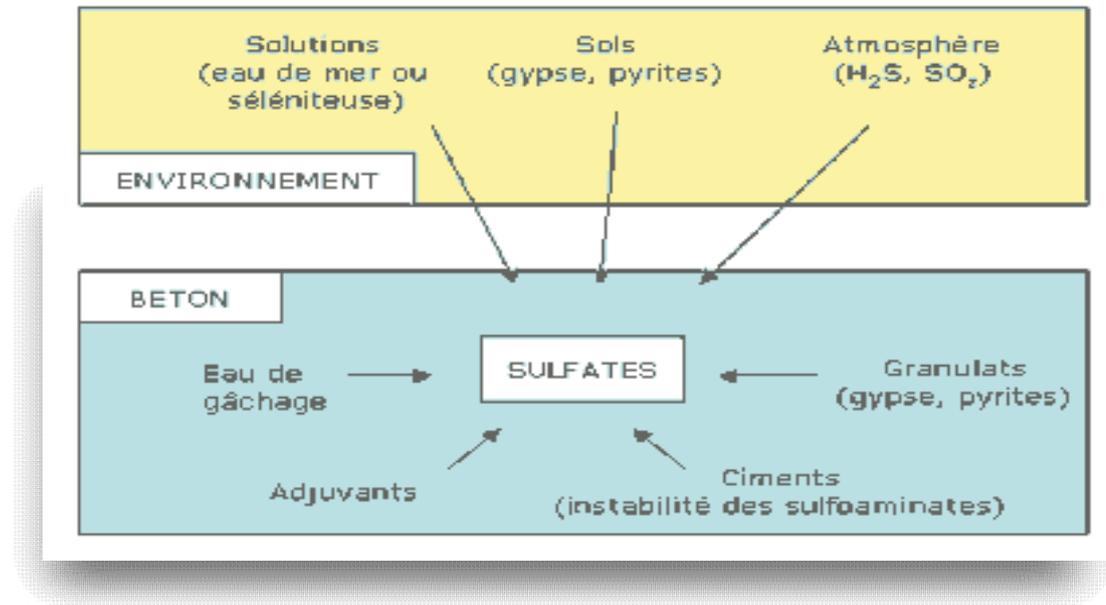


Figure 1.2 : L'origine des sulfates interne ou externe. [4]

Les sulfates présents dans le ciment peuvent provenir du régulateur de prise ajouté (gypse, héli-hydrate, anhydrite) ainsi que des sulfates alcalins contenus dans le clinker lui-même (tels que l'arcanite K_2SO_4 , l'aphtitalite $K_3Na(SO_4)_2$ et la langbeinite $Ca_2K_2(SO_4)_3$, et également des solutions solides présentes dans les silicates de calcium, le tout en proportions variables.

Les sulfates peuvent aussi être introduits dans le ciment par l'utilisation de granulats qui sont pollués par des sulfates d'origine naturelle ou artificielle tels que le gypse, le plâtre, l'anhydrite ou même les pyrites. [4]

Les sulfates peuvent provenir du milieu extérieur où ils se présentent sous différentes formes : solide (dans les sols gypseux), liquide (dans les eaux naturelles qui s'infiltrent à travers les sols, ainsi que dans des solutions plus ou moins concentrées d'origines diverses) ou gazeuse (par la pollution atmosphérique due à la présence de SO_2).

Dans les sols, les sulfates peuvent constituer un élément nutritif pour les plantes et leur concentration moyenne est généralement comprise entre 0,01 % et 0,05 % en masse de sol sec. Il est possible de rencontrer des concentrations beaucoup plus importantes de sulfates (> 5 %) dans les sols qui contiennent du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

ou de l'anhydrite $CaSO_4$. [2].

La décomposition biologique aérobie des matières organiques ainsi que l'utilisation d'engrais peuvent constituer une source potentielle de sulfates. Le sulfate d'ammonium $SO_4(NH_4)_2$, qui est présent dans les engrais, est particulièrement corrosif. De plus, les sols peuvent contenir des sulfures de fer (pyrites) qui, lorsqu'ils sont oxydés, produisent de l'acide sulfurique H_2SO_4 , qui peut ensuite réagir avec du carbonate de calcium ou de la chaux.

Lorsqu'elles sont en contact avec des sols ou des remblais contenant des sulfates, les eaux d'infiltration peuvent se charger en ions SO_4^{2-} . Dans les milieux industriels et urbains, l'atmosphère peut contenir de l'anhydride sulfureux SO_2 émis par les gaz de combustion provenant de sources telles que le charbon ou divers carburants. Lorsque ces gaz entrent en contact avec l'humidité de l'air, ils peuvent s'oxyder et former de l'acide sulfurique, qui est hautement corrosif.

Les ouvrages d'assainissement peuvent générer des fermentations anaérobies, qui à leur tour peuvent produire de l'acide sulfurique à partir de l'hydrogène sulfuré libéré. [5]

4. Mécanismes d'attaques

Le schéma ci-dessous illustre les différentes étapes de l'attaque sulfatique.

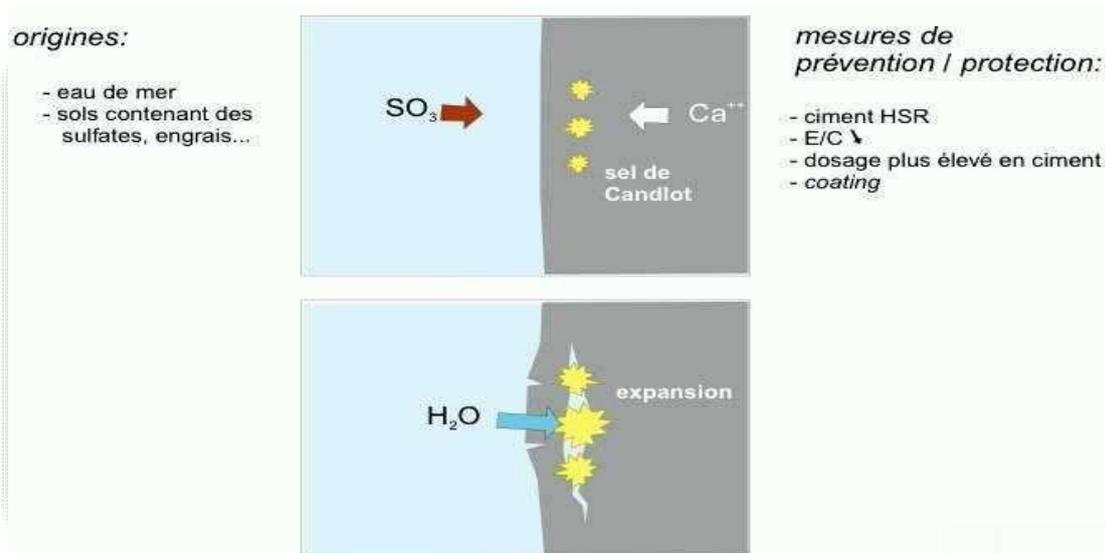


Figure 1.3 : L'attaque par les sulfates. [4]

La détérioration du mortier peut être causée par les sulfates selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion
- Perte des propriétés de liantes des C – S – H.
- Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus vulnérables à l'attaque des sulfates. [3]

4.1. Processus d'attaque par les sulfates internes

Les phénomènes d'expansion causés par la cristallisation d'ettringite, ou ettringite secondaire, sont responsables de la dégradation des bétons par les sulfates, pouvant conduire à des fissures et une diminution de leur résistance. Il convient de distinguer la formation de l'ettringite expansive de celle de l'ettringite primaire, qui est produite au début de l'hydratation des ciments Portland par réaction avec du gypse, car l'ettringite primaire n'a jamais de propriétés expansives. En somme, la formation de l'ettringite peut être schématisée de la manière suivante :

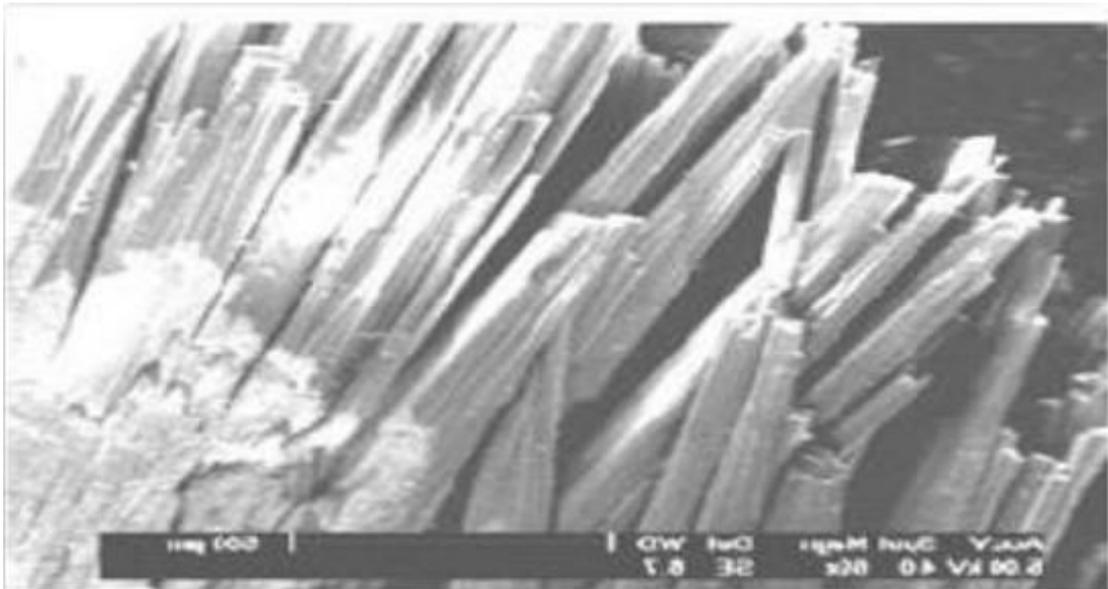


Figure 1.4 : représente la formation de l'ettringite secondaire. [4] [6]

La formation de gypse secondaire, qui diffère du gypse primaire ajouté au ciment en tant que régulateur de prise, résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium (gypse primaire CaSO_4). Lorsque le gypse primaire (CaSO_4) réagit avec les aluminates de calcium présents dans le ciment, cela peut conduire à la formation d'ettringite. Plusieurs scénarios sont possibles dans ce processus :

Soit à partir de reliquats de C_3A anhydre soit à partir de l'aluminate tetracalcique hydraté C_3AH_13 ou du monosulfoaluminate de calcium $\text{C}_3\text{ACaSO}_4\text{H}_{12}$ [7]



Les sulfates peuvent également entraîner une diminution de la résistance et une perte de masse de la surface du béton en altérant les propriétés de la matrice cimentaire. [7]

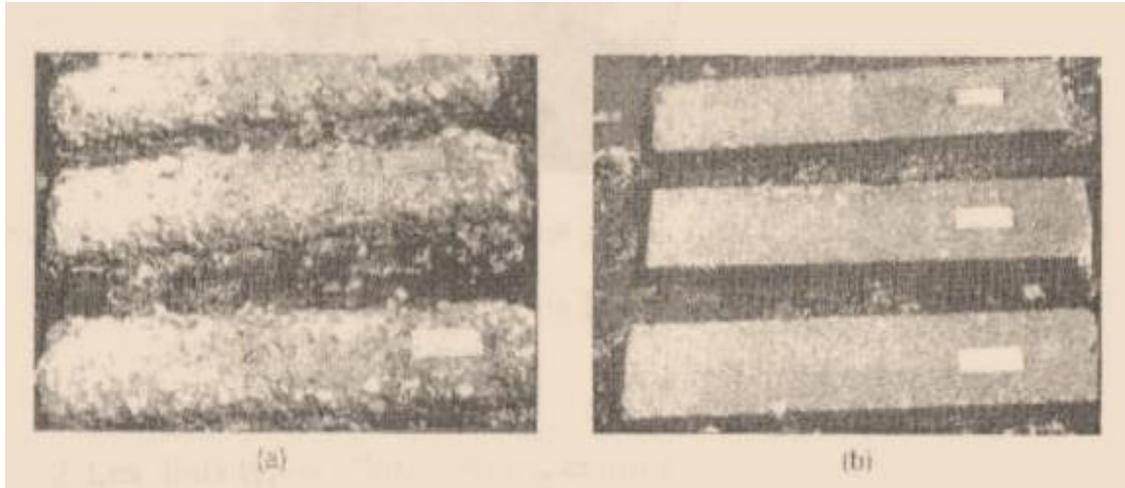


Figure 1.5 : Epreuve de mortier après cinq ans de dégradation [2].

4.2. Processus d'attaque par les sulfates externes

Le développement qui suit abordera le type de dégradation en question sous tous ses aspects, à la fois phénoménologiques et en termes de conséquences, ainsi que les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation.

Les recherches effectuées en laboratoire ont permis d'affiner la définition des différentes étapes du processus qui conduisent à la dégradation du béton :

- La surface du béton est mise en contact avec une solution agressive.
- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle
- Pénétration du cation associé et réaction de substitution :

cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , $NH_4...$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 et en $Ca(OH)_2$. Il se produit une réaction localisée entre les ions sulfates et les aluminates anhydres C_3A ou hydratés (C_4AH_x et $C_3ACASO_4H_{12}$). [8]

- La fissuration par effet de coin est causée par les pressions de cristallisation de l'ettringite.
- Les fissures favorisent l'accentuation de la pénétration des sulfates.
- L'attaque progresse le long d'un front de dégradation dont l'épaisseur tend à s'élargir avec le temps.

- Le béton est détruit plus ou moins complètement.

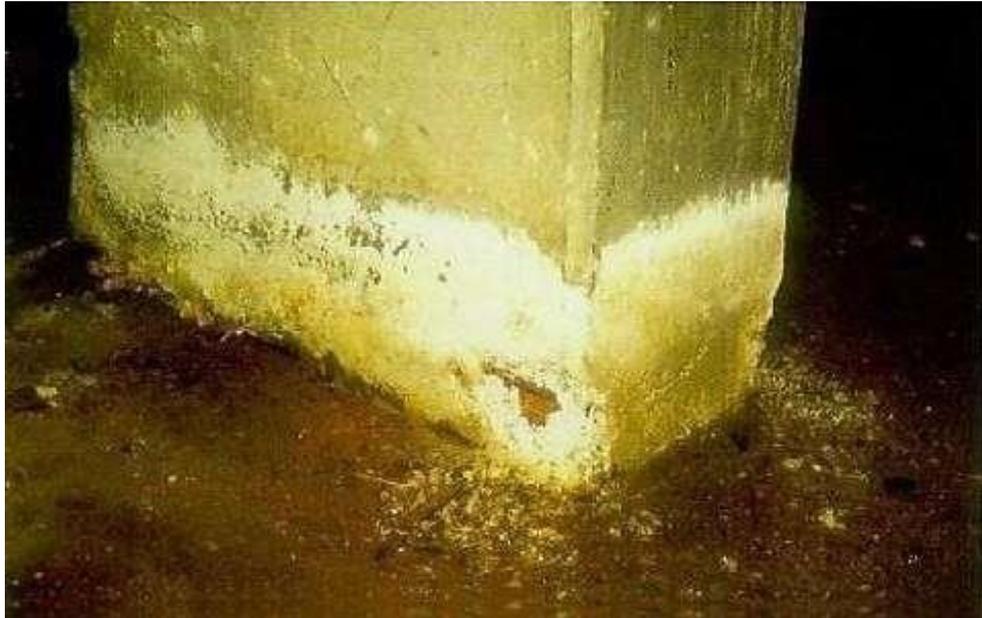
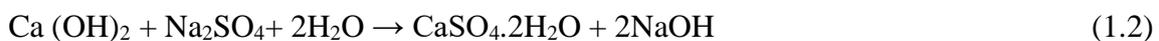


Figure 1.6 : Attaques des sulfates externes. [9]

4.3. Exemples de l'attaque par les sulfates :

4.3.1. Le cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4) :

4.3.1.1. Formation de gypse secondaire



NaOH : alcalinité élevée \rightarrow Stabilisation des $C - S - H$

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Le produit est expansif mais il ne se forme qu'à l'intérieur des espaces de la pâte de ciment hydraté, ce qui entraîne une expansion limitée voire nulle. [10]

Le sulfate de calcium dihydraté, couramment désigné sous le nom de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou gypse, est un composé chimique qui joue un rôle significatif dans l'industrie du ciment. Le passage de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ à son anhydre (CaSO_4) est un processus qui se produit au sein de la pâte de ciment hydraté, et il peut entraîner une certaine expansion. Cependant, cette expansion est généralement limitée, voire nulle dans de nombreuses applications du ciment.

L'expansion limitée ou nulle du gypse pendant le durcissement du ciment est un aspect important de son utilisation dans l'industrie de la construction. Le sulfate de calcium dihydraté, lorsqu'il se transforme en une forme anhydre, peut créer des cristaux qui peuvent augmenter le volume du matériau. Cela peut avoir des conséquences néfastes, comme la fissuration du béton ou d'autres problèmes structurels.

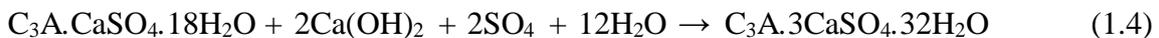
Cependant, en étant présent dans la matrice de la pâte de ciment, le gypse peut contribuer à la régulation du temps de prise du ciment, en le ralentissant. Cela permet aux travailleurs de manipuler le matériau plus facilement avant qu'il ne durcisse complètement. Ainsi, le gypse est souvent ajouté délibérément au ciment lors de sa fabrication pour contrôler les propriétés du matériau. [11]

4.3.1.2. Formation d'ettringite secondaire

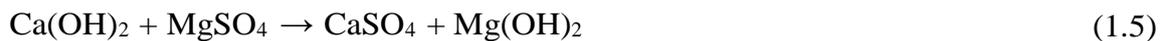
À partir du C₃A anhydre résiduel



À partir des aluminates hydratés (monosulfoaluminate)



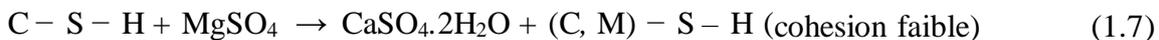
4.3.2. Le cas de sulfate de magnésium Mg SO₄ (double action) :



Mg (OH)₂: La brucite présente une faible solubilité et un faible *pH*.



4.3.2.1. Substitution des ions Ca⁺ par les ions Mg²⁺ dans les C – S – H :



Compte tenu de la très faible solubilité du Mg(OH)₂, la réaction continue jusqu'à son achèvement. Par conséquent, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium peut être plus sévère que celle des autres sulfates.

Il est possible qu'une réaction ultérieure entre le Mg(OH)₂ et le gel de silice se produise, ce qui peut également entraîner une détérioration des C – S – H.

Lorsqu'un béton est attaqué par des sulfates externes, sa dégradation se produit à travers la formation d'ettringite ou de gypse, ce qui entraîne une pression et des fissures dans le matériau. [12]

5. Attaque par les acides

5.1. Définition

Les attaques acides suivent principalement un mécanisme de dissolution, qui peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction entre la base et

l'acide, dans les cas où le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant qui ralentit les réactions de dissolution.

Le produit final de la dégradation par un acide peut être un gel de silice résultant de la décalcification totale des $C - S - H$, qui, selon [22], peut jouer un rôle protecteur à la surface du mortier et ralentir les réactions. Ces auteurs soulignent également que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration. [13]



Figure 1.7 : la détérioration des silos-tours en béton par l'attaque des acides [14]. [13]

5.2. La source des acides

Les milieux acides les plus fréquents comprennent :

Les eaux naturelles présentes dans les tourbières et les marécages, où le pH peut atteindre des niveaux aussi bas que 4.

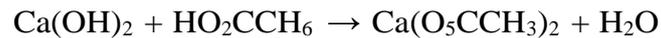
Les environnements industriels, notamment dans les industries chimiques et agroalimentaires. Les réseaux d'égouts, où l'activité bactérienne produit de l'hydrogène sulfuré suite à la transformation de produits soufrés qui, en se combinant avec l'atmosphère, se condensent sous forme d'acide sulfurique et attaquent le béton.

Les pluies acides, composées principalement d'acide sulfurique et d'acide nitrique,

avec un pH compris entre 3 et 5, qui peuvent entraîner la détérioration des surfaces exposées du béton. [15]

Durcie, entraînant la formation de sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que de gels de silice sous forme d'acides siliciques colloïdaux.

Les acides organiques affectent également le béton en convertissant le $Ca(OH)_2$ en sels qui varient en solubilité, allant de facilement solubles à difficilement solubles. [16]



5.3. Les différents types des acides

5.3.1. Les pluies acides (cas extrême des eaux douces)

Les pluies dites « propres » ont généralement un pH compris entre 5,6 et 7, et ne présentent aucun effet nocif sur le béton réalisé selon les règles de l'art. Cependant,

Les pluies dites acides dont le pH peut descendre jusqu'à 4 voire moins, sont agressives. Ces pluies sont principalement associées à la pollution par les oxydes de soufre SO_x d'origine industrielle ou domestique (provenant de la combustion de charbons, fiouls et carburants), qui représentent environ un tiers de tous les oxydes de soufre présents dans l'atmosphère. Cette pollution conduit à la formation d'acide sulfurique très hygroscopique qui se condense rapidement en gouttelettes susceptibles de contenir des métaux lourds tels que le mercure, le plomb, l'argent, le cadmium, ainsi que des sulfates d'ammonium et de sodium. Les oxydes d'azote NO_x également présents se transforment en acide nitrique. La composition et le pH des pluies peuvent varier en fonction de la saison et des conditions locales. [16]

Les pluies acides peuvent causer des dégradations superficielles qui peuvent être assez complexes, impliquant divers phénomènes tels que la dissolution due aux acides sulfurique, nitrique et carbonique, ainsi que l'expansion causée par la cristallisation de sels comme le gypse, ce qui peut entraîner la formation de salissures sur les façades et la présence d'ettringite. [16]

5.3.2. Les acides minéraux :

Les acides chlorhydrique et nitrique sont des acides minéraux forts qui, en réagissant avec la chaux du ciment, produisent respectivement du chlorure de calcium $CaCl_2$ et du nitrate de calcium $(NO_3)_2Ca$, des sels très solubles. Ces acides sont très corrosifs pour les ciments Portland et peuvent causer des dommages importants.

Lorsqu'il est formé, par exemple, lors de l'oxydation de l'hydrogène sulfuré présent dans les réseaux d'assainissement ou par condensation à partir du SO_2 atmosphérique, l'acide sulfurique H_2SO_4 , est doublement agressif en raison de son acidité ainsi que de la présence de l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tels que le gypse et l'étringite. L'acide phosphorique H_3PO_4 , bien qu'il soit modérément agressif, entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles et provoque une désintégration lente du mortier. [17]

5.3.3. Les acides organiques :

Ces composés sont couramment présents dans les effluents rejetés par les industries chimiques telles que les fabriques d'engrais, les papeteries, les teintureries, les tanneries, ainsi que dans les industries agroalimentaires comme les vinaigreries, les laiteries, les fromageries, les distilleries, les conserveries et les élevages.

En général, ils sont moins corrosifs que les acides minéraux, bien qu'ils puissent, dans certains cas, provoquer un colmatage du béton ; comme c'est le cas de l'acide tartrique utilisé dans les cuves à vin ou de l'acide oxalique. Les acides organiques, tels que l'acide acétique, l'acide lactique, l'acide butyrique et l'acide formique, présents dans certaines eaux usées, peuvent attaquer les composants calciques du ciment.

Ces acides faibles ont une faible dissociation et sont généralement modérément corrosifs, entraînant une dégradation lente. Cependant, leur neutralisation par les ions alcalins tels que Na^+ , K^+ et (Ca^{2+}) conduit à une augmentation de leur agressivité par production cumulative d'ions H^+ . Dans des environnements agricoles, des dégradations importantes du béton ont été observées dans des silos ou des cuves destinés à contenir des fourrages, des fumiers et des purins, ainsi que sur les dallages d'étables (érosion, déchaussement des granulats, perte de masse, mise à nu des aciers...). [18] [19]

En général, l'attaque chimique du béton se manifeste par la décomposition des produits d'hydratation et la formation de nouveaux composés. Si ces composés sont solubles, ils peuvent être lessivés, mais s'ils sont insolubles, ils peuvent être préjudiciables in situ. [18]

6. Mécanisme d'attaque des acides

L'attaque acide sur le béton est un phénomène bien étudié en génie civil et en matériaux de construction. La vulnérabilité du béton à l'attaque acide est principalement

Chapitre 1 : Durabilité Aux Attaques Acides

due à sa nature alcaline. Les acides réagissent avec les composants alcalins du béton, ce qui peut entraîner des dommages considérables. Voici une discussion plus approfondie sur ce mécanisme, avec des références à des travaux de recherche pertinents :

Réaction chimique avec les composants alcalins : L'attaque acide peut provoquer la réaction chimique entre les acides et les composants alcalins du ciment, tels que la portlandite (Ca(OH)_2). Cette réaction conduit à la formation de sels solubles dans l'eau, qui sont lessivés du béton, provoquant ainsi la détérioration de sa structure. Une référence importante pour cette réaction chimique est l'étude de Neville sur la chimie du ciment [8].

Dissolution des silicates : Les acides forts peuvent également attaquer les silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui sont responsables de la cohésion du béton. La dissolution de ces silicates peut entraîner une perte de résistance et de durabilité. Les travaux de Mindess et Young sur la science et la technologie du béton [10] fournissent des informations détaillées sur cette réaction.

Corrosion des armatures : Dans les cas d'attaque acide sévère, les acides peuvent pénétrer dans le béton et provoquer la corrosion des armatures en acier, ce qui est particulièrement préjudiciable pour la durabilité des structures en béton armé. L'étude d'Andrade sur la corrosion des armatures dans le béton [20] explore ce problème en détail.

Protection contre l'attaque acide : Des recherches ont également porté sur les méthodes de protection du béton contre l'attaque acide, notamment l'utilisation de revêtements, de traitements de surface et de ciments résistants aux acides. L'étude de Sanjayan et al. Sur les ciments résistants à l'attaque chimique [21] est un exemple de recherche dans ce domaine.

Tableau 1.1 : Composants du béton menacés par la corrosion. [22]

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca(OH)_2
	Silicate de calcium hydraté(C-S-H)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium hydraté	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferriquehydraté	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

Le $Ca(OH)_2$ est l'hydrate le plus vulnérable à l'attaque chimique, mais les $C-S-H$ peuvent également être affectés. De plus, les granulats calcaires sont également vulnérables à l'attaque.

Bien que les eaux usées domestiques soient alcalines et n'attaquent pas le béton, des désordres importants ont été observés dans plusieurs égouts, en particulier à des températures élevées, lorsque des composés contenant du soufre sont transformés en H_2S par des bactéries anaérobies. Le H_2S est dissous par le mince film d'humidité qui recouvre la surface du béton, puis oxydé par les bactéries anaérobies, ce qui finit par produire de l'acide sulfurique. L'attaque se produit donc au-dessus de l'eau à l'intérieur de la canalisation, provoquant une détérioration progressive du béton en dissolvant graduellement la pâte de ciment durci. Cette forme d'attaque peut également survenir sur les réservoirs de stockage pétroliers en haute mer. [18]

7. Actions des acides

La stabilité de la matrice cimentaire est influencée lorsque la solution interstitielle du béton, avec un pH basique de 13, entre en contact avec une solution acide de pH inférieur à 7, perturbant ainsi l'équilibre chimique des hydrates tels que la portlandite et les silicates de calcium hydratés ($C-S-H$). [24] La durabilité d'un matériau cimentaire dans un milieu acide dépend de plusieurs facteurs, tels que le type de ciment, sa composition et l'utilisation d'additions cimentaires, ainsi que le type de granulats utilisés, tels que le gravier, le sable, le calcaire. De plus, la durée et les conditions de cure ainsi que l'acidité, le type et le pH du milieu agressif jouent également un rôle essentiel. [24] [23]

8. Réactions chimiques

L'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) sont des acides inorganiques, tandis que l'acide acétique (CH_3COOH) est un acide organique. Les acides inorganiques ont un impact plus néfaste sur les bétons et les mortiers que les acides organiques. En présence de $Ca(OH)_2$ dans la pâte de ciment durcie, les acides inorganiques forment des composés facilement solubles dans l'eau. [25]

En ce qui concerne les acides inorganiques, voici ce que nous avons :





Les acides inorganiques forts ne se limitent pas à réagir avec l'hydroxyde de calcium, ils engagent également des réactions avec les autres constituants de la pâte de ciment.

8.1. Influence de sable de dune sur la résistance du mortier aux attaques acides :

L'influence du sable de dune sur la résistance des mortiers cimentaires aux attaques acides est un sujet de recherche essentiel dans le domaine des matériaux de construction. Les caractéristiques du sable de dune, telles que sa granulométrie, sa porosité et sa composition minéralogique, jouent un rôle déterminant dans la réaction des mortiers en présence d'acides corrosifs. Plusieurs études ont été menées pour explorer cette influence, mettant en lumière l'importance de la sélection des agrégats dans la conception de mortiers durables et résistants aux agressions environnementales.

Une recherche menée par Belaid, A. et al. (2007) [26] a examiné la performance des mortiers contenant du sable de dune exposés à des solutions acides. Leurs résultats ont montré que le sable de dune pouvait avoir un impact significatif sur la résistance des mortiers aux attaques acides. Les mortiers incorporant du sable de dune ont révélé une résistance accrue à l'acide chlorhydrique (HCl) et à l'acide sulfurique (H₂SO₄) par rapport à des mortiers sans sable de dune. Ces conclusions suggèrent que l'ajout de sable de dune peut améliorer la résistance des mortiers face à certaines agressions acides. [26]

Une autre étude menée par Ferhat, M. et al [27] a porté sur l'influence du sable de dune sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers exposés à l'attaque de l'acide sulfurique. Leurs résultats ont indiqué que les mortiers incorporant du sable de dune présentaient de meilleures résistances en compression et en flexion lorsqu'ils étaient soumis à des conditions acides. Ces découvertes suggèrent que la composition du sable de dune peut jouer un rôle clé dans l'amélioration de la résistance des mortiers aux attaques acides. [27]

Ces études mettent en lumière l'importance de la sélection des agrégats, en particulier du sable de dune, dans la formulation de mortiers résistants aux agressions acides. La compréhension de l'impact du sable de dune sur la résistance des mortiers cimentaires face à de telles attaques peut contribuer à l'élaboration de matériaux de construction plus durables, tout en minimisant l'impact environnemental de l'extraction de sable naturel.

9. Les différents travaux réalisés

9.1. Etude de la durabilité des mortiers à base de sable de dune dans des milieux acides :

Référence : Boucif et al. (2023) [28] Dans leur recherche portant sur la durabilité des mortiers à base de sable de dune en environnement acide, ont mené une série d'expérimentations. Dans le cadre de leur étude, ils ont préparé un mortier classique avec une quantité de ciment de 350 kg/m^3 et un rapport Eau/Ciment (E/C) de 0,5, en utilisant un sable composé de deux types, comprenant 39,13 % de sable de concassage et 60,87 % de sable de dune. Par la suite, ces échantillons ont été immergés dans de l'eau saturée en chaux pendant des périodes de 28,

60 et 90 jours, avant d'être soumis à des solutions d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide sulfurique (H_2SO_4) à une concentration de 5 % pour chaque milieu. Les résultats ont révélé que les spécimens conservés dans l'acide sulfurique ont subi une perte de masse notablement plus élevée que ceux conservés dans l'acide chlorhydrique. De plus, il a été noté que l'évolution de la résistance mécanique à la compression était plus significative pour les éprouvettes immergées dans l'acide chlorhydrique, tandis que celles exposées à l'acide sulfurique ont connu une réduction de cette résistance de manière significative.



Figure 1.8 : Eprouvette du mortier conservée dans H_2SO_4 . [28]

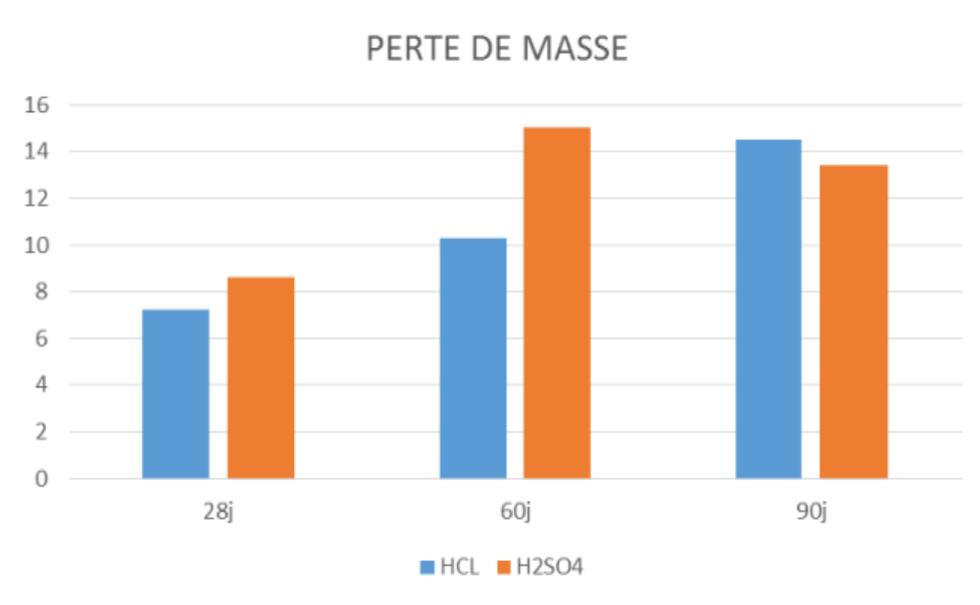


Figure 1.9 : Perte de masse du mortier.[28]

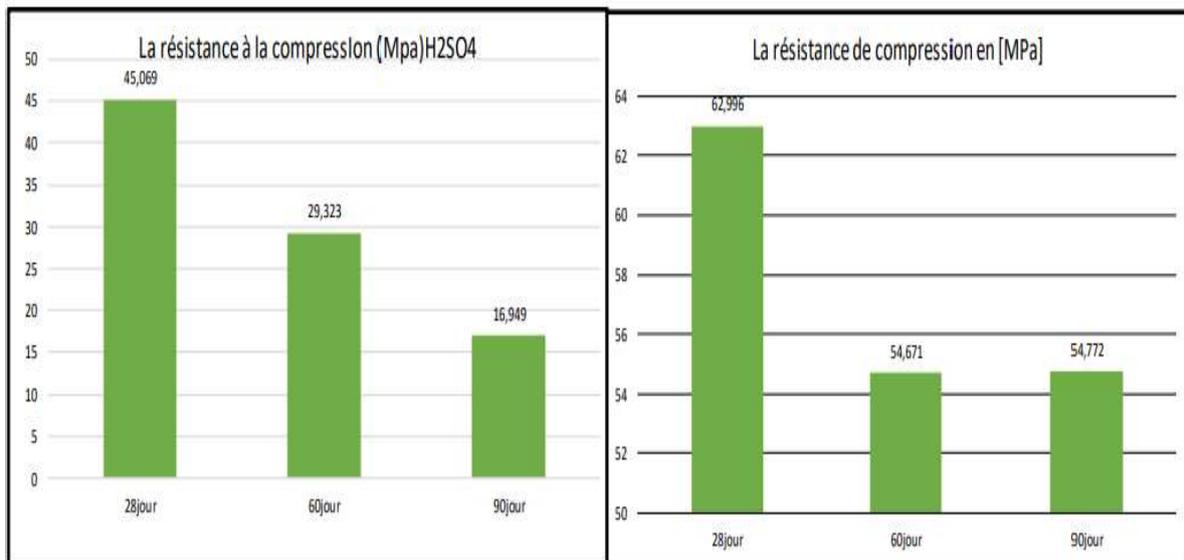


Figure 1.10 : Résistance mécaniques en compression pour les éprouvettes conservées dans H₂SO₄ et HCL.[28]

9.2. Propriété physico-mécanique et durabilité du mortier à base de sable de dune

Benabed et al (2012) [29] Ont entrepris une étude portant sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des mortiers élaborés à partir de sable de dunes. Dans le cadre de cette recherche, ils ont formulé trois types de mortier, comme spécifié dans le Tableau 2. L'objectif de leur étude était d'analyser l'incidence de deux paramètres essentiels. D'une part, ils ont évalué l'impact de l'environnement de stockage sur l'évolution des caractéristiques mécaniques des mortiers. D'autre part, ils ont examiné la durabilité de ces mortiers en les

Chapitre 1 : Durabilité Aux Attaques Acides

soumettant à des cycles de séchage-mouillage, ainsi qu'à des attaques chimiques avec une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à une concentration de 5%.

Tableau 1.2 : Composition en grammes des différents constituants des mortiers. [29]

Constituant	Mortier		
	MSD	MSDP	MSAD
Ciment	450	450	450
Plastifiant (2%)	0	9	9
Eau	351	297	252
SA	0	0	900
SD	1350	1350	450

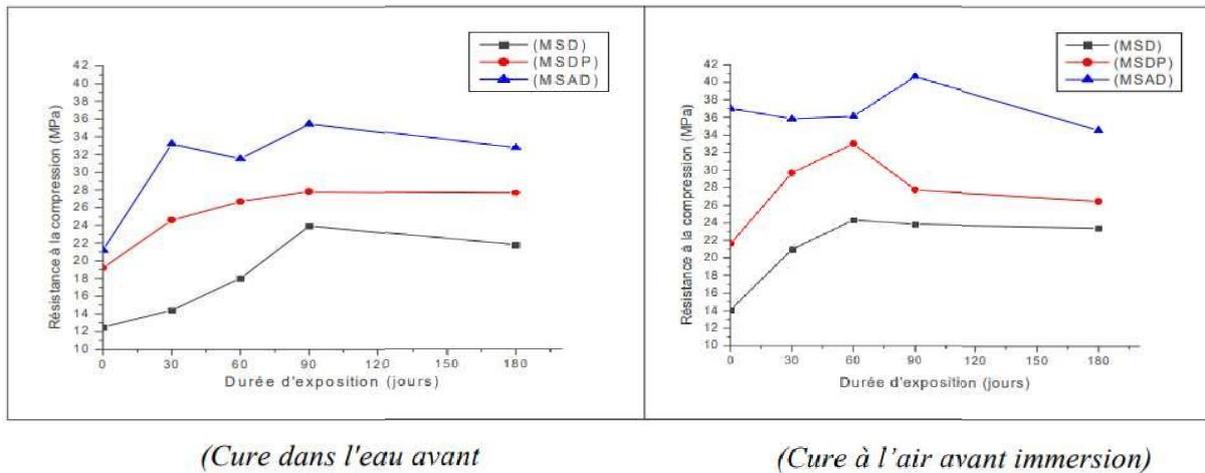


Figure 1.11 : Résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition aux sulfates. [29]

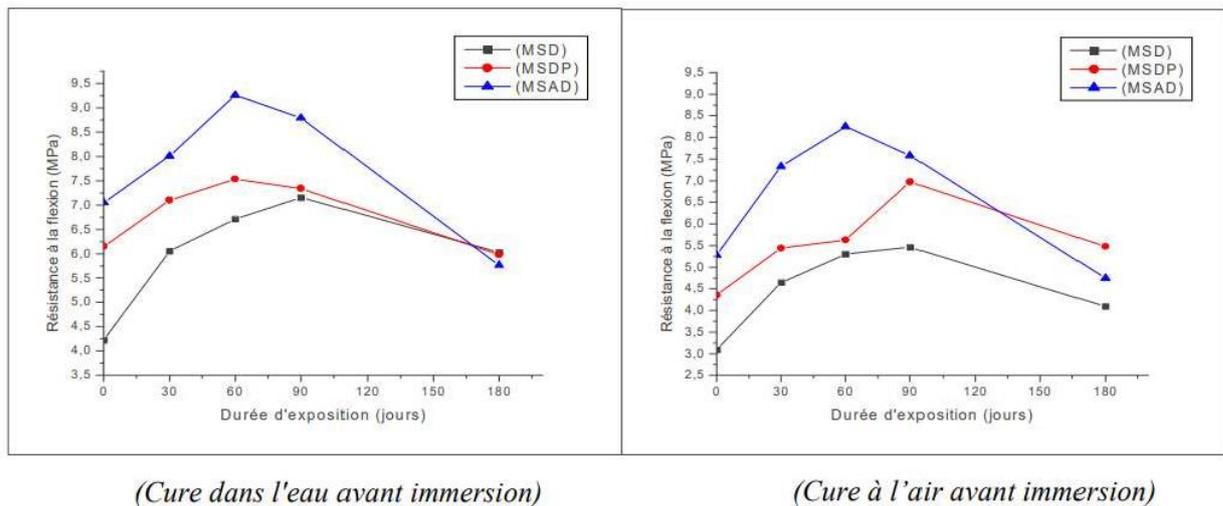


Figure 1.12 : Résistance à la flexion en fonction de la durée d'exposition aux sulfates.[29]

L'analyse expérimentale du comportement physico-mécanique et de la durabilité des mortiers à base de sable dunaire de la région de Laghouat nous a permis de tirer plusieurs conclusions significatives : Les mortiers immergés dans une solution de sulfate de sodium à

une concentration de 5 % présentent une augmentation des résistances mécaniques jusqu'à 90 jours. Cependant, à 180 jours, les résistances mécaniques, qu'il s'agisse de la compression ou de la flexion, diminuent pour les trois types de mortiers MSD, MSDP et MSAD.

Les mortiers à base de sable mélange sont plus résistants à l'attaque par les sulfates que les mortiers à base de sable dunaire. Cette différence s'explique par la porosité accrue des mortiers de sable dunaire, qui facilite la pénétration des agents agressifs et réduit les propriétés liantes ainsi que les caractéristiques mécaniques des mortiers.

9.3. Propriétés du mortier autoplaçant fabriqué avec différents types de sable

Référence : Benabed et al. (2012) [30] Ont entrepris une étude approfondie portant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autocompactants (MCS) en se basant sur différents types de sables. Cette recherche s'est concentrée sur l'examen du comportement des MCS en fonction de la nature du sable utilisé, notamment le sable concassé (CS), le sable de rivière (RS), le sable des dunes (DS), ainsi que divers mélanges de ces sables. Pour évaluer les propriétés rhéologiques, les chercheurs ont eu recours à des essais de mini-effondrement, de temps d'écoulement en V et de viscosité.

Les conclusions tirées de l'expérimentation ont démontré que les propriétés rhéologiques et la résistance des MCS étaient intimement liées à la composition du sable employé. Plus précisément, il est apparu que les MCS présentaient une nette amélioration de leurs propriétés rhéologiques et de résistance lorsqu'ils étaient fabriqués à partir de mélanges de sables comprenant des sables concassés et des sables de rivière. En revanche, l'utilisation de mélanges de sables concassés et dunaires se traduisait par une réduction de ces caractéristiques, particulièrement lorsque la proportion de sable des dunes était élevée. Il convient également de noter que l'ajout de fines calcaires au sable concassé, à hauteur de 10 à 15%, s'est révélé bénéfique pour la production de MCS affichant de bonnes propriétés rhéologiques et de résistance. Cependant, il est important de souligner qu'une réduction de la résistance à la compression a été observée lorsque la proportion de sable des dunes atteignait jusqu'à 50% dans les mortiers comportant des mélanges de sables binaires et ternaires. Cette observation met en évidence l'impact potentiellement négatif d'une teneur élevée en sable des dunes sur la résistance à la compression des MCS. Les mélanges de sables étudiés ont été regroupés en trois catégories distinctes : le groupe **1 (CS/RS)**, le groupe **2 (CS/DS)**, et le groupe **3 (CS/SR/DS)**, chacun comportant des proportions variables de sable concassé, de

sable de rivière et de sable des dunes avec un rapport E/C= 0,4, SP=6% dans tous les mélanges.

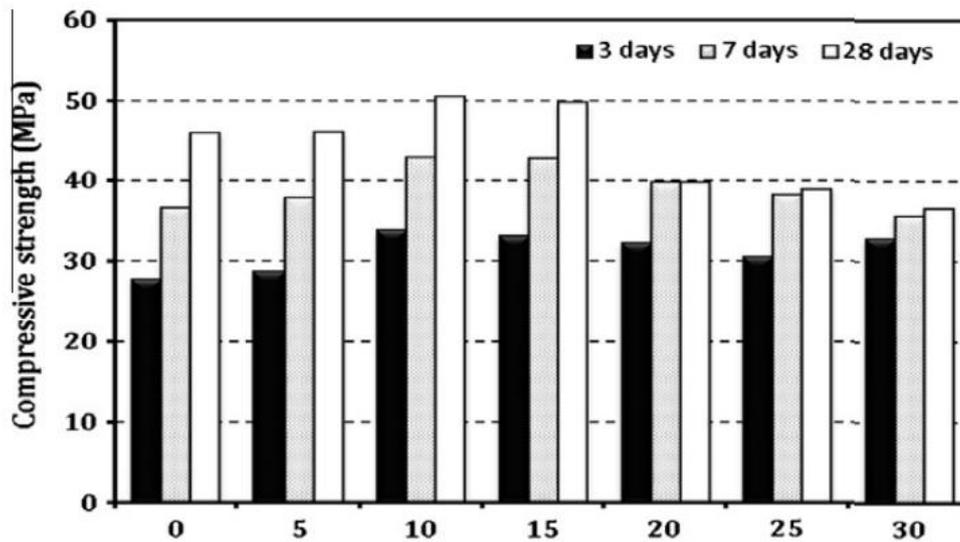


Figure 1.13 : Résistance à la compression du mortier fabriqué avec diverses teneurs fines en calcaire.[30]

Les résultats de la résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours sont illustrés dans la Figure 1.16 est notable que la résistance à la compression atteint son point culminant lorsque la proportion de fines calcaires se situe entre 10% et 15%. Cependant, lorsque la teneur en fines calcaires dépasse les 15%, on observe une diminution de la résistance à la compression. Cette tendance s'explique probablement par une quantité de pâte de ciment insuffisante pour recouvrir efficacement tous les interstices des agrégats, ce qui entraîne une réduction de la résistance à la compression.

En revanche, pour les échantillons dépourvus de fines calcaires ou n'en contenant que 5%, il y a insuffisamment de particules fines pour combler les espaces entre la pâte de ciment et les particules d'agrégats fins, ce qui conduit à des valeurs de résistance à la compression inférieures à celles des échantillons renfermant de 10 à 15% de fines calcaires.

9.4. Effet du remplacement des granulats fins par du sable des dunes du désert sur les propriétés fraîches et la résistance des mortiers autoplaçants.

Référence : Benabed et al. (2014) [31] Ont réalisé une étude approfondie portant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autocompactants, en mettant en particulier l'accent sur l'incorporation de sable fin des dunes (DS) caractérisé par une distribution granulométrique serrée. Dans le cadre de cette recherche, différentes formulations

Chapitre 1 : Durabilité Aux Attaques Acides

de mortier ont été élaborées en utilisant soit du sable concassé (CS) soit du sable de rivière (RS) comme matière de base, avec des substitutions partielles des granulats fins par différentes proportions de DS, variant de 0% à 100%. Le rapport eau/ciment (E/C) a été maintenu à 0,4, et la quantité de ciment employée était de 697 kg/m³.

Les effets du DS sur les caractéristiques des mortiers à l'état frais ont été minutieusement évalués grâce à des tests de mini-affaissement, de temps d'écoulement en V et de viscosité. Parallèlement, la résistance à la compression et la résistance à la flexion ont été mesurées à des intervalles de 3, 7 et 28 jours.

Les résultats de cette étude mettent en lumière une nette amélioration de la rhéologie à l'état frais, sans que cela n'entraîne une altération significative des propriétés mécaniques des mortiers autocompactants, notamment lorsque le taux de substitution par du DS s'établit à 50% ou moins. Cependant, avec un taux de substitution élevé de DS atteignant 75%, on observe une réduction du flux d'affaissement. En remplaçant le DS par du CS ou du RS, on constate également une augmentation de la viscosité du mélange. Dans l'ensemble, l'augmentation du taux de substitution par du DS n'a pas eu d'effet significatif sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers autocompactants.

Les résultats de cette enquête indiquent que le DS peut être considérée comme une source d'agrégats fins facilement accessible pour une utilisation dans les mortiers, tout en maintenant leurs performances mécaniques.

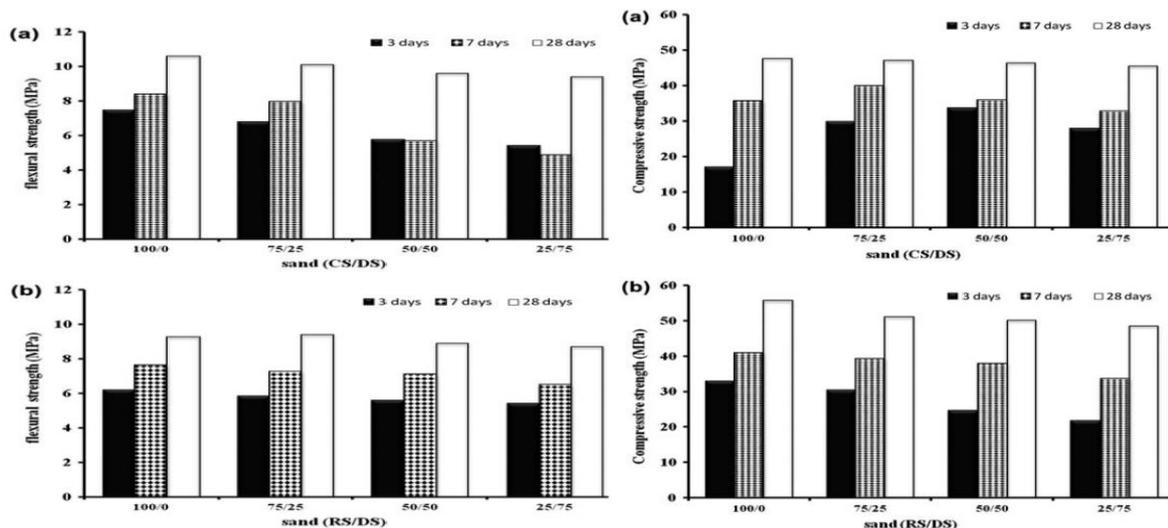


Figure 1.14 : Effet de la teneur en DS sur la résistance à la compression et à la flexion des mortiers fabriqués avec du mélange de sable CS/DS et b) Effet de la teneur en DS sur la résistance à la compression des mortiers fabriqués avec du mélange de sable RS/DS. [31]

La résistance mécanique des agrégats fins remplacés par des mortiers contenant du DS continue d'augmenter au fil du temps, quel que soit le taux de DS présent.

En ce qui concerne la résistance à la compression et la résistance à la flexion à 28 jours, elles demeurent stables malgré l'augmentation de la proportion de DS. Toutefois, il convient de noter que les valeurs minimales de résistance à la compression et de résistance à la flexion sont atteintes lorsque la concentration de DS est élevée.

9.5. Effet de la charge de nitrate de sodium sur le transport des électrolytes par le tubule rénal

Référence : Jian et al. (2016) [32] Dans leur étude, ont exploré l'utilisation du sable de dunes dans la production de matériaux cimentaires pour l'ingénierie hydraulique. À cette fin, ils ont examiné cinq compositions différentes, chacune caractérisée par des proportions variables en termes de ciment, d'eau, de GGBS (laitier granulé de haut fourneau broyé) et de gypse. Voici un résumé des résultats et des compositions clés :

Compositions étudiées :

- **Composition 1** : $E/C = 0,5$, 1415 kg/m³ de sable de dunes (**SD**), 450 kg/m³ de ciment, 225 kg/m³ d'eau.
- **Composition 2** : $E/C \approx 0,6164$, 1408,8 kg/m³ de **SD**, 365 kg/m³ de ciment, 85 kg/m³ de GGBS, 225 kg/m³ d'eau.
- **Composition 3** : $E/C \approx 0,8036$, 1402,6 kg/m³ de **SD**, 280 kg/m³ d'eau, 170 kg/m³ de GGBS, 225 kg/m³ d'eau.
- **Composition 4** : $E/C \approx 0,9574$, 1397,7 kg/m³ de **SD**, 235 kg/m³ de ciment, 170 kg/m³ de GGBS, 45 kg/m³ de gypse, 225 kg/m³ d'eau.
- **Composition 5** : $E/C \approx 1,1842$, 1392,8 kg/m³ de **SD**, 190 kg/m³ de ciment, 170 kg/m³ de GGBS, 90 kg/m³ de gypse, 225 kg/m³ d'eau.

Les résultats ont démontré que l'incorporation de GGBS a eu un impact significatif sur la résistance à la traction, à la compression et à la rupture des matériaux cimentaires par rapport aux compositions de base. Les compositions présentant un rapport Eau/Ciment (E/C) plus bas ont affiché de meilleures performances en termes de résistance et de durabilité. Les analyses au microscope électronique ont par ailleurs confirmé la formation de composés cimentaires. En conclusion, cette étude suggère que le sable de dunes peut être efficacement utilisé dans la production de matériaux cimentaires pour l'ingénierie, en ajustant les proportions d'eau, de ciment, de GGBS et de gypse pour atteindre les performances requises,

soulignant ainsi l'importance du rapport E/C dans la conception de ces matériaux.

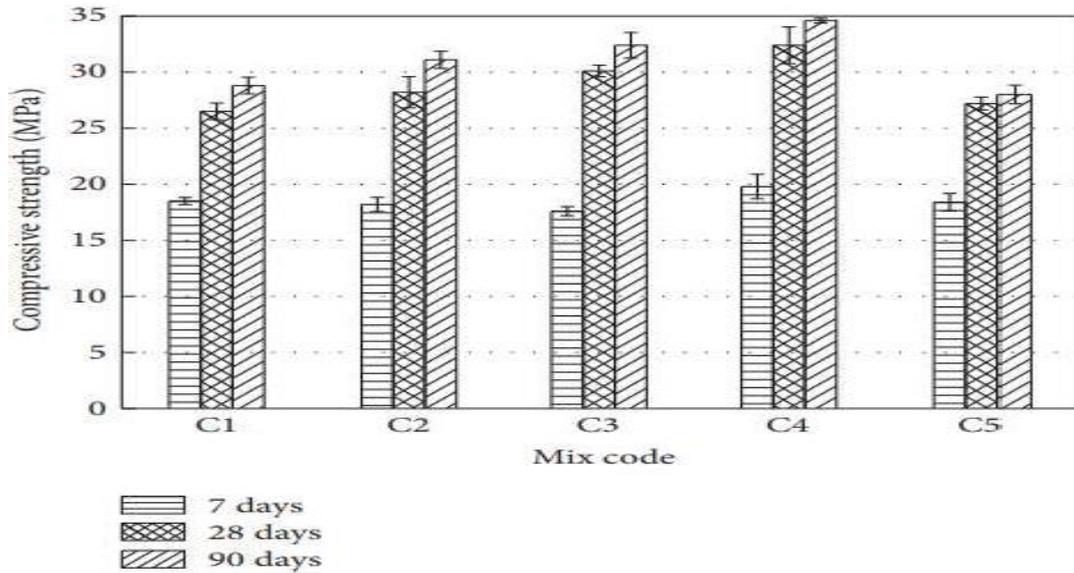


Figure 1.15 : Évolution de la résistance à la compression à la rupture des mélanges conçus. [32]

L'amélioration de la résistance à la compression par l'ajout de GGBS est due principalement à une distribution granulométrique améliorée, créant une plus grande compacité et, par conséquent, une résistance accrue. De plus, la réaction pouzzolanique du GGBS contribue également à la force, en particulier à des stades avancés, où la silice et l'alumine réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour produire des hydrates de silicate de calcium (CSH) et de silicate de calcium et d'aluminium (CASH), essentiels au développement de la résistance. L'observation au microscope électronique (SEM) confirme efficacement la formation de ces composés cimentaires C-S-H

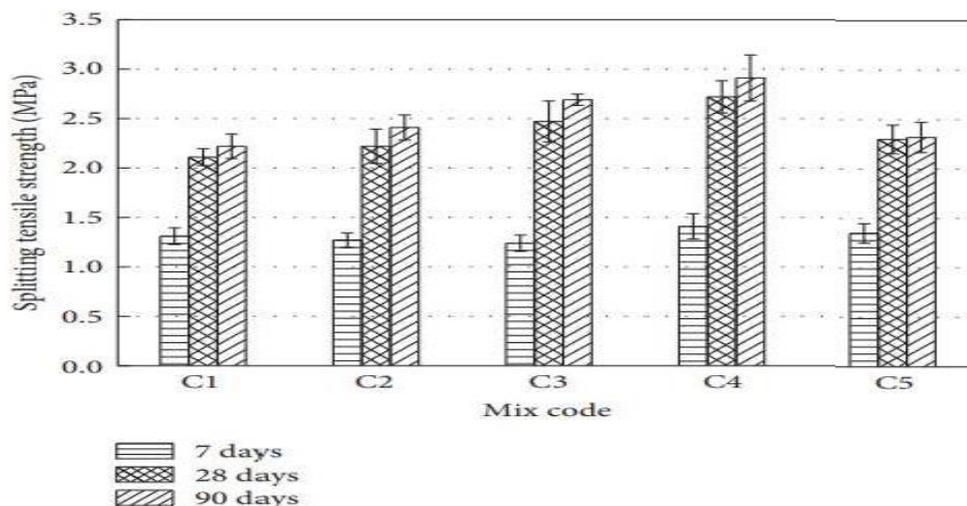


Figure 1.16 : Évolution de la résistance à la traction à la rupture des mélanges conçus. [32]

La résistance à la traction et à la rupture des matériaux cimentaires atteint respectivement 32,4 MPa et 2,72 MPa à 28 jours, lorsqu'une quantité de 170 kg/m³ de GGBS et 45 kg/m³ de gypse est ajoutée. L'ajout de GGBS améliore significativement ces propriétés mécaniques, principalement grâce à une meilleure répartition granulométrique et à un effet pouzzolanique par rapport à l'utilisation exclusive de ciment dans l'échantillon.

9.6. Influence des fibres d'acier sur la performance en flexion du béton incorporant des granulats de béton recyclé à sable dunaire

Référence : Kachouh, El-Hassan, et El-Maaddawy (2021) [33] Ont exploré la performance en flexion du béton renforcé de fibres d'acier, en utilisant des agrégats de béton recyclés (RCA) et du sable provenant des **dunes du désert**. Leur recherche a consisté à remplacer les agrégats naturels par des RCA à des taux de 30%, 70%, et 100%, tout en incorporant des fibres d'acier à des proportions volumiques de 1%, 2%, et 3%. Des essais de flexion en trois et quatre points ont été réalisés pour évaluer le comportement en flexion des mélanges de béton, qu'ils soient renforcés par des fibres d'acier ou non. Les résultats expérimentaux ont révélé que le remplacement des RCA avait un impact plus significatif sur le comportement en compression, tandis que l'ajout de fibres d'acier influençait davantage les performances en flexion. L'incorporation de fibres d'acier a conduit à une amélioration substantielle de la pente, de la résistance à la flexion, de la déflexion, de la ténacité, et du rapport de flexion équivalent, particulièrement dans le cadre des essais de flexion à quatre points. Pour analyser ces observations, des modèles de régression analytique ont été élaborés pour établir des corrélations entre les différentes propriétés mesurées lors des essais de flexion.

9.7. Caractérisation expérimentale d'un nouveau béton sable durable dans un environnement agressif

Référence : (Mani et al. 2020) [34] Dans leur recherche, ont exploré l'utilisation d'une nouvelle source de sable en tant qu'alternative au sable naturel pour la fabrication de béton de sable. Leur étude expérimentale a révélé que le béton de sable élaboré à partir de cette nouvelle ressource, provenant des **dunes du désert algérien**, démontrait une résistance satisfaisante, particulièrement dans les conditions environnementales rigoureuses du Sahara.

L'étude a examiné trois compositions de béton distinctes :

- **Composition 1** : Elle se compose entièrement de **sable de dunes** (GSD) avec 1396.63

kg de sable de dunes, 465.54 kg de ciment et 279.32 L d'eau (rapport Eau/Ciment E/C = 0.6).

- **Composition 2** : Elle consiste exclusivement en sable naturel (RSN) avec 1390.04 kg de sable naturel, 463.34 kg de ciment et 254.84 L d'eau (E/C = 0.55).
- **Composition 3** : Elle représente un mélange de 40% de **sable de dunes** (GSD) et 60% de sable naturel (RSN), contenant 1392.39 kg de sable, 464.13 kg de ciment et 255.27 L d'eau (E/C = 0.55).

Les échantillons de béton ont été extraits des moules, immergés dans l'eau pendant 28 jours, puis soumis à des retraits à différents intervalles pour évaluer les effets de l'environnement agressif. Deux types d'eau ont été employés : de l'eau ordinaire (eau du robinet) et de l'eau agressive contenant des ions chlore Cl^- , et des ions soufre SO_4^{2-} reconnus comme les éléments les plus préjudiciables pour le béton. La concentration en ions chlore atteignait 1640,23 mg/l dans la région 1 (Sidi Mestour), tandis que la concentration en ions soufre était de 3373 mg/l dans la région 2 (hôtel de Louss). Pour accélérer l'observation des effets de ces éléments, les concentrations ont été triplées.

Les échantillons de béton ont ensuite été immergés dans un environnement simulant une couche d'eau ascendante, susceptible d'impacter les infrastructures en amont. Les caractéristiques chimiques de l'eau agressive, déterminées par l'université, sont détaillées dans le tableau 4, en fonction des différentes régions



Figure 1.17 : (a) Échantillons conservés dans l'Eau (b) Échantillons conservés dans le milieu agressif. [34]

Effet sur la résistance à la compression

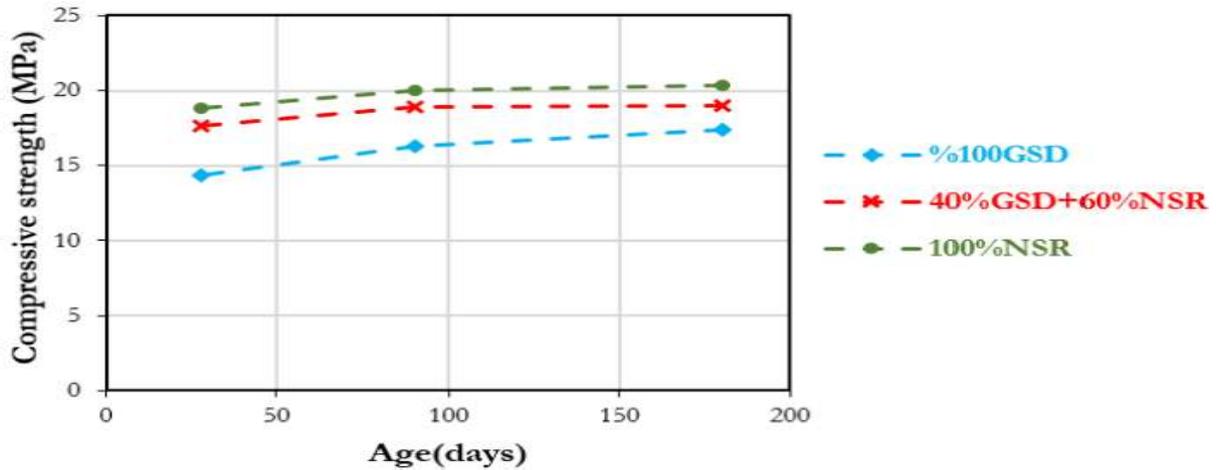


Figure 1.18 : Résistance à la compression des bétons conservés dans l'eau [34]

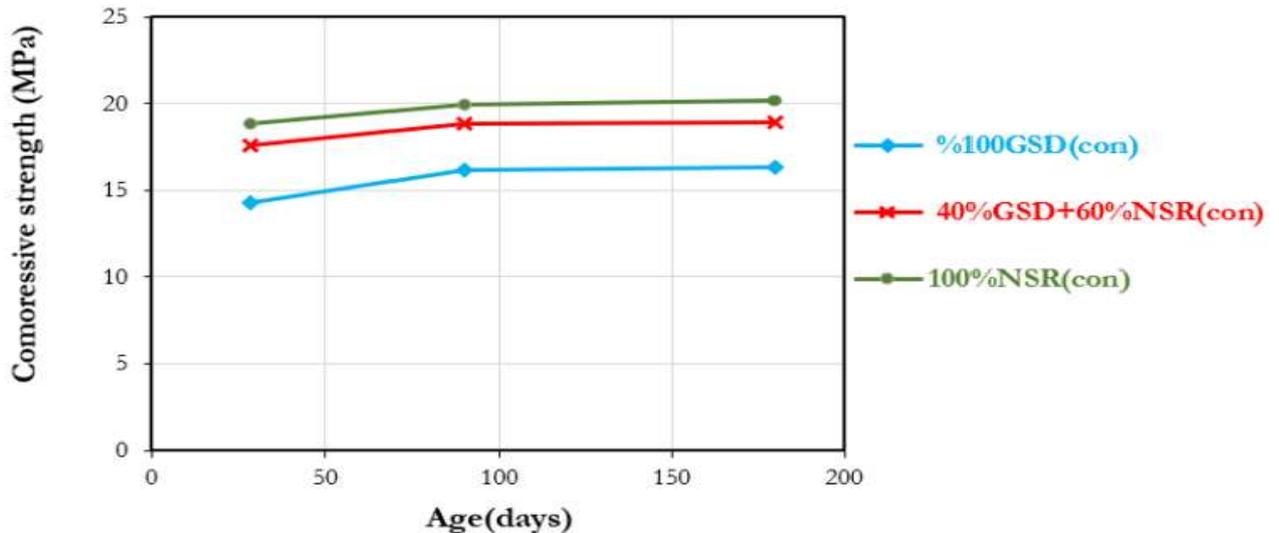


Figure 1.19 : Effet de milieu agressif sur la résistance à la compression. [34]

Les figures 20 et 21 révèlent une amélioration significative de la résistance à la compression du béton de sable obtenu en mélangeant le sable des dunes de sable (GSD) avec du sable naturel (NSR), avec une augmentation d'environ 23,13% par rapport au béton de sable composé uniquement de sable de dunes. Cette différence de résistance s'explique par les caractéristiques granulaires distinctes et les facteurs de compacité propres à chaque type de sable. Un coefficient de douceur plus faible indique une surface plus lisse du sable, ce qui réduit la résistance du béton résultant.

En outre, il est intéressant de noter que le milieu environnant a un impact similaire sur les différents bétons testés. Le béton de sable fabriqué à partir du sable naturel d'Oued El-

Ratm (NSR) affiche la résistance à la compression la plus élevée, tandis que le béton issu des dunes de sable de Guemar (GSD) présente la résistance la plus faible, et le mélange se situe entre les deux en termes de résistance à la compression. Cette tendance se maintient même lorsque les bétons sont soumis à des conditions de stockage agressives, comme indiqué dans la figure 21.

Effet sur la résistance à la Flexion

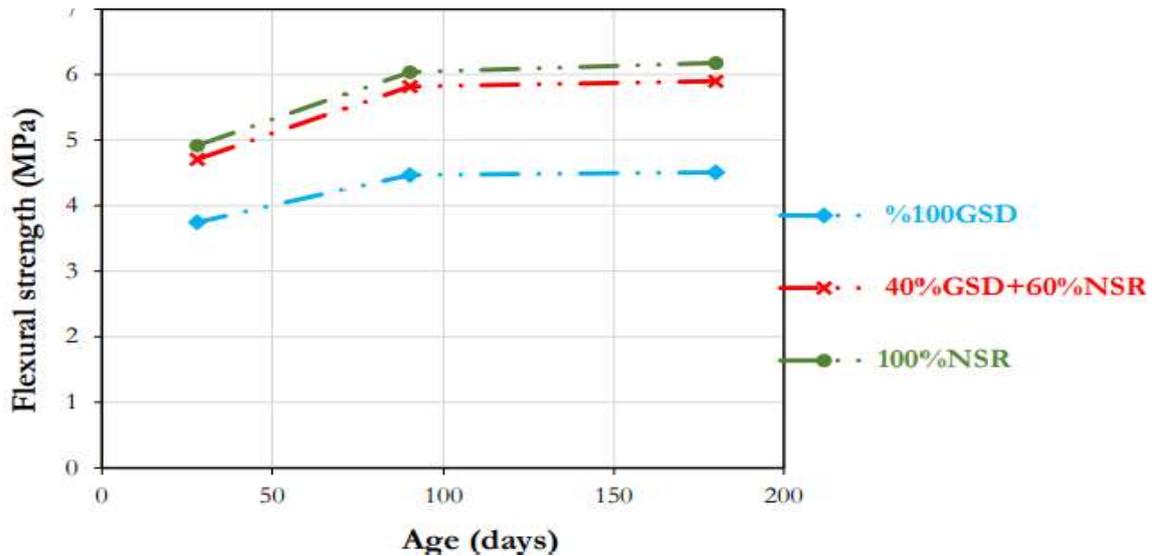


Figure 1.20 : Résistance à la flexion des bétons conservés dans l'eau. [34]

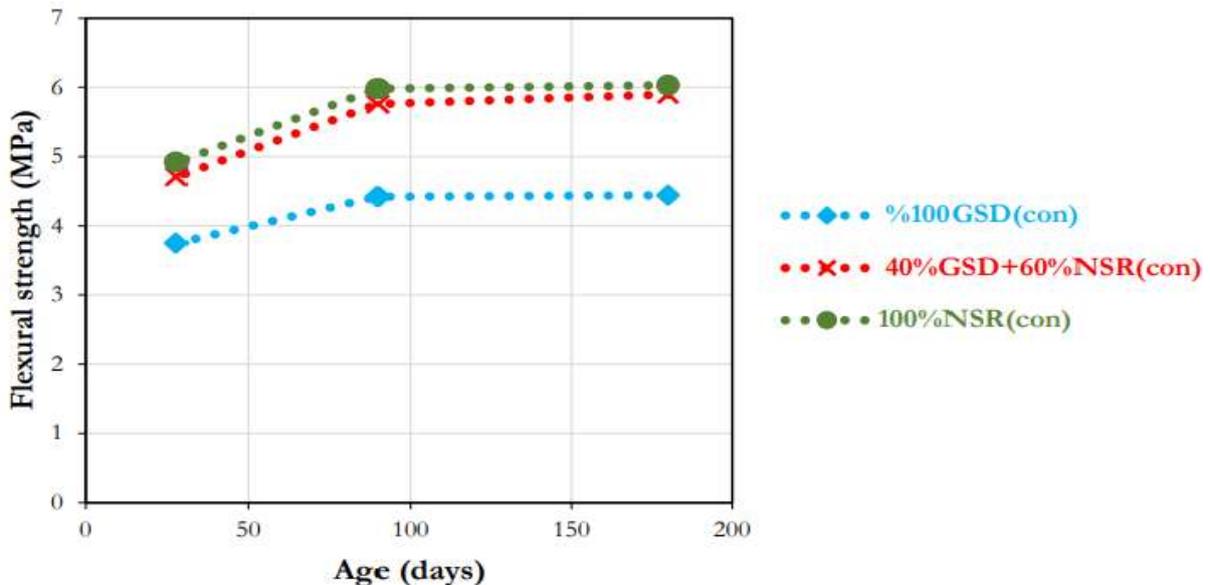


Figure 1.21 : L'effet de milieux agressifs sur la résistance à la flexion. [34]

De manière similaire à ce qui a été observé pour la résistance à la compression, on constate que le béton composé intégralement de sable naturel provenant d'Oued El-Ratm

(NSR) affiche la meilleure résistance à la flexion. La résistance à la flexion du béton élaboré à partir d'un mélange de 40% de sable des dunes de Guemar (GSD) et 60% de sable naturel (NSR) surpasse celle obtenue par le béton composé à 100% de sable des dunes de Guemar (GSD), montrant une amélioration d'environ 30,20% par rapport à la résistance la plus faible observée dans le cas du sable des dunes de Guemar (GSD) en pureté.

10. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons examiné en détail les défis et les enjeux liés à la durabilité des mortiers face aux agressions acides et sulfatiques. Les agressions acides, telles que l'acide chlorhydrique (HCl) et l'acide sulfurique (H₂SO₄), ainsi que les attaques sulfatiques, représentent des menaces importantes pour l'intégrité des matériaux de construction. Nous avons passé en revue les mécanismes de dégradation, les facteurs qui influencent la réaction entre les mortiers et ces agressions, ainsi que les impacts sur les propriétés mécaniques et la durabilité des mortiers. Les travaux de recherche antérieurs ont été abordés, mettant en lumière les avancées dans la compréhension de ces processus de dégradation.

Chapitre 2 : Sable De Dune

1. Introduction

Le sable est présent dans de nombreuses régions du monde et peut être utilisé dans de nombreuses applications, telles que la construction, l'industrie, l'agriculture, les sports, la filtration de l'eau, etc. En construction, le sable est un composant important du béton et de l'asphalte. Il peut également être utilisé pour la fabrication de briques, de tuiles et de verre.

Du point de vue environnemental, l'extraction de sable peut avoir des conséquences négatives sur l'écosystème. L'exploitation excessive de sable peut provoquer l'érosion des côtes et altérer les habitats marins, tandis que l'exploitation de carrières de sable peut avoir un impact sur les habitats terrestres et la biodiversité locale. De plus, l'utilisation de sable comme matière première dans l'industrie de la construction a un impact sur la quantité de sable disponible pour d'autres applications, telles que la filtration de l'eau.

Ainsi, il est important de trouver des alternatives durables à l'utilisation de sable, telles que l'utilisation de matériaux recyclés ou l'adoption de méthodes de construction plus durables qui nécessitent moins de sable. De plus, il est important de gérer de manière responsable l'exploitation des carrières de sable et de veiller à ce que les écosystèmes locaux soient préservés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des études bibliographiques sur l'utilisation des matériaux locaux, en particulier le sable de dune, dans la construction. La composition du sable varie considérablement d'un endroit à l'autre en fonction de la nature des roches, et nous examinerons comment des travaux de recherche précédents ont étudié l'utilisation du sable de dune dans la construction dans notre Sahara.



Figure 22.1 : Image satellite du Sahara Algérie. [35]

2. Définition du sable de dune

Le sable des dunes est le résultat de l'érosion et de la sédimentation de diverses roches, suivie par le transport fluvial et parfois éolien. La plupart des formations sablonneuses sont faites de quartz. Elles sont caractérisées par une granulométrie fine et très serrée. [36]



Figure 2.2 : Sable de dune La barkhane. [37]

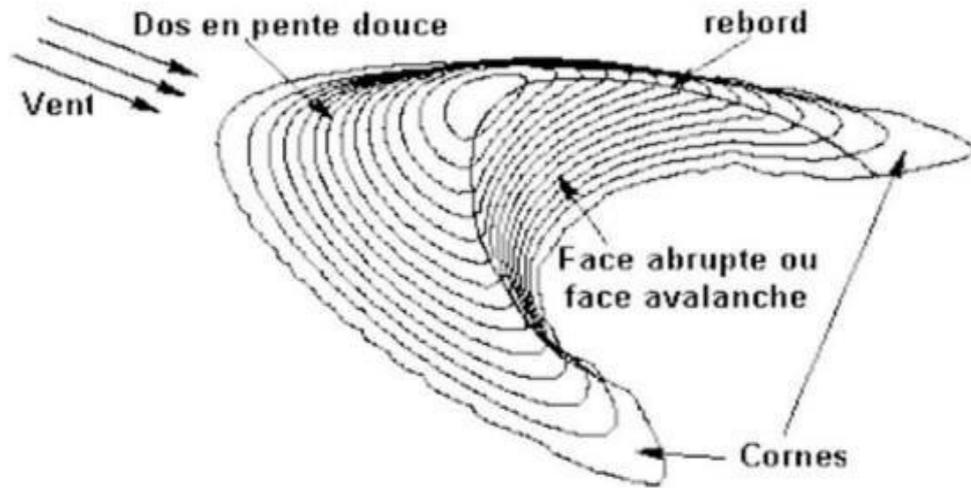


Figure 2.3 : Morphologie de la barkhane. [37]

2.1. Mécanismes de formation

Les dunes prennent naissance dans des régions où le sable est abondant et où il n'est pas maintenu en place par la végétation, que ce soit dans un désert aride, sur une plage balayée par les vagues, ou encore dans le lit d'une rivière à faible débit. Le sable subit une érosion, souvent sous l'effet du vent, un processus connu sous le nom de déflation.

Au gré du vent, les grains de sable sont transportés en une série de bonds proches du sol, ce phénomène étant appelé la saltation. Lorsque la puissance du vent diminue, généralement du côté à l'abri du vent, ces grains de sable s'accumulent progressivement, formant ainsi une structure en relief que nous reconnaissons sous le nom de dune.

Les dunes ne sont pas immobiles, elles peuvent se déplacer au fil du temps. Ceci se produit à travers un processus d'érosion du versant exposé au vent, tandis que de l'autre côté, à l'abri du vent, les sédiments continuent à s'accumuler. Ce cycle d'érosion et d'accumulation assure la mobilité et l'évolution constante des dunes [36]

3. Utilisation du sable de dune dans la construction

3.1. Diverses utilisations

Le sable est un élément essentiel du procédé de dépôt et constitue une ressource très importante d'un Point de vue économique : remblai, granulats de béton, matériau de construction, sable siliceux à usage industriel.

Ces derniers (anciennement appelés sables industriels) constituent l'essentiel des

matières premières pour l'in du strie du verre, moules, noyaux de fonderie ; ils sont également utilisés dans la fabrication de céramiques et de mortiers spéciaux.

Les terres sablonneuses sont également un cadre naturel pour l'accumulation de minéraux alluviaux lourds ; ces concentrations de minéralisation sableuse sont connues sous le nom de placer (mot espagnol) et d'or, de diamant, de cassitérite (minerai d'étain), de magnétite (oxy de fer), d'ilménite (oxy de titane et de fer), etc. Le placer d'ilménite ou « sable noir » est économiquement important pour la fabrication de pigments blancs (dépôts côtiers en Australie) et comme source de titane métallique.

Le sable joue également un rôle important en tant que nappe phréatique (aquifère) ou en tant que réservoir potentiel d'hydrocarbures. Il est important que l'extraction de sable (souvent anarchique) soit régulée pour ne pas perturber le fragile équilibre naturel : érosion des plages où l'approvisionnement naturel en sable est coupé ; destruction des nappes phréatiques à terre, etc. [37]

La recherche sur les multiples utilisations du sable de dune est un domaine d'étude crucial qui suscite l'intérêt de nombreux chercheurs dans divers domaines. Les scientifiques et les ingénieurs se penchent sur les propriétés géologiques, la disponibilité, l'extraction durable, les applications industrielles et les implications environnementales associées au sable de dune. Par exemple, des études telles que celle menée par Givi et Alengaram (2015) [38] ont examiné l'impact de l'utilisation de sable de dune comme granulat dans le béton, en se concentrant sur les propriétés mécaniques du matériau à des températures élevées.

D'autres travaux, tels que ceux d'Oyelaran et Nebeife (2019) [39], se sont penchés sur l'exploration des gisements de sable de dune dans des régions spécifiques, comme l'Afrique du Nord, en soulignant l'importance de l'industrie du verre et des opportunités économiques associées. La recherche sur le rôle du sable de dune en tant que ressource minérale pour l'extraction de minéraux alluviaux lourds est également un sujet d'intérêt, comme en témoigne l'ouvrage de Broder (2007) sur les minéraux lourds. Enfin, des études telles que celles de Bear et Verruijt (1987) [40] abordent la modélisation des aquifères et des nappes phréatiques, mettant en lumière l'importance du sable de dune en tant que composant clé de ces systèmes hydrologiques. La recherche continue dans ces domaines est essentielle pour mieux comprendre et gérer les ressources de sable de dune de manière durable et équilibrée.

3.2. Utilisation du sable de dunes dans le béton

Pendant longtemps, le sable de dunes était principalement utilisé pour des tâches telles que le remblayage des excavations de fondations et les projets routiers. Cependant, son rôle en tant que composant principal du béton a véritablement émergé après l'introduction du béton de sable en 1853, comme documenté dans le Rapport général et les conclusions du Congrès mondial de la route. Cette avancée a suscité un nouvel intérêt pour l'exploration de l'utilisation du sable de dunes comme principal composant des structures du génie civil. Par conséquent, des recherches ont été entreprises, à la fois en Algérie et à l'étranger, pour explorer les possibilités de développer cette approche. [41]

3.3. Les aspects économiques

Les avantages sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, car il est largement disponible en quantité quasi-inépuisable. De plus, son extraction ne génère pratiquement aucun coût supplémentaire et son mélange avec les autres matériaux sur le chantier peut être facilement réalisé [37].

3.4. Intérêt de l'utilisation du sable de dune

L'intérêt de l'utilisation de sable de dune comme agrégat dans l'industrie de la construction s'étend sur deux niveaux majeurs : le plan technique et le plan économique. Ces deux aspects ont été étudiés en profondeur dans la recherche, avec des résultats encourageants. Au niveau technique, le sable de dune offre plusieurs avantages. Tout d'abord, ses caractéristiques granulométriques peuvent être adaptées pour répondre aux exigences spécifiques d'un projet de construction donné. Cela permet aux ingénieurs de contrôler la compacité des matériaux et de minimiser les vides entre les particules, ce qui améliore la résistance mécanique des matériaux finaux. La granulométrie optimisée du sable de dune permet une meilleure liaison avec la matrice cimentaire, renforçant ainsi la cohésion globale des matériaux.

De plus, le sable de dune est souvent disponible localement, ce qui réduit considérablement les coûts de transport. Dans de nombreuses régions, l'utilisation de matériaux locaux permet de minimiser l'empreinte carbone associée au transport d'agrégats sur de longues distances. Cette approche s'aligne sur les principes du développement durable en réduisant l'impact environnemental.

Sur le plan économique, l'utilisation de sable de dune peut offrir des avantages significatifs. L'abondance de cette ressource locale peut réduire les coûts d'approvisionnement en matériaux de construction. Les économies résultant de la réduction des coûts de transport et d'approvisionnement peuvent contribuer à la rentabilité globale d'un projet. En outre, l'utilisation de sable de dune peut être une option économique, en particulier dans les régions où l'extraction de sable naturel est limitée ou coûteuse. [41]

La recherche menée par Belaid, S. et al (2007) [26] dans leur étude sur la performance du béton contenant du sable de dune dans un climat désertique a apporté des preuves tangibles de ces avantages. Leurs résultats ont montré que l'utilisation de sable de dune a non seulement amélioré les propriétés mécaniques du béton, mais a également contribué à réduire les coûts globaux de construction.

En somme, l'utilisation de sable de dune comme agrégat présente un potentiel considérable pour améliorer à la fois l'efficacité technique et économique des projets de construction. Cela ouvre la voie à des pratiques de construction plus durables, économiques et respectueuses de l'environnement. [26]

4. Type des dunes

4.1. Les avant-dunes

Sont des crêtes plus ou moins ancrées par la végétation (par exemple marram grass), parallèles au littoral et attachées à la plage, c'est-à-dire échangeant du sable avec elle dans le même système de dépôt. A ne pas confondre avec les anciennes post-dunes en voie d'érosion, ni avec les dunes qui ne parviennent pas à former des dunes actives avant le dîner. En Espagne et en Tunisie, ces avant-postes sont systématiquement considérés comme faisant partie des biens communs marins, ce qui contribue à les protéger. L'avant-dune est formée de plantes pionnières sableuses qui retiennent le sable jusqu'au sommet de la plage. [39]

4.2. Les falaises dunaires

(Dune Cliff en anglais), également connues sous le nom de "Dune Cliff" en anglais, se distinguent des dunes de sable habituelles que l'on trouve sur les plages. Elles se forment à partir de l'érosion marine d'anciennes dunes qui étaient autrefois ancrées par une pelouse ou une zone boisée.

Au fil du temps, les vagues, les marées et les tempêtes côtières érodent la base de la dune, exposant une section verticale qui ressemble à une falaise. Ces formations sont caractérisées par la présence d'une couche d'humus ou de sable à leur base, souvent riche en matière organique en décomposition, de racines d'anciennes plantes et d'autres sédiments.

Les falaises dunaires sont vulnérables à l'érosion côtière causée par l'eau de mer, avec des vagues, des courants et des tempêtes qui les font reculer progressivement. Elles jouent un rôle écologique essentiel en servant de zones de nidification pour diverses espèces d'oiseaux marins et de refuges pour la faune côtière. De plus, la couche d'humus ou de sable à leur base abrite une biodiversité unique, avec des plantes adaptées aux conditions salines. [36]

4.3. Les dunes perchées

(Cliff-top dune en anglais), Les dunes perchées, ou "Cliff-top dunes," sont des formations géologiques qui se forment au sommet de falaises côtières abruptes. Elles résultent du transport du sable depuis la plage ou l'estran par les vents dominants. Ces particules s'accumulent au sommet de la falaise pour créer des dunes perchées. De plus, l'érosion du profil de la pente de la falaise peut contribuer à leur formation. Les dunes perchées sont un élément remarquable des écosystèmes côtiers, avec une écologie unique et une importance environnementale [42].

4.4. Les cordons dunaires artificiels

Les cordons dunaires artificiels sont des structures créées par l'homme, souvent dans le but de se protéger contre les assauts de la mer ou pour aménager des zones cultivées ou urbanisées. Leur construction est une réponse à des préoccupations liées à la gestion des zones côtières. Cependant, ces cordons nécessitent un entretien continu pour maintenir leur intégrité, car sans cela, ils peuvent se dégrader en quelques décennies. Certaines de ces cordes sont semi-naturelles, comme celles à Sangatte, dans le nord de la France, où des cordons préexistants, plus ou moins altérés, ont été redressés par des engins mécaniques et consolidés par des plantes telles que l'ammophile, contribuant ainsi à leur stabilité. Ces cordons artificiels jouent un rôle essentiel dans la gestion des zones côtières, mais leur durabilité dépend de l'entretien et de l'intégration de la nature dans le processus de construction.) [36].

5. Différentes formes des dunes

5.1. Dune de barkhane

Ces dunes sont des dunes empilées, bâties sur un sol plat, très mobiles, en forme de croissant, à face convexe face au vent. Ils peuvent atteindre une taille de 300 m et se regrouper pour former des formes complexes [43].

5.2. La dune parabolique

La Dune asymétrique est en forme de fer à cheval, enfoncée dans le vent, généralement plus ou moins ancrée par la végétation fig 2.4 Par conséquent, son alignement par rapport à la direction du vent est à l'opposé de celui d'un croissant. Les dunes paraboliques sont peu mobiles et il est généralement difficile de migrer une fois formées. [43].

5.3. Les dunes en étoile

Des luminaires ont été trouvés dans des clairières de la forêt de pins, que l'on pense être causé par un déséquilibre du système éolien 4 Les dunes transversales Mouvement en ligne droite perpendiculaire à la direction du vent.

5.4. Dunes du Pilat. Dunes longitudinal

Allongé dans le sens du vent, ils apparaissent si la direction du vent change au cours de l'année. Plus précisément, si le vent a deux directions préférées, elles apparaîtront. Les dunes sont alors étirées dans le sens des vents moyens. Nous avons aussi parlé de la dune Saif. Leur dynamique est beaucoup plus complexe que celle des croissants, car leur forme varie beaucoup dans le temps. [45]

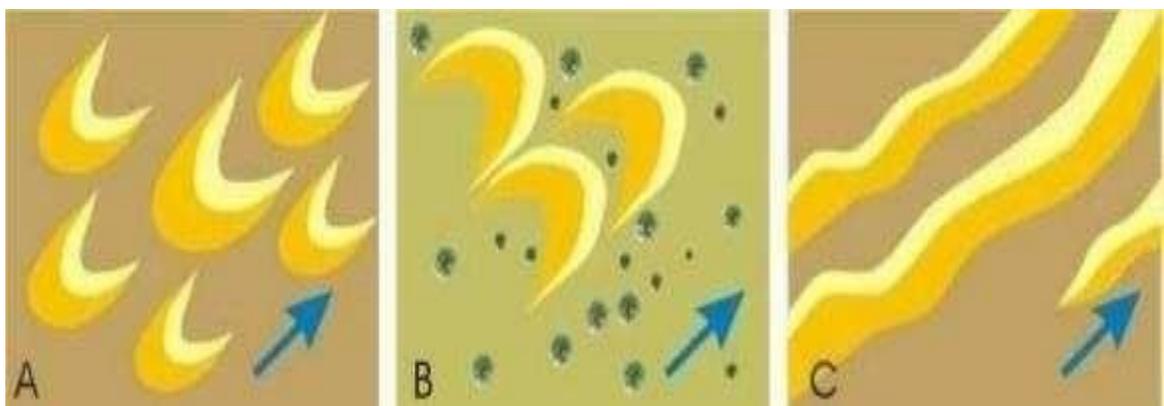


Figure 2.4 : Types de dunes. A : barkhanes ; B : dunes paraboliques ; C : dunes longitudinales

6. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction

La consommation de granulats en Algérie est importante et elle augmente d'année en année. Les granulats grossiers ont tendance à s'épuiser dans certaines zones. Ce matériel n'est plus disponible dans d'autres régions. Par ailleurs, notre pays, notamment au sud de l'Algérie, dispose d'une grande quantité de sable de nature différente (sable dunaire, alluvionnaire et concassé), ainsi que d'une grande quantité de fines naturelles et artificielles. Il est donc nécessaire de réfléchir au développement de nouveaux types de béton tels que le béton de sable ou de mortier.

Ce type de sable est susceptible de former le squelette du béton si une recherche judicieuse est faite sur sa formulation. Les dunes de sable ont longtemps été utilisées pour les remblais, les fondations et les travaux routiers [37].

7. Les différents milieux de la dune

7.1. Les dunes mobiles

Peu ou non enracinées dans la végétation (comme les oyats, les chiendents des sables, etc.) ou dunes blanches, les dunes dites reliques sont solidement stabilisées par la végétation, à l'instar des dunes Grises (couvertes de mousses, de lichens, d'argousiers, etc.). [43].

7.2. Les dunes noires (arbres)

Les dunes noires, ou dunes boisées, sont des formations de dunes de sable où des arbres, notamment des pins, colonisent la crête de la dune, aidant à fixer le sable et à prévenir son déplacement par le vent. Elles sont essentielles pour la stabilisation côtière et offrent un habitat précieux à la biodiversité. D'autre part, les dunes fossiles sont d'anciennes formations de dunes enfouies sous des dépôts sédimentaires autres que le sable, telles que l'argile ou la vase, conservant ainsi des témoignages des conditions géologiques passées. Les dunes noires protègent les côtes et préservent la biodiversité, tandis que les dunes fossiles offrent un aperçu du passé géologique côtier. [44].

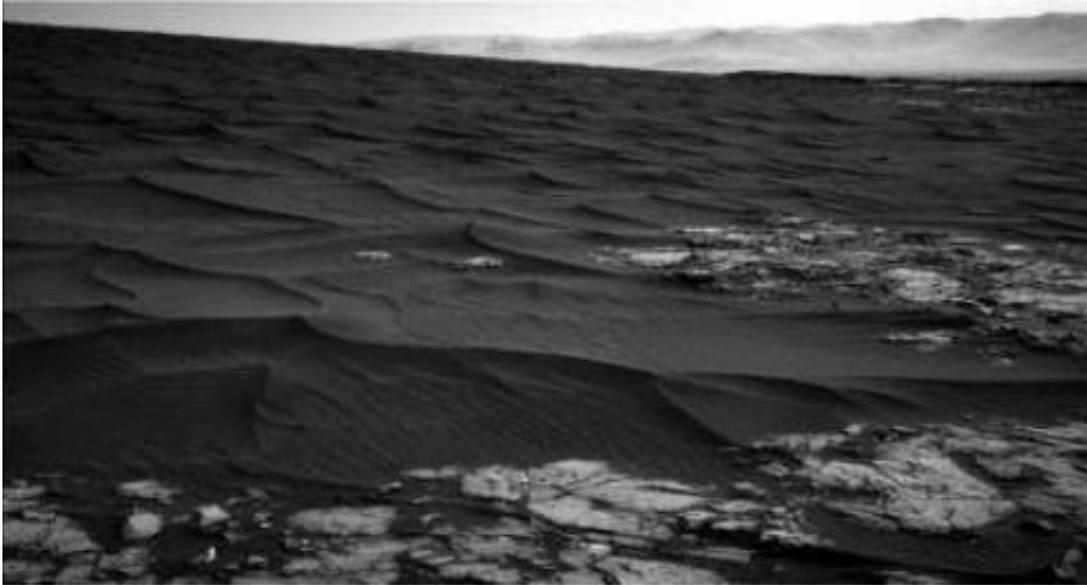


Figure 2.5 : sable de dune noire [44].

7.3. La dune verte (appelée aussi avant dune ou dune embryonnaire)

Il s'agit de la végétation pionnière des parties supérieures des plages, établissant sa présence sur des dunes en train de se former ou à la base de dunes mobiles. Cette végétation est caractérisée par des peuplements dispersés de plantes adaptées au sable, telles que les chiendents des sables, la renouée maritime, le pourpier de mer, la soude brûlée, le cakilier maritime, le panicaut maritime, l'euphorbe maritime et le liseron des dunes. [43].

Ces plantes encouragent l'établissement de macro mycètes en tant que leurs partenaires symbiotiques, tout en stabilisant le sable, ce qui donne lieu à la création de nouvelles buttes sableuses connues sous le nom de nébkas. De plus, ce processus peut éventuellement conduire à l'accroissement du sable sous la forme d'une accumulation subhorizontale localisée à la base de la dune, formant ainsi une élévation légère (banquette surélevée de quelques décimètres par rapport à la partie supérieure de la plage).

Cette dune présente une nature généralement éphémère, que ce soit en raison de l'action des vagues de tempête ou de sa transition vers un type de dune plus avancé, tel que la dune bordière, où l'agencement initial des obstacles n'est plus clairement discernable. [43]



Figure 2.6 : sable de dune verte [44].

7.4. La dune blanche ou jaune

Cette portion de la dune littorale mobile est colonisée par l'oyat, une plante fixatrice spécialement adaptée à une salinité relativement faible du sol (maximum 2 %). Elle coexiste avec d'autres espèces adaptées aux conditions sableuses (comme le panicaut des dunes, l'achillée maritime, la giroflée des dunes, le chou marin, le liseron des dunes, le gaillet des sables et le lis maritime) [43].

Cette zone englobe une pente externe douce ou une falaise sableuse, ainsi qu'un plateau dunaire qui se caractérisent par des formations de déflation (comme les siffle-vent qui peuvent évoluer en couloirs ou plaques de déflation, les caoudeyres et les dunes paraboliques), ainsi que des zones d'accumulation marquées (telles que les tucs et les poudrières)[43].



Figure 2.7 : sable de dune blanche. [43]

7.5. La dune grise

Cette portion de la dune située du côté protégé, correspondant au talus intérieur de la dune blanche, accueille des plantes herbacées fixatrices qui succèdent aux espèces pionnières. Au fil du temps, cette zone évolue progressivement vers une pelouse constituée d'un épais tapis de mousses et de lichens. On y retrouve également des plantes telles que l'Immortelle des dunes, la Linaire des sables, la rose pimprenelle, l'œillet des dunes, l'Ophrys passion, la Canche blanchâtre, la Luzerne marine, le raisin de mer, le Chardon champêtre, le thym serpolet et les Orobanches. Cette végétation contribue à enrichir le sable en matière organique et en humus, formant ainsi un milieu plus favorable [45]. Souvent, au sein de cette dune et en arrière de celle-ci, on peut trouver des dépressions naturelles ou artificielles, comme des mares de chasse ou des prélèvements de sédiments. Une partie de ces dépressions est, au moins temporairement, en contact avec la nappe phréatique [44].



Figure 2.8 : sable de dune grise. [44]

7.6. La dune brune (dune boisée ou frange forestière)

La pelouse cède progressivement la place à des prairies où prospèrent des espèces pré-forestières telles que le Saule des dunes et les Rosiers. Ensuite, ces prairies laissent place à des buissons et des fourrés, abritant des plantes telles que l'Ajonc et le Prunellier. Ces espaces se développent en arbustes, représentant les espèces consolidatrices qui succèdent aux fixatrices. On y trouve des arbustes tels que l'argousier, l'églantier, le sureau, le troène, et éventuellement, ces zones peuvent évoluer vers une formation boisée en bordure du littoral. [43]



Figure 2.9 : sable de dune brune. [43]

7.6.1 Les types des sables selon leurs provenances

Selon leurs provenances, les sables peuvent être classés comme suit :

- Sable de rivière est obtenu par dragage du lit des rivières. Il doit être dur et propre pour pouvoir être utilisé dans le béton.
- Sable de mer provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- Sable de carrière Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants, il est donc à proscrire.
- Sable artificiel il est obtenu par concassage de roches (calcaire dur, grès, etc.). Il est généralement plein de charges. Afin de le rendre utilisable dans le béton il faut limiter le pourcentage de fines.
- Sable de dune c'est une variété de sable de mer, donc c'est très fin. Les dunes de sable se trouvent dans la partie sud du pays. Ils sont situés dans la région présaharienne.
- Le sable utilisé provient des dunes continentales. Ces dunes sont constituées d'innombrables monticules de sable fin qui se sont accumulés dans certaines zones du désert du Sahara [45].

8. Classification des sables

8.1. Granulométrie

- Sables fins Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ m sont inférieurs à 0,5 mm. Ces sables ont dû être considérablement modifiés pour obtenir des propriétés comparables au gravier.
- Sables moyens moins de 20% d'éléments de plus de 2mm, plus de 50% d'éléments

de plus de 80 μ m entre 0.2 et 2mm.

- Sables grossiers : Plus de 20% des éléments sont plus grands que 2mm et plus de 50% des éléments plus grands que 80 μ m sont entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés proches du gravier [46].

8.2. Analyses minéralogique

L'analyse XRD des dunes a révélé la présence d'atomes Si et O₂, qui correspondent à la présence d'espèces SiO₂ (dioxyde de silicium). De plus, le pourcentage atomique significatif de Si indique que SiO₂ est l'espèce dominante.

D'autres valeurs de pourcentage atomique nous permettent de déterminer que les dunes contiennent également des traces d'espèces de calcium et de magnésium par rapport à SiO₂, les résultats sont indiqués dans le spectre. [37]. La silice (quartz) est un composé (dioxyde de silicium), un minéral de formule chimique SiO₂.

La silice pure existe sous forme de minéral dur et se présente dans la nature sous plusieurs formes :

- Constituant majeur des roches sédimentaires clastiques (sable, grès) qui constituent 27% de la croûte terrestre ;
- Fréquente dans les roches métamorphiques ;
- Commun dans les roches ignées : quartz dans les roches magmatiques acides, cristallin ou amorphe dans les roches volcaniques. La silice se présente sous la forme d'un cristal non moléculaire, formé d'unités tétraédriques SiO₄ d'atomes d'oxygène liés ensemble selon un motif régulier, comme dans le quartz, ou sous une forme amorphe, comme dans le verre. [37]

9. Les mortiers

Le mortier est un mélange à l'état durci ou frais composé de sable, de liants et d'eau, avec ou sans auxiliaires et additifs. Il existe différents types de mortiers selon leur nature et leurs pourcentages de composition, de gâchage, de mise en œuvre et de cure. [26]

En général, on distingue trois types de mortiers :

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

- Les mortiers allégés.

Les professionnels de la construction tels que les maçons, les couvreurs, les maçons, etc. utilisent des mortiers... dans la plupart des travaux d'étanchéité ou de coffrage, leur but est de coller les briques entre elles et de répartir la charge. [47]



Figure 2.10 : Exemple d'un mortier. [47]

9.1. Composition d'un mortier

Les mortiers sont en fait des micros - bétons et leurs principes de compositions sont les mêmes [48]. Ils sont composés de ciment, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants. On peut l'illustrer par la figure ci-contre :

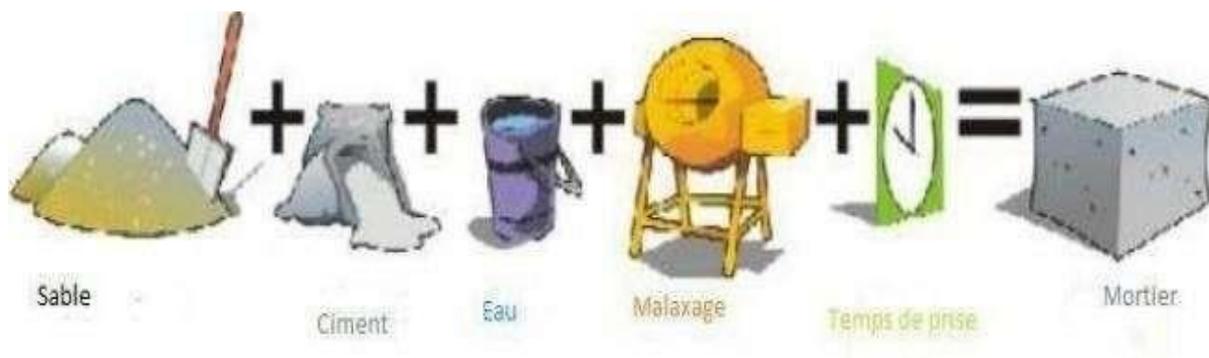


Figure 2.11 : Composition d'un mortier. [48]

1. ciment : Le ciment, un liant hydraulique, est capable de prendre forme dans l'eau. Il est constitué d'une poudre très fine qui, mélangée à de l'eau, forme une pâte qui durcit progressivement au fil du temps.
2. sable : Le sable est un matériau granulaire qui est composé de particules issues de la dégradation de roches, telles que le quartz, les micas et les feldspaths. Les grains de

sable ont une dimension comprise entre 1/16e de millimètre et 2 millimètres.

3. L'eau : L'eau est un élément clé du béton et intervient à toutes les étapes de son cycle de vie grâce à ses propriétés physico-chimiques et mécaniques, en tant que l'un des composants fondamentaux des matériaux. [48].

9.2. Propriétés des mortiers

Les propriétés principales d'un mortier sont :

9.2.1. La fluidité :

Selon les ingrédients, la pâte de mortier peut avoir différentes consistances, de sèche à liquide. Les mortiers utilisés pour la maçonnerie, la finition des bâtiments, etc. ont une fluidité suffisante. La fluidité du coulis de mortier est indiquée par la profondeur à laquelle un cône métallique pesant 300 g et avec un angle au sommet de 30° est inséré dans le coulis.

9.2.2. La maniabilité :

Elle est déterminée par la fluidité, c'est-à-dire : la capacité à atterrir sur la surface, à adhérer fermement à la surface de base sous la forme d'une couche de densité uniforme, avec un minimum de consommation d'énergie. Par exemple les compositions préparées avec une petite quantité de coulis sont sèches et volumineuses. Dans ce cas, on utilise des plastifiants minéraux ou organiques tensioactifs.

9.2.3. Le pouvoir de rétention d'eau :

Cette propriété se caractérise par le fait que la pâte ne se décolle pas pendant le transport et conserve suffisamment d'humidité. Les pâtes de mortier à faible hydrophilie se délaminent pendant le transport et lorsqu'elles sont placées sur des surfaces poreuses (briques d'argile, béton, bois), elles libèrent rapidement de l'humidité. Le séchage du mortier est si important qu'il n'y a pas assez d'eau pour durcir le mortier afin d'atteindre la résistance requise. La rétention d'eau peut être améliorée par l'introduction de plastifiants minéraux et organiques. [15]

9.3. Utilisation des mortiers

9.4. Rôle du mortier dans la construction

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

- i. Façades : Enduits de construction neuve, enduits de rénovation, enduits d'isolation extérieure.
- ii. Carrelages : Colles à carrelage, mortiers de joints, étanchéité, isolation phonique sous carrelage.
- iii. Sols : mortier de nivellement, peinture de lissage, produit de nivellement.
- iv. Mortiers spéciaux : Ingénierie des structures, Maçonnerie, Réparation, Étanchéité, Voirie, Assainissement, Étanchéité [36]

9.5. Caractéristiques principales des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

- La table à secousses.
- Le maniabilimètre du LCPC.
- Le cône.

9.5.1. La Prise

Le temps de prise est généralement mesuré sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) en utilisant l'appareil de Vicat, conformément à la norme applicable. Il est possible d'obtenir (en dehors des normes) le temps de prise d'un mortier en utilisant le même appareillage, mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. L'aiguille utilisée pour pénétrer dans le mortier a un poids de 1000 grammes. Le début de la prise est déterminé lorsque l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable), tandis que la fin de la prise est déterminée lorsque l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur. [49]

9.5.2. Les Types de mortier

9.5.2.1. Les mortiers de ciment

Les mortiers de ciment, connus pour leur grande résistance, ont la particularité de prendre et de durcir rapidement. De plus, un dosage adéquat en ciment les rend pratiquement imperméables. [48]

Pour obtenir des résultats satisfaisants, les dosages usuels se situent entre 300 et 400 kg de ciment par mètre cube de sable [48] [49].

9.5.2.2. Les mortiers de chaux

Les mortiers de chaux se caractérisent par leur texture grasse et onctueuse. Leur durcissement est généralement plus lent que celui des mortiers de ciment, en particulier lorsque la chaux utilisée est de type calcique [49]. Cette caractéristique en fait un choix privilégié pour la restauration de bâtiments anciens, où une liaison plus flexible est souvent nécessaire.

9.5.2.3. Les mortiers bâtards

Le mélange de ciment et de chaux permet de bénéficier des avantages de ces deux types de liants. En règle générale, on utilise des quantités égales de chaux et de ciment, mais selon les besoins et la qualité souhaitée, il est possible de modifier cette proportion en privilégiant l'un ou l'autre des composants [15]. Mortier de ciment : Le mortier de ciment est composé de ciment, de sable et d'eau. Il est largement utilisé pour la construction de maçonnerie et de béton.

- Les mortiers bâtards résultent du mélange de ciment et de chaux, offrant ainsi une combinaison des avantages de ces deux types de liants. En règle générale, on utilise des quantités égales de chaux et de ciment, mais selon les besoins et la qualité souhaitée, il est possible de modifier cette proportion en privilégiant l'un ou l'autre des composants, cette flexibilité en fait un choix polyvalent pour une variété d'applications de construction. [50].

9.5.2.4. Les mortiers de ciment réfractaire

Les mortiers de ciment réfractaire sont des matériaux conçus pour résister à des températures élevées, ce qui les rend indispensables dans la construction de cheminées, de poêles, de fours et d'autres équipements soumis à des chaleurs intenses. Ils sont formulés avec des ciments spéciaux et des agrégats capables de conserver leur intégrité structurelle dans des environnements thermiquement hostiles. L'utilisation de ces mortiers garantit l'étanchéité et la durabilité de ces structures exposées à des températures élevées. [51]

9.5.2.5. Le mortier de plâtre

Le mortier de plâtre est un matériau de construction essentiel, composé de plâtre, de

sable et d'eau, et utilisé pour le revêtement de murs et de plafonds intérieurs. Il offre la possibilité de créer des surfaces lisses et uniformes, tout en étant polyvalent pour diverses finitions. [52]

Ce matériau est largement employé dans le secteur de la construction pour obtenir des surfaces intérieures esthétiques et fonctionnelles, que ce soit pour des applications résidentielles ou commerciales. [52]

9.5.2.6. Le mortier de réparation

Le mortier de réparation est un matériau spécialement conçu pour restaurer des éléments en béton endommagés ou détériorés. Composé de ciment, de sable, d'eau et d'additifs spéciaux, il vise à rétablir l'intégrité structurelle de structures en béton, prolongeant ainsi leur durée de vie. Ce type de mortier est utilisé pour la réparation de fissures, la reconstruction de zones endommagées, le renforcement de zones structurelles affaiblies, et la réparation de béton exposé à des environnements agressifs. Il joue un rôle crucial dans la préservation et la sécurité des infrastructures en béton. [51]

9.5.2.7. Le mortier d'isolation thermique

Les mortiers d'isolation thermique sont des matériaux clés pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Composés de ciment, de particules isolantes légères et d'additifs, ils sont appliqués sur les murs extérieurs des bâtiments pour créer une barrière thermique. Cette couche d'isolation réduit les pertes de chaleur ou de fraîcheur, favorisant ainsi une température intérieure confortable tout en réduisant la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation. Ces mortiers sont largement utilisés dans la construction résidentielle, commerciale et industrielle, contribuant ainsi à des économies d'énergie significatives et à une construction plus durable. Mortier époxy : Le mortier époxy est composé de résine époxy et de charges minérales. Il est utilisé pour les réparations structurelles et les collages. [53]

9.5.2.8. Le mortier de pierre

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

capacité à résister aux contraintes environnementale. [54]

10. Conclusion

En conclusion, l'étude du sable de dune et de son utilisation dans la fabrication de mortier révèle un potentiel considérable pour l'industrie de la construction. Le sable de dune offre des caractéristiques granulométriques idéales, favorisant la compacité et renforçant les propriétés mécaniques du mortier. Sa disponibilité locale réduit les coûts de transport, contribuant ainsi à la durabilité environnementale des projets de construction. En combinant les avantages de ce matériau abondant avec une compréhension approfondie de sa granulométrie et de sa composition, l'industrie peut exploiter pleinement le potentiel du sable de dune pour améliorer l'efficacité, la qualité et la durabilité des mortiers utilisés dans la construction.

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter une analyse détaillée des caractéristiques mécaniques du sable de dune et du sable concassé, ainsi que du mortier. Des essais ont été réalisés au sein du laboratoire de génie civil (LMDC) de l'Université Tlemcen pour identifier les différents types de sable. Une série d'essais a été effectuée pour chaque type de sable afin de déterminer leurs propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression, la densité, la porosité, la granulométrie, etc. Ces résultats peuvent être utilisés pour déterminer la qualité du sable et son adéquation pour une utilisation spécifique dans le domaine du génie civil. L'analyse individuelle de chaque sable permettra également de comparer les propriétés mécaniques des deux types de sable et de déterminer leurs différences significatives. Enfin, cette étude contribuera à une meilleure compréhension des matériaux de construction utilisés couramment dans le domaine du génie civil.

2. Le sable

Pour cette recherche, nous avons exploité deux variétés de sable : le sable de dune de la wilaya d'Adrar, et le sable concassé de Sid Labedli, situé dans la wilaya de Tlemcen.

3. Le ciment

Pour cette étude, nous avons utilisé un ciment portland composé *CEMII/A42.5* conforme à la norme [NA442/2000], provenant de la cimenterie de BENI-SAF (Ain Temouchent).

La composition chimique détaillée du ciment est présentée dans le tableau ci-dessous:



Figure 3.1 : Ciment utilisé dans la confection du mortier normalisé. [55]

Tableau 3.1 : Composition chimique du ciment (en %)

ELEMENT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO Libre	Perteau feu
TENEUR	27.97	5.43	3.05	56.37	0.71	2,53	0.75	3.11

4. L'eau de gâchage

L'eau joue un rôle crucial dans le processus de construction, notamment dans l'utilisation du ciment, du béton et du mortier. Son importance réside dans son rôle d'hydratation du ciment, facilitant ainsi la mise en œuvre du béton ou du mortier tout en contribuant à leur maniabilité.

Les spécifications concernant les caractéristiques requises de l'eau utilisée dans la fabrication des mortiers sont détaillées dans **la norme NA-442**. Afin d'assurer une ouvrabilité optimale, il est préférable que les mortiers contiennent la quantité d'eau maximale compatible avec leur mise en œuvre tout en maintenant leurs performances.

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau du robinet.

5. Propriétés physiques du Ciment :

5.1. Masse volumique apparente du ciment :

La masse volumique apparente d'un matériau, conforme à la norme **NF EN 196-6**, est définie comme la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, incluant à la fois

les vides perméables et imperméables des particules, ainsi que les vides entre les particules. Cette norme établit des pratiques et des protocoles pour mesurer la masse volumique apparente de manière normalisée, garantissant des données cohérentes dans divers contextes d'application.



Figure 3.2 : Essais de mesure de la masse volumique apparente.

La masse volumique apparente est : Pour notre ciment :

$$Q_{vpp,c} = 1.006 \text{ g/cm}^3$$

5.2. Masse volumique absolue (Voluménomètre) :

La masse volumique absolue, conformément à la norme NF EN 196-6, est calculée en prenant le rapport entre la masse sèche de l'échantillon et le volume de sa matière, en excluant tous les vides. Ce calcul est effectué en utilisant un pycnomètre (voir Figure 35) pour obtenir la masse volumique absolue.

En appliquant le même principe à trois reprises :

- Peser le pycnomètre vide $M_0 = 88 \text{ g}$
- Peser le pycnomètre rempli de toluène jusqu'au trait de repère Soit $M_1 = 301,2$
- Peser un échantillon du corps étudié (50g du ciment). Soit $M_2 = 50$

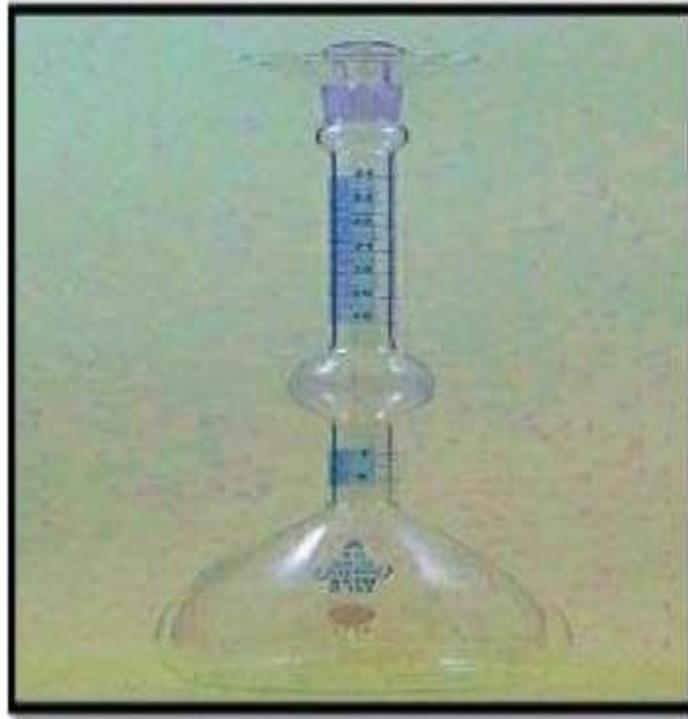


Figure 3.3 : Essais de mesure de la masse volumique absolue (Pycnomètre).

- Pour notre ciment : 3, 2010 g/l

5.3. Mesure de la finesse du ciment :

La finesse du ciment est évaluée par la mesure de sa surface massique, exprimée en cm^2/g , en fonction du temps nécessaire à une quantité d'air fixe pour traverser un lit de poudre compactée aux dimensions et porosités spécifiques. Cette mesure est souvent réalisée en utilisant la surface spécifique Blaine, exprimée en cm^2/g , qui offre une méthode plus pratique que la méthode BET. Cette procédure est conforme à la norme **NF P 15-442-EN-196-6**, homologuée en août 1990. Le temps nécessaire à l'air pour traverser le lit de ciment compacté est proportionnel à la surface massique du ciment. La détermination de la surface spécifique selon la méthode Blaine se déroule en trois étapes, impliquant le passage d'un volume d'air connu à travers la poudre de ciment. L'appareil utilisé pour cette mesure est un perméabilimètre Blaine composé d'une cellule contenant le ciment à tester, d'un manomètre en forme de U rempli d'huile légère, d'une grille, et d'un piston pour la compression du ciment selon un volume défini. La surface spécifique est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$S = \frac{k \cdot (\sqrt{e^a} \cdot \sqrt{t})}{(1-e) \sqrt{V}}$$

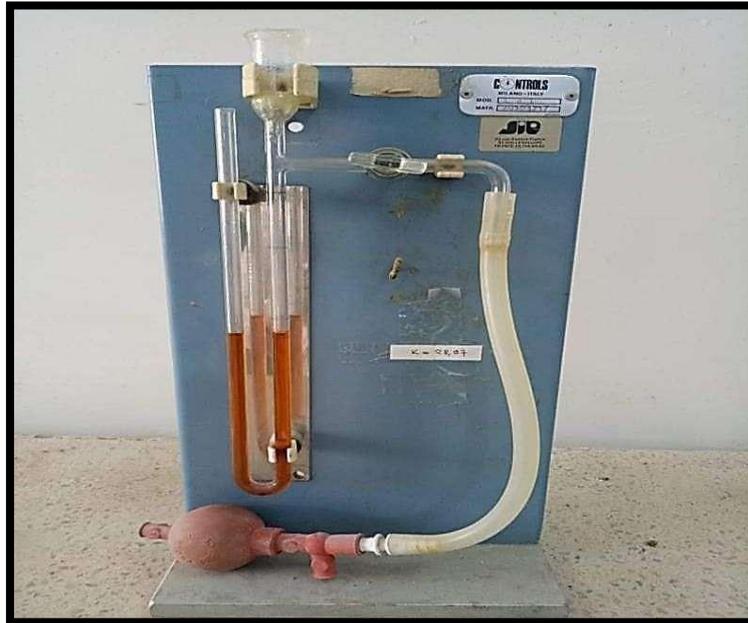


Figure 3.4 : Perméabilimètre Blaine.

$$S = \frac{28,97(\sqrt{0,5^3} \cdot \sqrt{44,55})}{3,2010 \cdot (1-0,5) \sqrt{0,01343}}$$

Pour notre ciment : $S = 3186,63 \text{ cm}^2/\text{g}$

5.4. Consistance du ciment :

L'essai de consistance, conformément à la norme **EN 196-3:2005**, vise à déterminer la quantité d'eau optimale requise pour mélanger un liant, de manière à obtenir une pâte de consistance normale. Cette pâte doit présenter une résistance spécifique à la pénétration d'une sonde normalisée. L'essai est réalisé pour préciser la quantité exacte d'eau qui doit être mélangée de manière homogène avec le liant, de sorte que la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de (6 ± 1) mm depuis le fond du moule. La norme EN 196-3:2005 établit des procédures précises pour effectuer cet essai de manière normalisée et cohérente.



Figure 3.5 : Appareil de Vicat manuel

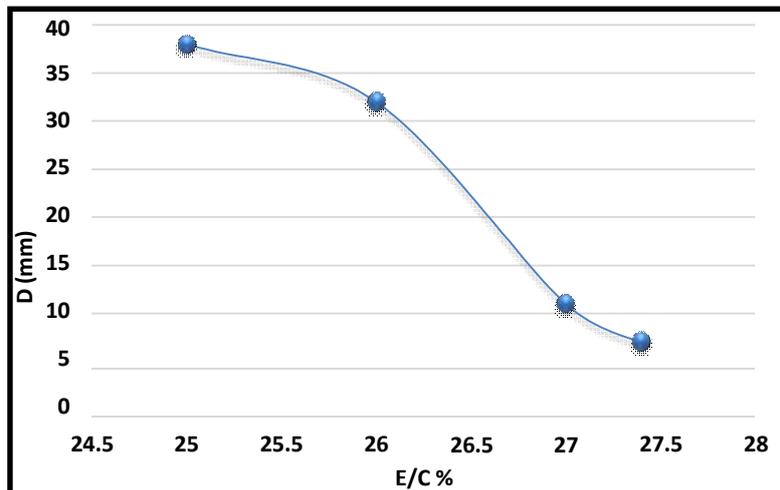


Figure 3.6 : Courbe de la consistance du ciment

Tableau 3.2 : L'essai de consistance.

E/C %	D mm
25	38
26	32
27	11
27,4	7

5.5. Essai de prise du ciment

Le test consiste à déterminer le début et la fin de la prise des pâtes de ciment pur étudiées conformément à la norme **EN 196-3**.

L'essai consiste à observer l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant soit l'appareil de Vicat manuel, soit l'appareil de Vicat automatique, tel qu'illustré dans la Figure ci-dessous.



Figure 3.7 : Début et fin de prise du ciment.

Tableau 3.3 : Début et fin de prise.

Début de prise (min)	165
Fin de prise (min)	275

Tableau 3.4 : Résumé des résultats des essais sur le ciment.

Les caractéristiques	Ciment CEM II/A 42.5
Surface spécifique Blaine (cm²/g)	3186,63
Masse volumique absolue (kg/m³)	3201
Masse volumique apparente (kg/m³)	1006
Début de prise (min)	165
Fin de prise (min)	275
Consistance (%)	27,4

6. Les Propriétés physique des sables

6.1. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique selon la norme (EN 933-2) est une méthode qui permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau.



Figure 3.8 : Essai d'analyse granulométrique.

Tableau 3.5 : Analyse granulométrique du sable concassé.

Tamis (mm)	Masse des refus en (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M)100$	Pourcentage destamisats cumulés $Pt=100-Pr$
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0,003	0,004	0,4	99,6
3,15	0,021	0,03	3	97
2,5	0,03	0,06	6	94
2	0,03	0,09	9	91
1,6	0,04	0,13	13	87
1,25	0,05	0,18	18	82
1	0,05	0,23	23	77
0,8	0,08	0,31	31	69
0,63	0,09	0,4	40	60
0,5	0,1	0,5	50	50
0,4	0,1	0,6	60	40

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

0,315	0,1	0,7	70	30
0,25	0,093	0,793	79,3	20,7
0,2	0,057	0,85	85	15
0,16	0,05	0,9	90	10
0,125	0,037	0,937	93,7	6,3
0,1	0,032	0,969	96,9	3,1
0,08	0,014	0,983	98,3	1,7
0,063	0,012	0,9915	99,15	0,45
Fond	0,0495	0,995	99,5	0,5

Tableau 3.6 : analyse granulométrique du sable de dune

	Masse des refus en (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés $Pr=(Mc/M)$ 100	Pourcentage destamisats cumulés $Pt=100-Pr$
6,3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3,15	0	0	0	100
2,5	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1,60	0	0	0	100
1,25	0	0	0	100
1	0	0	0	100
0,8	13,37	12,37	1,237	98,763
0,63	54,46	66,83	6,683	93,317
0,5	79,22	146,05	14,605	85,395
0,4	160,87	306,92	30,692	69,308
0,315	326,73	633,65	63,365	36,635
0,25	178,2	811,85	81,185	18,815
0,2	84,15	896	89,6	10,4
0,16	49,51	945,51	94,551	5,449
0,125	24,75	970,26	97,026	2,974
0,1	12,37	982,63	98,263	1,737
0,08	4,95	987,58	98,758	1,242
0,063	2,47	990,05	99,005	0,995
Fond	1,93	991,98	99,198	0,802

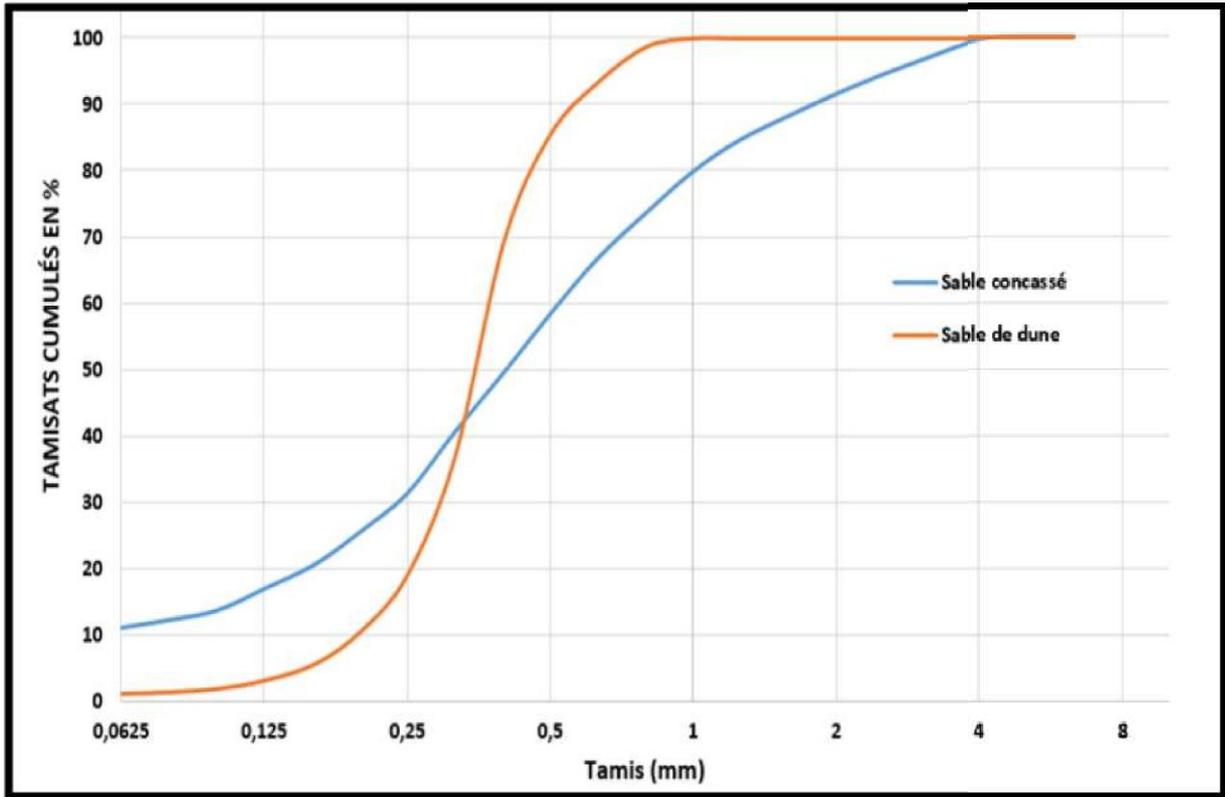


Figure 3.9 : analyse granulométrique des sables.

6.2. Module de finesse d'un sable

Le module de finesse est défini comme un coefficient utilisé pour évaluer l'importance des éléments fins dans un granulat, et correspond au résultat de la somme des refus cumulés sur les tamis exprimée en pourcentages, divisée par 100. [10] selon la norme NF EN 933-1.

Le Module de finesse d'un sable donne par la formule :

$$MF = \frac{\sum \text{Refus des tamis } 0,16 \text{ } 0,315 \text{ } 0,6 \text{ } 31,25 \text{ } 2,4 \text{ } 4}{100} \quad (3.1)$$

Tableau 3.7 : Module de finesse des deux sables.

Module de finesse	
Sable concassé	2,49
Sable de dune	2,33

6.3. Masse Volumique Apparente :

La norme **NFP 18-554** régit cet essai, qui consiste à déterminer la masse de l'unité devolume apparente d'un corp



Figure 3.10 : Essai de détermination de la masse volumique apparente des sables.

M sse Volumique Apparente (kg/m ³)	
Sable concassé	1527,3
Sable de dune	1528,6

Tableau 3.8 : La masse volumique apparente des Sables.

6.4. Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue, conforme à la norme [NFP 18-301], consiste à mesurer la masse d'une fraction granulaire, une information précieuse pour la préparation de béton. Ce paramètre permet spécifiquement de calculer la masse ou le volume des diverses classes granulaires nécessaires pour obtenir un béton aux caractéristiques spécifiques.

Les masses volumiques s'expriment en t/m³, en kg/m³, ou en g/cm³

$$\rho_{abs} = M/V_{abs} \quad (3.2)$$



Figure 3.11 : Essai de détermination de la masse volumique absolue des sables.

Masse Volumique Absolue (kg/m^3)	
Sable concassé	2849,1
Sable de dune	2760,9

Tableau 3.9 : Masse volumiques absolue des sables.

6.5. Equivalent de sable :

Cet essai est conçu pour évaluer la propreté du sable selon la norme NFP 18-598. On déduit l'équivalent de sable qui, par convention :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (3.3)$$

Avec :

- ES : équivalent de sable.
- h_1 : hauteur du sable propre et élément fins.
- h_2 : hauteur du sable propre seulement.



Figure 3.12 : Essai de détermination d'équivalent des sables.

ES (%)	Sable de dune	Sable concassé
ESV	96,28	88,26
ESP	92,99	87,31

Tableau 3.10 : d'équivalent des sables.

Nous avons observé cette caractéristique dans les deux types de sable, tant le sable concassé que le sable de dune, spécialement avec la variété ES 80 les sables présente une exceptionnelle propreté.

6.6. Foisonnement du sable



Figure 3.13 : Essai de foisonnement du sable et teneur en eau.

L'objectif est donc de déterminer le déficit en éléments fins lors de la préparation du mélange, afin de le compenser, étant donné que, en présence de faibles teneurs en eau, le volume d'un échantillon de particules fines pulvérulentes a tendance à augmenter.

Tableau 3.11 : Essai de foisonnement du sable et teneur en eau

Teneur en eau (ω %)	Masse vol App de SD en (kg/m^3)	Masse vol App de SC en (kg/m^3)
0	1,56	1,532
1	1,176	1,204
2	1,048	1,092
3	0,986	1,05
4	0,977	1,001
5	0,965	0,962
6	0,951	0,96
7	0,933	0,959
8	0,926	0,988
9	0,965	1,02
10	0,977	1,0825
12	1,046	1,1376
15	1,188	1,339
20	1,488	1,784

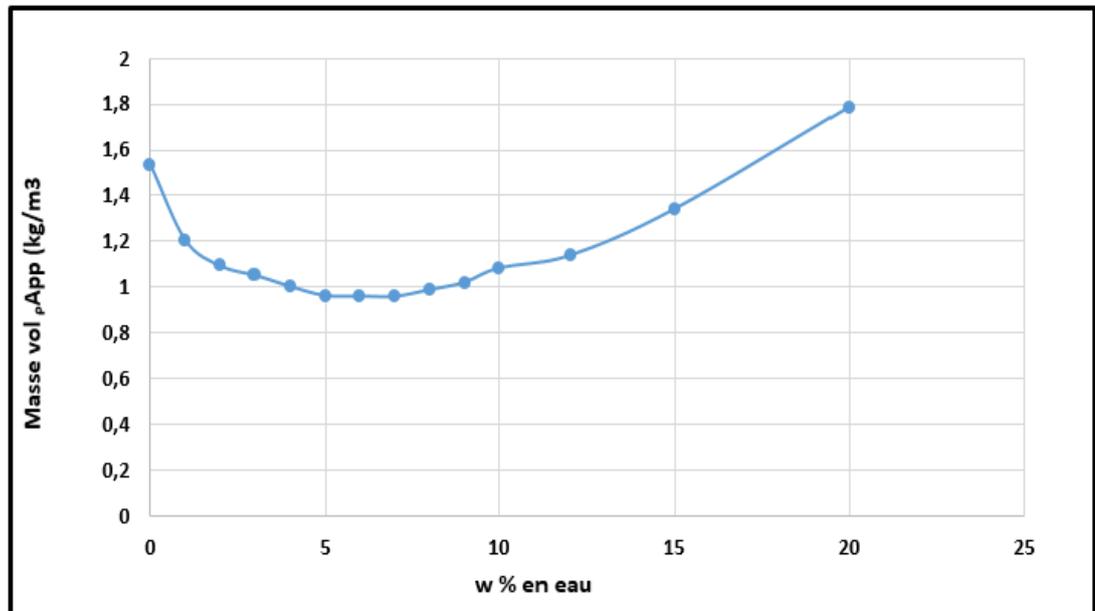


Figure 3.14 : Courbe de foisonnement du sable et teneur en eau. Sable de dune.

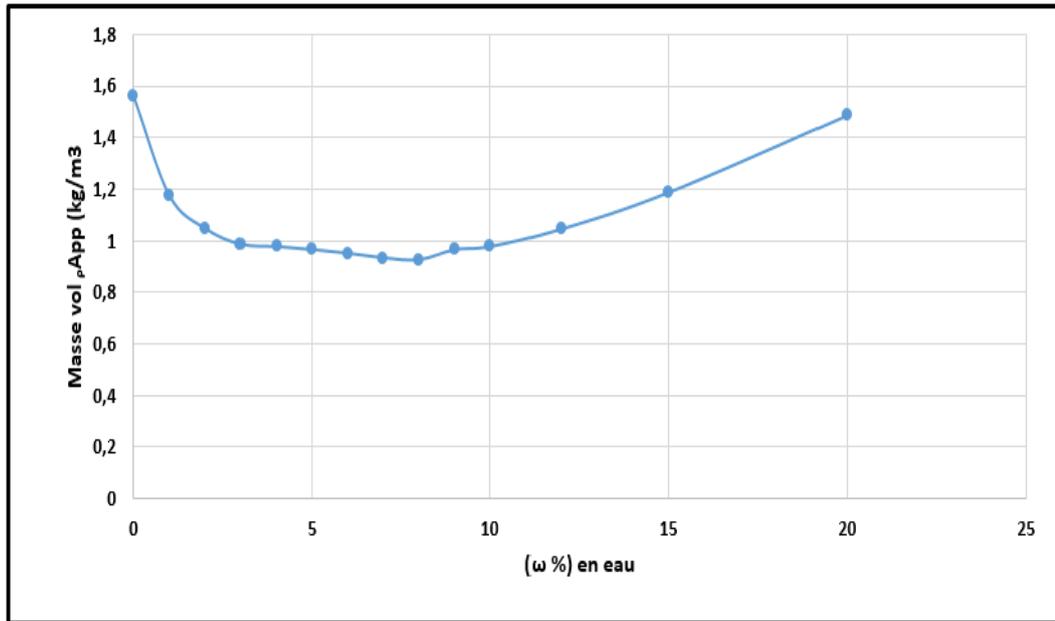


Figure 3.15 : Courbe de foisonnement du sable et teneur en eau. Sable concassé.

6.7. Absorption de sable :

Le coefficient d'absorption (A_b) selon la norme NF P 18-555 est défini en prenant le rapport entre l'augmentation de la masse de l'échantillon après son immersion dans l'eau pendant 24 heures à une température de 20 °C, et la masse sèche initiale de l'échantillon. La relation qui définit ce coefficient d'absorption est la suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_b}{M_b} \times 100 \quad (3.4)$$



Figure 3.16 : Essai d'absorption d'eau des sables.

Tableau 3.12 : Coefficients d'absorption des sables.

Coefficients d'absorption en (%)	
Sable concassé	1,61
Sable de dune	1,86

Tableau 3.13 : Résumé des résultats des essais sur les deux sables.

Caractéristiques physique	Sable concassé	Sable De dune
Masse Volumique apparente (kg/m^3)	1527,3	1528,6
Masse Volumique absolue (Méthode du ballon) (kg/m^3)	2849,1	2760,9
Equivalent du sable (%) piston	87,31	93,39
Equivalent du sable (%) Visuel	88,26	96,28
Module de finesse	2,49	2,33
Coefficient d'absorption(%)	1,66	1,61

7. Formulations des mortiers

7.1. Évaluation de la durabilité des mortiers à base d'additions minérales

L'étude se concentre sur la mesure de la capacité des mortiers à résister à des conditions environnementales hostiles, en l'occurrence une exposition à l'acide sulfurique.

3.7.1 Composition des échantillons de mortiers

Différents types de mortiers sont confectionnés pour l'étude. Ils sont composés de ciment Portland CEMII/42.5 de la marque Béni Sal (Algérie) et de différents types de sable (sable concassé, sable de dune) provenant de carrières de Tagema (Algérie). La composition varie en termes de proportions de ciment et de sable.

- **B0** : 100% sable concassé.
- **B1** : 60% sable concassé + 40% sable de dune.
- **B2** : 80% sable concassé + 20% sable de dune.
- **B3** : 80% sable de dune + 20% sable concassé.

- **B4** : 100% sable de dune.

Tableau 3.14 : Les différentes compositions des mortiers.

Mortier	Sable concassé		Sable de dune		CEMII (g)	Sables (g)	E/C /
	%	(g)	%	(g)			
B0	100	1350	0	0	450	1350	0,5
B1	60	810	40	540	450	1350	0,5
B2	80	1080	20	270	450	1350	0,5
B3	20	270	80	1080	450	1350	0,5
B4	0	0	100	1350	450	1350	0,5

7.2. Taux de l'eau de gâchage (E/C)

Le rapport eau/ciment (E/C) est maintenu constant à 0,5 pour tous les mélanges de mortier. Cela signifie que la quantité d'eau utilisée pour mélanger le ciment et le sable est égale à la moitié de la quantité de ciment.

L'objectif de cette étude semble être d'évaluer comment différentes compositions de mortiers contenant des additions minérales se comportent à une exposition à l'acide sulfurique. Les matériaux utilisés et les méthodes de test suivent des normes spécifiques pour garantir la validité et la reproductibilité des résultats.

Afin de caractériser la résistance à la fois chimique et mécanique face à l'attaque d'acide chlorhydrique, des spécimens prismatiques de mortier mesurant (40x40x160)mm³ ont été préparés conformément à la norme NF EN196.1. Après démoulage effectué à 24 heures.

8. Composition des mortiers

Les formulations des mortiers sont reportées dans le tableau 16 :

8.1. Le malaxage

L'évolution du matériau lors du processus de malaxage revêt une importance

cruciale. Le malaxage implique le mélange de divers composants du béton dans le but de créer un matériau uniforme et homogène.

Le mélange de nos mortiers a été effectué à l'aide d'un malaxeur de laboratoire pour mortier à axe vertical, composé d'une cuve équipée d'une palette centrale rotative à deux vitesses, lente et rapide, avec une capacité de 5 litres.



Figure 3.17 : Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier.

8.2. Préparations des éprouvettes et déroulement des essais

Les essais ont été conduits sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, avec trois éprouvettes par essai, certaines sans entailles. Dans tous les essais, le rapport E/C a été maintenu à [0.5] pour tous les mortiers conformément aux normes normalisées. La préparation des éprouvettes a été réalisée selon la norme NF P 18-400, tandis que le malaxage a été effectué avec un malaxeur pendant une durée totale de 3 minutes. Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'âge de l'essai (28 jours). À 28 jours, les tests de résistance mécanique des mortiers ont été exécutés selon les normes NF 15 403 et NF EN196-1.

8.3. Confection des éprouvettes

La préparation des éprouvettes est réalisée en conformité avec la norme [NF P 18-404, décembre 1981].

8.3.1. Préparation des solutions

On commence par calculer les volumes des solutions agressifs (H_2SO_4) nécessaires.

Bien sûr, voici les étapes pour la préparation de la solution H₂SO₄, avec C₁ = 97%, C₂ = 5%, et V₂ = 12 litres :

Étape 1 : Préparation de la solution cible

Énoncé des concentrations : C₁ (concentration de la solution mère) = 97%. C₂ (concentration cible) = 5%. Volume de la solution cible (V₂) = 12 litres.

Étape 2 : Calcul du volume de solution mère requis (V₁) Utilisez la formule de dilution :

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2. \quad (3.5)$$

- Réorganisez la formule pour résoudre V₁ : $V_1 = (C_2 * V_2) / C_1$.

Remplacez les valeurs connues dans la formule :

$$V_1 = (0,05 * 12L) / 0,97.$$

- Calculez V₁ : $V_1 = (0,05 * 12L) / 0,97 = 0,6186$ litres (soit environ 618,6 millilitres).

Étape 3 : Préparation de la solution

- Utilisez une éprouvette ou un autre récipient approprié.
- Mesurez avec précision le volume calculé de la solution mère (0,6186 litres ou environ 618,6 millilitres).
- Ajoutez ce volume de solution mère à un récipient approprié.
- Complétez le reste du volume avec de l'eau (pour atteindre un total de 12 litres) en utilisant un bécher ou un dispositif de mesure précis.

3.8 Procédure expérimentale

Pour procéder à la caractérisation de la résistance chimique, des échantillons prismatiques de mortier mesurant (160x40x40 mm³) ont été préparés, puis démoulés après une période de 24 heures. Suite au démoulage, les échantillons sont pesés pour obtenir la valeur M₁, puis ils sont immergés dans des solutions acides et saines, conformément à la norme *ASTM C267* 1–2, pour des durées de 7, 14, 21 et 28 jours. La résistance à l'attaque chimique est ensuite évaluée en fonction de la variation de masse (PM). Les résistances mécaniques à la compression doivent également être évaluées en suivant le schéma présenté dans l'organigramme de la Figure 3.18.

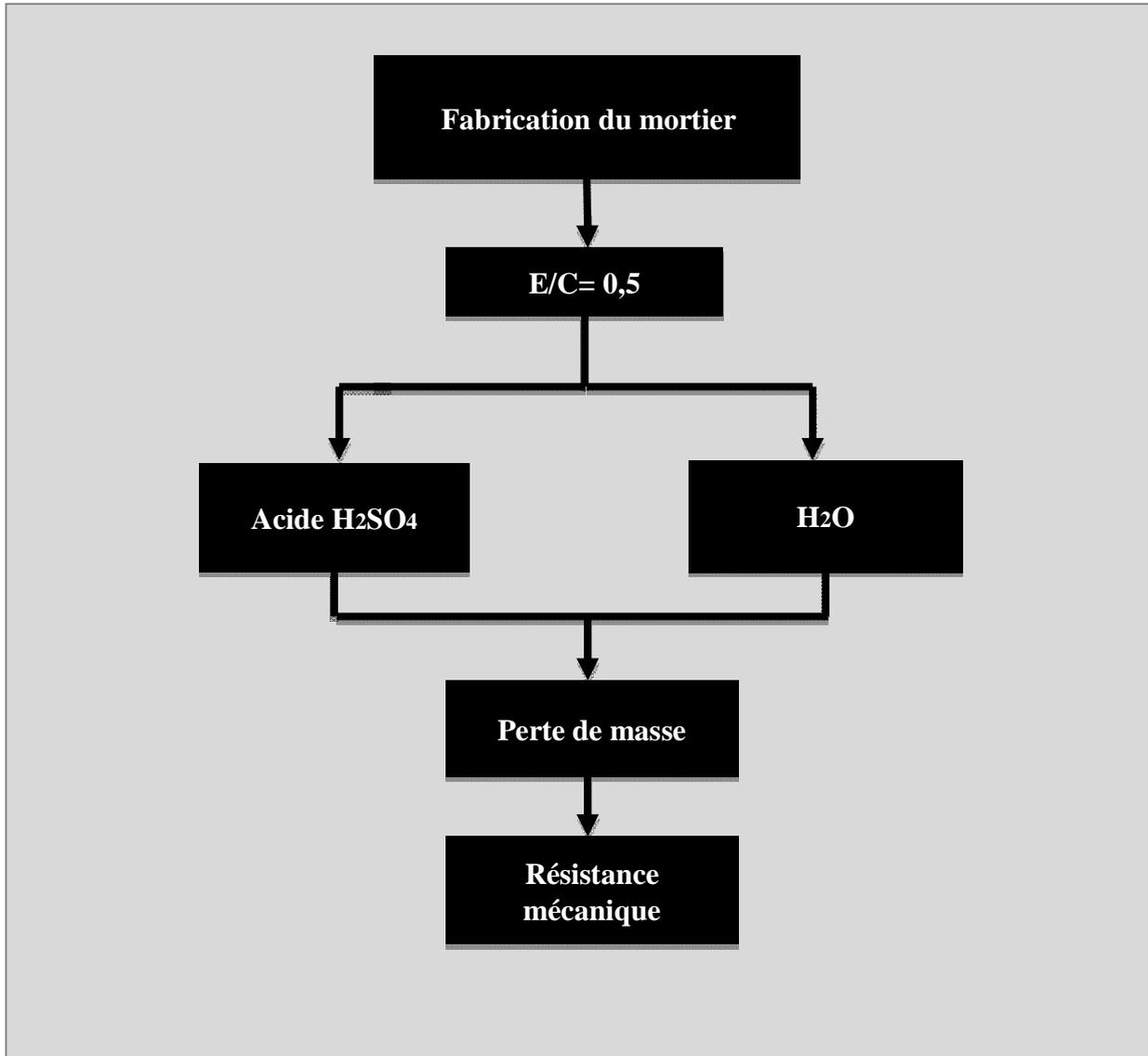


Figure 3.18 : Organigramme résumant le travail expérimental.

9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous entreprenons une caractérisation approfondie des matériaux utilisés, en nous focalisant sur leurs propriétés physiques et mécaniques. Les résultats obtenus à partir des essais réalisés démontrent une parfaite conformité aux prescriptions des normes en vigueur.

Le prochain chapitre se penchera spécifiquement sur les résultats et les discussions.

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

1. Introduction

Au seuil de ce chapitre final, nous atteignons le point culminant d'une étude dédiée à la durabilité exceptionnelle du mortier. Dans cette phase concluante de notre recherche, nous avons plongé dans les détails des éprouvettes de mortier durci, soumises à des conditions de test rigoureuses. En les exposant d'une part à une solution d' H_2SO_4 **reconnue pour sa nature agressive** et d'autre part à un environnement aqueux neutre, nous avons entrepris de comprendre les mécanismes fondamentaux qui façonnent la résistance et la robustesse de ces matériaux. Pendant une période cruciale s'étendant sur 7, 14, 21 et 28 jours, nous avons scrupuleusement mesuré les variations de compression et de flexion, ainsi que les pertes de masse, au travers de cinq formulations de mortier uniques.

Ces formulations ont été soigneusement élaborées pour embrasser une gamme diversifiée de compositions. Nous avons exploré cinq combinaisons de composants, allant de 100 % de sable concassé à des mélanges plus complexes comme 60 % de sable concassé et 40 % de sable de dune, ainsi que des proportions inverses et d'autres variantes subtiles. L'objectif était de démêler les liens complexes entre la composition du mortier, sa réaction à des conditions hostiles et ses propriétés mécaniques, tout en considérant les évolutions au fil du temps.

2. Résultats et discussions

2.1. Affaissement

Ce rapport se concentre sur les résultats d'une expérience de test d'affaissement d'éprouvettes de mortier. L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des proportions de sable concassé et de sable de dune, associées au ciment, sur la consistance des mélanges de mortier. Ces résultats fourniront des informations essentielles pour la formulation de mélanges de mortier adaptés à diverses applications de construction et de restauration

Tableau 4.1 : Affaissement des différentes formulations.

formulations	Affaissement en (cm)
B0	2,9
B1	2,4
B2	1,8
B3	1,9
B4	3

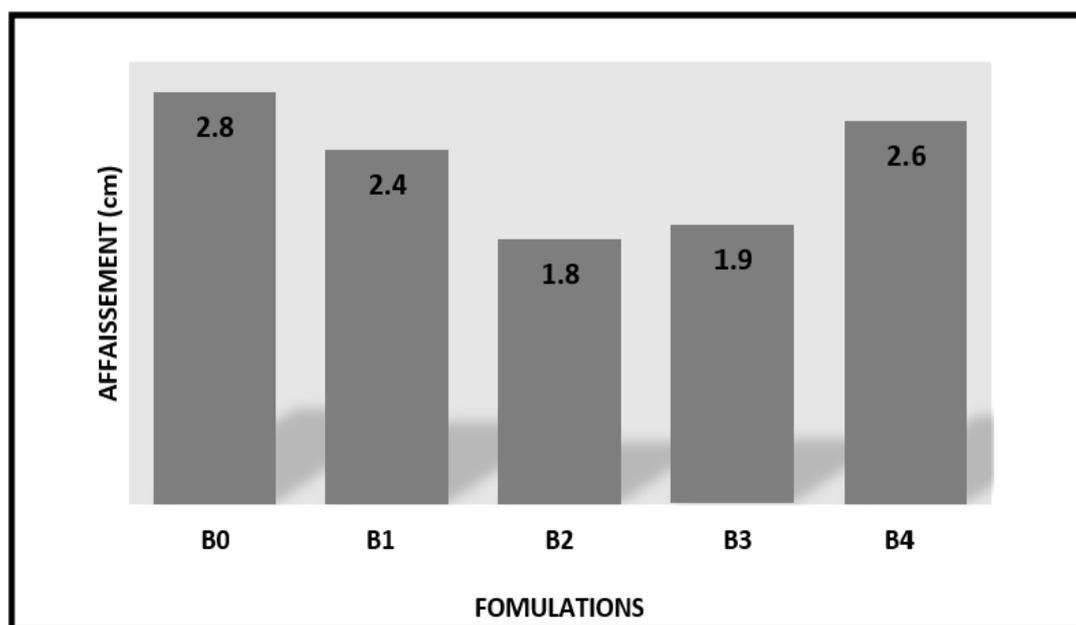


Figure 4.1 : Affaissement en fonctions des différentes formulations de mortiers.

Les résultats du test d'affaissement des éprouvettes de mortier révèlent des différences significatives dans la consistance des mélanges en fonction des proportions de sable concassé et de sable de dune. L'affaissement de 100% de sable concassé, mesuré à 2,9 cm, indique une consistance plus fluide, tandis que le mélange de 100% de sable de dune affiche un affaissement de 3 cm, révélant une consistance plus ferme.

Les mélanges intermédiaires, tels que celui composé de 80% de sable concassé et 20% de sable de dune avec un affaissement de 2,4 cm, présentent une consistance modérée, ce qui peut être adapté à des projets de maçonnerie nécessitant un équilibre entre fluidité et fermeté. Les mélanges avec des proportions de sable de dune plus élevées, comme le mélange de 60% de sable concassé et 40% de sable de dune avec un affaissement de 1,8 cm, montrent une consistance encore plus ferme.

Ces résultats mettent en évidence l'importance des proportions de sable concassé et de sable de dune dans la formulation de mélanges de mortier adaptés à des besoins spécifiques. Les valeurs d'affaissement fournissent des indications précieuses pour choisir le mélange de mortier le mieux adapté à un projet de construction donné, en fonction des exigences de fluidité, de fermeté et de maniabilité. Cette compréhension des propriétés des mélanges de mortier est essentielle pour optimiser l'efficacité des projets de construction et de restauration.

2.2. Perte de masse en solution acide

La perte de masse des échantillons a été mesurée suite à leur immersion dans une solution acide (H₂SO₄). Les échantillons, des éprouvettes prismatiques de mortier mesurant (160x40x40 mm), ont été confectionnés selon les procédures décrites précédemment. Après un démoulage effectué après 24 heures et la mesure initiale de la masse (M1), les échantillons ont été plongés dans la solution acide conformément à la norme ASTM C 267-12. Les périodes d'immersion ont été échelonnées sur des durées de 7, 14, 21 et 28 jours. La variation de masse, exprimée en termes de perte de masse en solution acide (H₂SO₄), a été évaluée en se basant sur les données recueillies (le tableau 18).

- La réaction de base est illustrée par la formule suivante (voir chapitre I).



Tableau 4.2 : Variation de la masse des échantillons immergés dans H₂SO₄, mesurée quotidiennement.

Mortier	7jours	14jours	21jours	28jours
B0	7,76	22,25	31,28	34,48
B1	8,12	23,88	35,28	38,13
B2	6,17	24,37	34,45	39,12
B3	10,29	26,42	45,94	50,31
B4	10,35	26,44	43,88	49,06



Figure 4.2 : Epreuve du mortier conservé en H₂SO₄

2.3. Interprétation des résultats

La Figure ci-dessous met en lumière les fluctuations de masse observées dans les échantillons de mortiers, constitués de différentes compositions (100 % de sable concassé, 80% de sable concassé + 20 % de sable de dune, 60 % de sable concassé + 40 % de sable de dune, 80 % de sable de dune + 20 % de sable concassé, 100 % de sable de dune), en relation avec la durée d'immersion dans une solution d'acide sulfurique H₂SO₄ (7 jours, 14 jours, 21 jours, 28 jours).

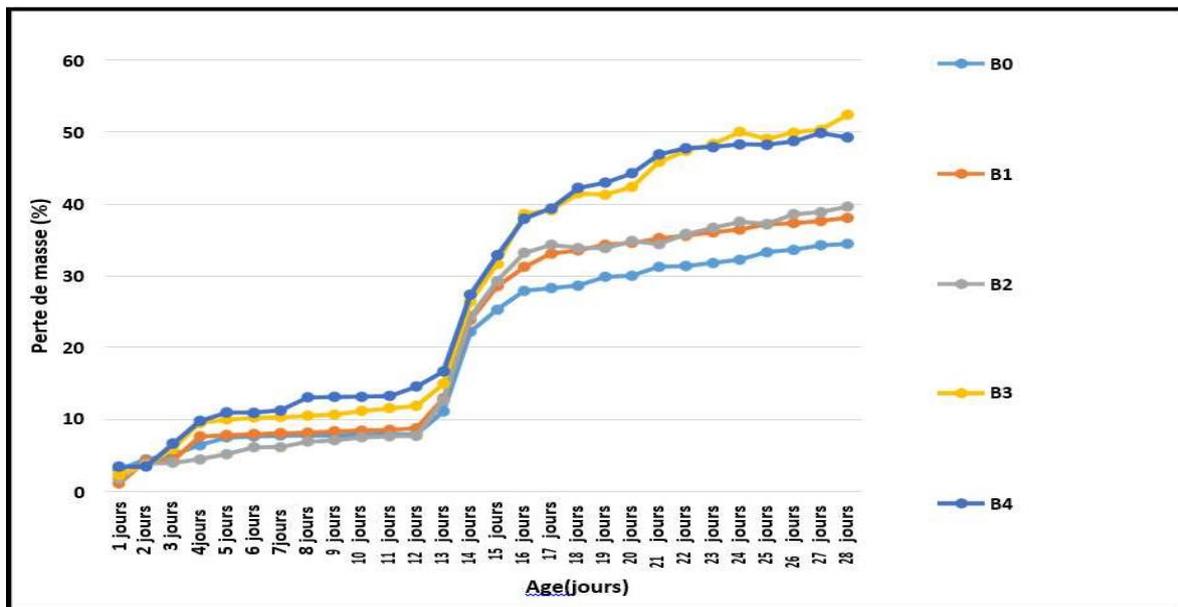


Figure 4.3 : Variation de la masse des échantillons de mortier immergés dans une solution d'H₂SO₄, mesurée quotidiennement.

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

Le graphique montre la mesure de la perte de masse quotidienne de cinq éprouvettes de mortier soumises à l'immersion dans de l'acide H_2SO_4 . Ces éprouvettes ont des formulations de mortier différentes, avec des proportions variables de sable concassé et de sable de dune (100% sable concassé, 80% sable de dune + 20% sable concassé, 80% sable concassé + 20% sable de dune, 60% sable concassé + 40% sable de dune, 100% sable de dune). Les cinq éprouvettes ont été maintenues dans l'acide pendant une période de 28 jours.

Une tendance générale d'augmentation des pertes de masse est observée chez toutes les éprouvettes, avec une augmentation initiale du premier jour au treizième jour, suivie d'une augmentation significative jusqu'au 28e jour. Cette augmentation suggère que la réaction chimique entre les composants du mortier et l'acide H_2SO_4 se poursuit pendant une période prolongée, conduisant à une dissolution progressive des constituants du mortier et à une perte de masse continue.

En ce qui concerne la résistance des différentes formulations d'éprouvettes, il est important de noter que les éprouvettes contenant une proportion plus élevée de sable de dune montrent des pertes de masse plus importantes à 28 jours. Par exemple, l'éprouvette contenant 100% de sable de dune présente la plus grande perte de masse (49,06%), suivie de près par celle contenant 80% de sable de dune + 20% de sable concassé (50,31%). En revanche, les éprouvettes contenant moins de sable de dune et plus de sable concassé montrent des pertes de masse moins importantes, comme l'éprouvette à 100% de sable concassé (34,48%) et celle avec 80% de sable concassé + 20% de sable de dune (38,56%) à 28 jours. Cela indique que le sable de dune est moins résistant à la réaction avec l'acide H_2SO_4 par rapport au sable concassé. Cette différence de réactivité peut être attribuée à des propriétés chimiques ou minérales spécifiques du sable de dune qui le rendent plus susceptible à la dissolution dans l'acide sulfurique.

De plus, il est notable que les éprouvettes qui ont été maintenues plus longtemps dans l'acide H_2SO_4 ont montré des pertes de masse plus importantes, ce qui suggère une réaction chimique prolongée. Cette observation est importante dans le contexte du génie civil et de la construction, car elle souligne la nécessité de prendre en compte la durabilité des matériaux de construction en présence d'acides agressifs.

En résumé, les résultats mettent en évidence la différence de réactivité entre le

sable de dune et le sable concassé envers l'acide H_2SO_4 , avec des implications potentielles pour le choix des matériaux de construction dans des environnements où des acides agressifs peuvent être présents.

2.4. Résistance mécanique

2.5. Résistance Mécaniques des éprouvettes immergées dans H_2SO_4

L'évaluation de la résistance mécanique des éprouvettes de mortier de dimensions 4x4x16 cm soumises à des essais de flexion et de compression en conditions d'immersion dans de l'acide H_2SO_4 .

2.5.1. Résistance à la compression :

Tableau 4.3 : Résistances à la compression des éprouvettes immergées dans H_2SO_4 .

Formulations	Résistance à la compression en (MPa)			
	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
B0	30,18	26,91	15,95	16,5
B1	26,25	27,81	17,06	8,36
B2	21,4	22	15,4	7,78
B3	16,21	14,43	10,46	5,56
B4	9,59	4,75	2,63	4,06

2.5.2. Résistance à la flexion

Tableau 4.4 : Résistances à la flexion des éprouvettes immergées dans H_2SO_4 .

Formulations	Résistance à la flexion en (MPa)			
	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
B0	3,88	4,88	5,44	5,83
B1	3,64	5,09	5,78	6,17
B2	4,06	5,14	5,14	4,43
B3	2,79	2,02	2,63	2,34
B4	1,48	2,23	1,53	1,39

2.5.3. Interprétation des résultats

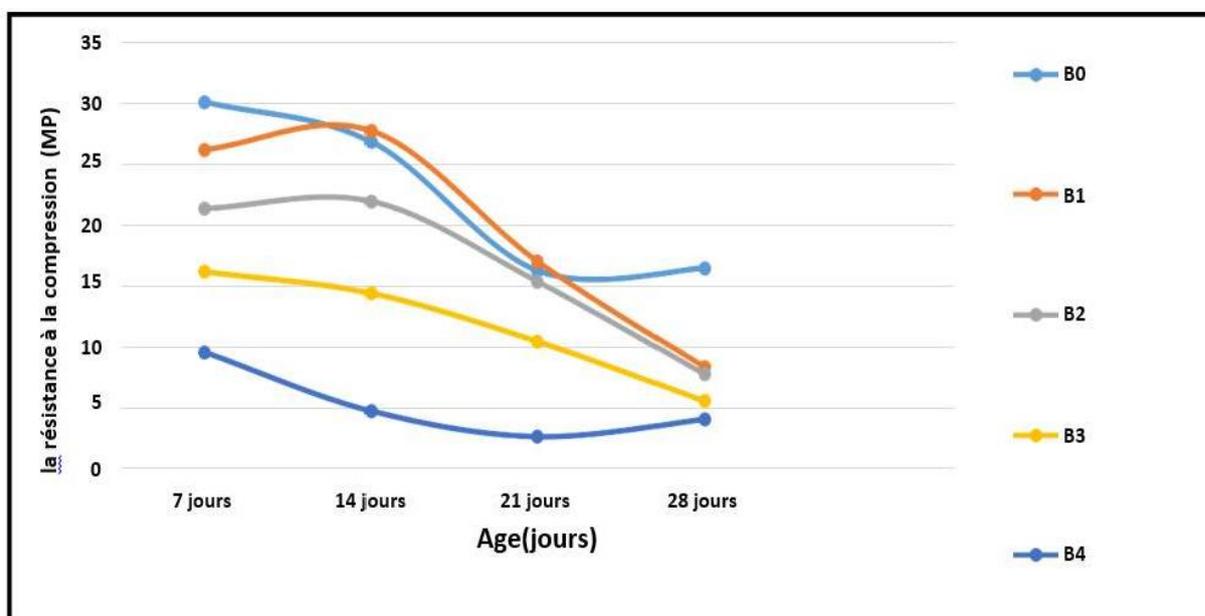


Figure 4.4 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers immergé dans H₂SO₄.

D'après les résultats obtenus, on a remarqué qu'à 7 jours toutes les formulations de mortier atteignent leurs valeurs maximales de résistance à la compression. Cela suggère que l'interaction initiale entre les composants du mortier et l'acide sulfurique peut renforcer le matériau à court terme. Cette augmentation initiale de résistance peut être due à une réaction chimique initiale ou à une hydratation rapide des composants.

Après 7 jours : Une diminution continue de la résistance à la compression est observée dans toutes les formulations jusqu'à 28 jours. Cela indique que l'acide sulfurique a un effet corrosif persistant sur le mortier, entraînant une détérioration progressive.

La formulation de mortier avec 100% SC présente la plus haute résistance à 28 jours (16,5 MPa), ce qui en fait la formulation la plus robuste face à l'acide sulfurique sur l'ensemble de la période d'étude.

La formulation avec 80% SC + 20% SD montre également une résistance à 28 jours (8,36 MPa) relativement élevée, bien qu'elle soit inférieure à celle du mortier à 100% SC.

Les formulations avec 60% SC + 40% SD et 80% SD + 20% SC ont des résistances à 28 jours de 7,78 MPa et 5,65 MPa, respectivement, montrant une résistance intermédiaire.

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

La résistance la plus faible est observée dans la formulation avec 100% SD à 28 jours (4,6 MPa), indiquant que le sable de dune pur est le moins résistant à l'acide sulfurique dans cette étude.

Les résultats montrent que la composition du mortier a un impact significatif sur sa résistance à l'acide sulfurique. Le sable concassé semble offrir une meilleure protection contre la corrosion que le sable de dune.

Cela peut être dû à la structure plus dense du sable concassé et à sa composition chimique, qui le rendent moins vulnérable à l'action corrosive de l'acide sulfurique.

La diminution continue de la résistance à la compression après 7 jours indique que l'acide sulfurique continue d'interagir avec les composants du mortier, provoquant une perte de résistance à long terme. Cela souligne l'importance de prendre en compte cette détérioration lors de la conception de structures destinées à être exposées à des environnements corrosifs similaires.

Ces résultats ont des implications pratiques pour la construction et la maintenance d'infrastructures dans des environnements corrosifs. Ils mettent en évidence la nécessité de choisir des matériaux résistants à l'acide sulfurique et de mettre en place des mesures de protection pour garantir la durabilité des structures exposées à de tels environnements.

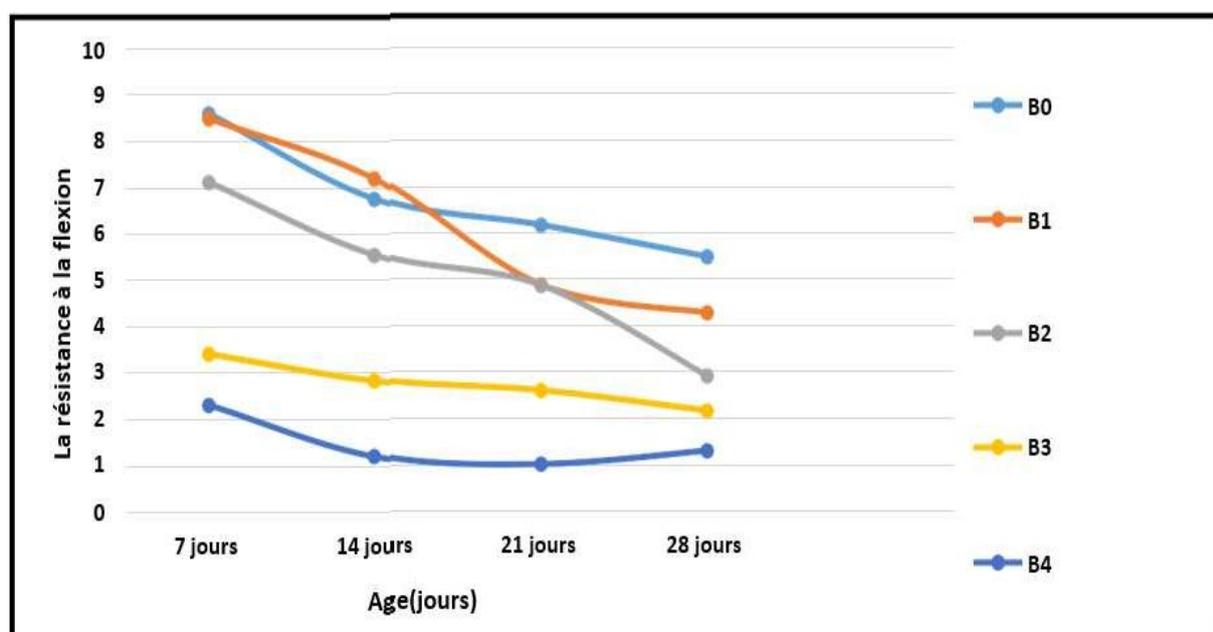


Figure 4.5 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers immergés dans H_2SO_4 .

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

À 7 jours on a observé que toutes les formulations de mortier atteignent leurs valeurs maximales de résistance à la flexion. Cette observation suggère qu'à court terme, il se produit une interaction initiale entre les composants du mortier et l'acide sulfurique, renforçant ainsi le matériau. Cette augmentation initiale de résistance peut être attribuée à une réaction chimique initiale ou à une hydratation rapide des composants.

Après 7 jours une diminution continue de la résistance à la flexion dans toutes les formulations jusqu'à 28 jours. Cette tendance suggère que l'acide sulfurique a un effet corrosif persistant sur le mortier, entraînant une détérioration progressive de sa capacité à résister à la flexion.

À 28 jours Toutes les éprouvettes atteignent la plus faible résistance à la flexion, ce qui signifie que l'acide sulfurique a un impact négatif sur la résistance à la flexion à long terme des mortiers étudiés. La formulation de mortier contenant 100% SC présente la plus haute résistance à la flexion à 28 jours (5,5 MPa), ce qui en fait la formulation la plus robuste face à l'acide sulfurique sur l'ensemble de la période d'étude.

La formulation avec 80% SC+20% SD montre également une résistance à la flexion à 28 jours (4,29 MPa) relativement élevée, bien qu'elle soit inférieure à celle du mortier à 100% SC.

Les formulations constituées de 60% SC+40% SD et de 80% SD+20% SC ont des résistances à la flexion à 28 jours de 2,93 MPa et 2,18 MPa, respectivement, montrant une résistance intermédiaire.

La résistance la plus faible est observée dans la formulation contenant 100% SD, avec seulement 1,32 MPa à 28 jours, indiquant que le sable de dune pur est le moins résistant à la flexion dans cette étude.

Les résultats indiquent que la composition du mortier a un impact significatif sur sa résistance à la flexion dans un environnement acide. Le sable concassé semble offrir une meilleure protection contre la corrosion que le sable de dune, ce qui est similaire à ce que vous avez observé pour la résistance à la compression.

La diminution continue de la résistance à la flexion après 7 jours suggère que l'acide sulfurique continue d'interagir avec les composants du mortier, provoquant une perte de résistance à long terme. Il est important de prendre en compte cette détérioration lors de la conception de structures destinées à être exposées à des

environnements corrosifs similaires.

Ces résultats ont des implications pratiques pour la construction et la maintenance d'infrastructures dans des environnements corrosifs. Ils soulignent la nécessité de choisir des matériaux résistants à l'acide sulfurique et de mettre en place des mesures de protection pour garantir la durabilité des structures exposées à de tels environnements, en particulier en ce qui concerne la résistance à la flexion.

2.6. Résistances Mécaniques des éprouvettes immergées dans l'eau

Évaluation de la résistance mécanique des éprouvettes de mortier de dimensions 4x4x16cm soumises à des essais de flexion et de compression en conditions d'immersion dans l'eau H₂O.

2.6.1. Résistance à la compression (H₂O)

Tableau 4.5 : Résistances à la compression des éprouvettes immergées dans l'eau.

Formulations	Résistance à la compression en (MPa)			
	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
B0	28,18	29,85	30,32	31,55
B1	25,91	29,67	30,4	32,67
B2	27,44	27,93	29,98	29,2
B3	19,4	16,28	17,36	17,04
B4	10,05	15,94	15,26	16,67

2.6.2. Résistance à la flexion (H₂O)

Tableau 4.6 : Résistances à la flexion des éprouvettes immergées dans l'eau.

Formulations	Résistance à la flexion en (MPa)			
	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
B0	3,88	4,88	5,44	5,83
B1	3,64	5,09	5,78	6,17
B2	4,06	5,14	5,14	4,43
B3	2,79	2,02	2,63	2,34
B4	1,48	2,23	1,53	1,39

2.6.3. Interprétation des résultats

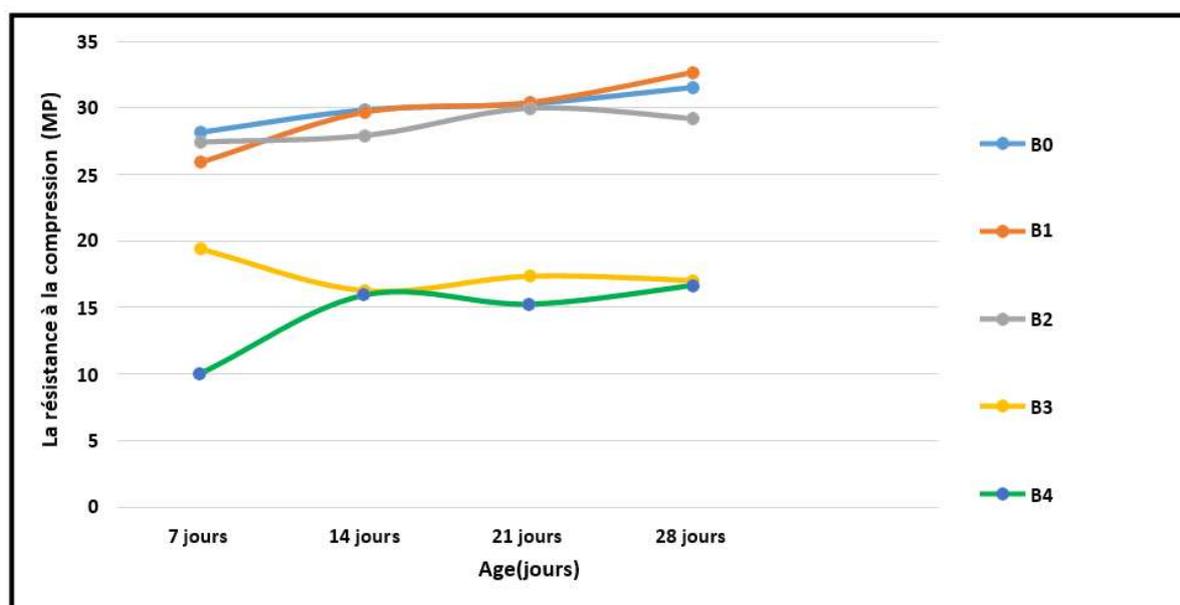


Figure 4.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers immergés dans l'eau.

À 7 jours on a noté que toutes les formulations de mortier affichent leurs valeurs les plus faibles de résistance à la compression dans l'eau. Cette observation suggère que l'eau a un effet initial négatif sur la résistance des mortiers à court terme, peut-être en compromettant la structure du matériau.

Après 7 jours on a remarqué une augmentation continue de la résistance à la compression dans les formulations 100% sable concassé et 80% sable concassé + 20% sable de dune jusqu'à 28 jours. Cette tendance suggère que ces formulations continuent de gagner en résistance à long terme lorsqu'elles sont immergées dans l'eau.

Après 14 jours jusqu'à 21 jours, on a remarqué un écartement progressif des courbes de résistance à la compression pour les trois dernières formulations (60% sable concassé + 40% sable de dune, 80% sable de dune + 20% sable concassé, 100% sable de dune) après 14 jours, ce qui indique que leur gain de résistance ralentit à partir de ce point. La formulation de mortier avec 80% de sable concassé + 20% de sable de dune présente la plus haute résistance à la compression à 28 jours (32,67 MPa), ce qui en fait la formulation la plus robuste dans cette étude lorsque les mortiers sont immergés dans l'eau.

La formulation avec 100% de sable concassé suit de près avec une résistance à la

compression de 31,55 MPa à 28 jours.

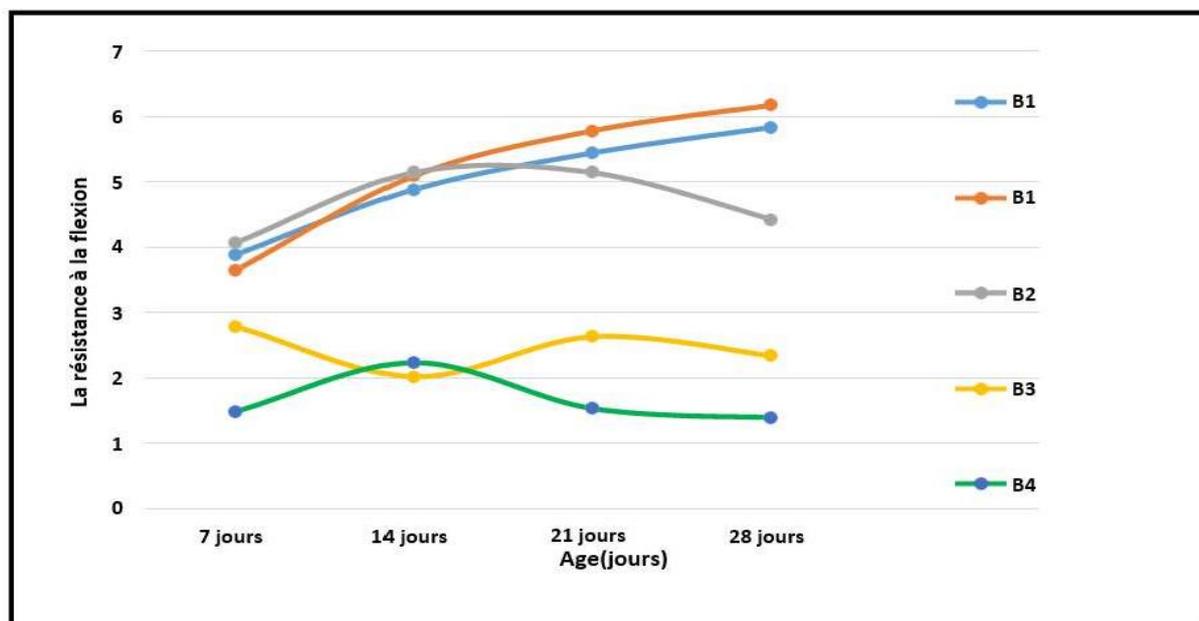


Figure 4.7 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers immergés dans l'eau.

De 7 à 28 jours on a remarqué une augmentation de la résistance à la flexion pour les trois premières formulations (100%SC, 80%SC+20%SD, 60%SC+40%SD) pendant toute la période de l'étude. Cette tendance suggère que ces formulations continuent de gagner en résistance à la flexion lorsqu'elles sont immergées dans l'eau.

Aussi entre 7 et 28 jours, en revanche, on a observé une diminution de la résistance à la flexion pour les deux dernières formulations (80% SD+20% SC, 100% SD) tout au long de la période de l'étude. Cette observation indique que ces formulations perdent de leur résistance à la flexion avec le temps.

La formulation de mortier avec 80%SC+20%SD présente la plus haute résistance à la flexion à 28 jours (6,17 MPa), ce qui en fait la formulation la plus robuste dans cette étude lorsque les mortiers sont immergés dans de l'eau.

La formulation avec 100%SC suit de près avec une résistance à la flexion de 5,83 MPa à 28 jours. La formulation constituée de 60%SC+40%SD présente une résistance de 4,43 MPa à 28 jours, montrant une résistance intermédiaire.

La résistance la plus faible est observée dans la formulation contenant 100%SD,

avec seulement 1,39 MPa à 28 jours.

Les résultats montrent clairement que la composition du mortier a un impact significatif sur sa résistance à la flexion dans un environnement d'eau. Les formulations à base de sable concassé semblent offrir une meilleure résistance que celles à base de sable de dune.

L'observation d'une augmentation de la résistance à la flexion pour les trois premières formulations indique que ces mélanges continuent de se renforcer lorsqu'ils sont exposés à l'eau sur une période de 28 jours. En revanche, la diminution constante de la résistance à la flexion pour les deux dernières formulations souligne que ces mélanges perdent de leur capacité à résister à la flexion lorsqu'ils sont immergés dans l'eau. Ces résultats ont des implications pratiques pour la sélection de matériaux de construction adaptés, en particulier dans des environnements humides. Ils soulignent l'importance de choisir des mélanges de mortier qui maintiennent ou améliorent leur résistance à la flexion lorsqu'ils sont en contact avec de l'eau, ce qui peut être crucial pour la durabilité des structures.

3. Conclusion

Dans cette étude, nous avons minutieusement exploré l'impact des proportions de sable concassé et de sable de dune sur diverses caractéristiques du mortier, tout en évaluant ses réactions dans différents environnements, notamment en immersion dans l'eau et en contact avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4). Les résultats obtenus sont d'une importance capitale pour orienter les choix de formulation du mortier en fonction des applications spécifiques.

Premièrement, en ce qui concerne l'affaissement du mortier, qui mesure sa consistance, nous avons constaté une tendance à la réduction de cet affaissement à mesure que la proportion de sable de dune augmente par rapport au sable concassé. Les mélanges composés majoritairement de sable de dune et de sable concassé deviennent ainsi plus compacts, ce qui traduit une consistance plus sèche. En revanche, les mélanges contenant une proportion plus élevée de sable de dune seul présentent un affaissement relativement important, indiquant une consistance plus fluide.

Lorsque les éprouvettes ont été exposées à l'acide sulfurique (H_2SO_4), les résultats

Chapitre 4 : Interprétation des résultats

sont divers. Les mélanges comportant une proportion plus élevée de sable de dune affichent des pertes de masse plus notables. Cette réactivité accrue peut être attribuée à la présence de fines particules dans le sable de dune, qui réagissent de manière plus rapide avec l'acide.

En ce qui concerne la résistance mécanique, deux scénarios distincts émergent. Dans les essais mécaniques des éprouvettes conservées dans l'acide H_2SO_4 , la meilleure résistance est observée dans les mélanges composés à 100% de sable concassé, que ce soit en compression ou en flexion. En revanche, les essais de compression des éprouvettes conservées dans l'eau ont révélé que la formulation de 80% de sable concassé et 20% de sable de dune était la plus résistante, tant en compression qu'en flexion.

En somme, ces résultats variés mettent en lumière l'importance cruciale de la formulation du mortier en fonction de l'application envisagée.

Par exemple, si la résistance mécanique est une priorité, il est recommandé d'opter pour un mélange à 100% de sable concassé, particulièrement dans des environnements potentiellement agressifs comme ceux impliquant de l'acide H_2SO_4 . En revanche, pour des applications où la maniabilité du mortier est essentielle, une proportion plus élevée de sable concassé peut s'avérer préférable. Cette étude fournit ainsi une base solide pour la sélection et l'adaptation des mélanges de mortier en fonction des besoins spécifiques de chaque projet de construction ou d'ingénierie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude approfondie sur l'Influence du sable de dune sur le comportement des mortiers a été menée dans le but de démystifier les relations complexes qui existent entre les caractéristiques des matériaux de construction, les environnements d'exposition, les propriétés mécaniques des mortiers, la durabilité et le mécanisme d'attaque des sulfates sur le mortier. Les résultats obtenus revêtent une importance capitale pour orienter les décisions de conception et de construction dans le domaine du génie civil. Examinons en détail ces résultats :

Impact du choix du sable sur les performances mécaniques des mortiers : Sous des conditions normales (H_2O), les mélanges à base de sable concassé ont démontré une résistance mécanique supérieure. Par exemple, la résistance à la compression atteint 32,55 MPa à 28 jours, tandis que la résistance à la flexion atteint 6,17 MPa pour un mélange composé de 80% de sable concassé et 20% de sable de dune. En contraste, les mélanges contenant une proportion plus élevée de sable de dune ont affiché une résistance mécanique réduite. Plus précisément, dans des conditions agressives exposées à H_2SO_4 , une résistance à la compression de 16,5 MPa et une résistance à la flexion de 5,5 MPa ont été enregistrées pour un mélange composé de 100% de sable concassé. Ces résultats suscitent des interrogations fondamentales sur les facteurs qui influencent la résistance mécanique des mortiers en fonction de la composition du sable.

Pour la réaction des mortiers aux environnements agressifs nous avons constaté que les mélanges comportant une proportion plus élevée de sable de dune sont davantage sensibles à l'attaque par les sulfates, entraînant des pertes de masse significativement plus élevées. Par exemple, les éprouvettes composées à 100% de sable de dune ont enregistré les pertes de masse les plus importantes dans un milieu contenant H_2SO_4 . Cette observation suscite des questions sur les mécanismes chimiques et physiques sous-jacents à cette sensibilité accrue, ainsi que sur les éventuelles méthodes pour atténuer ces effets néfastes.

Les résultats soulignent l'importance cruciale de prendre en compte attentivement le contexte environnemental dans lequel les mortiers seront utilisés. Il est impératif d'adapter les mélanges de mortier en fonction des exigences spécifiques du projet et de l'environnement prévu afin de garantir leur durabilité et leur résistance à long terme. Cette conclusion appelle à une réflexion approfondie sur les directives de conception adaptées aux différentes conditions environnementales et sur la mise en œuvre pratique

Conclusion générale

de ces recommandations. Les données quantitatives spécifiques obtenues, telles que le module de finesse du sable de dune à 2,33 et celui du sable concassé à 2,49, ainsi que l'équivalent de sable pour le sable de dune à 92,99 et pour le sable concassé à 87,31, nécessitent une analyse approfondie pour comprendre leur signification et leur utilité dans la prise de décision lors de la composition des mortiers. Cela soulève la question de la manière dont ces valeurs peuvent être intégrées dans les normes et les pratiques de l'industrie pour améliorer la qualité des structures construites.

En résumé, cette recherche fournit un aperçu précieux de l'interaction complexe entre les matériaux de construction et leur environnement. Elle constitue un guide essentiel pour les professionnels du génie civil et de la construction, l'aidant à prendre des décisions éclairées lors de la conception et de la construction de bâtiments et d'infrastructures. Ces connaissances revêtent une importance capitale pour relever les défis futurs de l'industrie de la construction, en améliorant la durabilité et la résilience de nos environnements construits.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Chihaoui R.**, "Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif", Mémoire de Magister- USTMB d'Oran, (2008).
- [2] **Boualleg S.**, "Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires", Mémoire de Magister- Université Mohamed Boudiaf de Msila, (2004).
- [3] **Janfeshan Araghi H., Nikbin I.M., Rahimi Reskati S., Rahmani E., Allahyari H.**, "An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack", *Construction and Building Materials* 77 (15) (2015) 461–47
- [4] **Kerbouche A.**, "Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers", Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-(2009).
- [5] **Idriss A.F., Negi S.C., Jofriet J.C., Hayward G.L.**, "Corrosion of steel reinforcement in mortar specimens exposed to hydrogen sulphide, part 1: impressed voltage and electrochemical potential tests", *Journal of Agricultural Engineering Research* 79 (2001) 223–230
- [6] **Kumar N.V.S.**, "Effet des solutions d'acide sulfurique et chlorhydrique sur le béton de poussière de roche concassée", *Materials Today: Proceedings* 46 (1) (2021) 509–513
- [7] **Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J.**, "Innovation in use and research on cementitious material". *Cement and Concrete Research* (2008)., 38(2), 128-136.
- [8] **Neville A. M.**, "Properties of Concrete." Edition Pearson, (2011). Californie, P.846.
- [9] **Olivier J. P.**, " Durabilité des bétons." Edition Presse de l'école nationale des ponts et chaussées . P.844
- [10] **Mindess, S., & Young, J. F.**, "Concrete". Prentice Hall. civil engineering and engineering mechanics series Spectrum Book, (1981). P.671
- [11] **Mamlouk, M.S., Zaniewski, J.P.** (2018). "Materials for Civil and Construction Engineers". Edition Pearson. P.637
- [12] **Ndzana A.G, Tchoumi S.**, "Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures", Mémoire d'études d'Enseignement Technique, Université de Douala, (2007).
- [13] **Grube H., Rechenberg W.**, "Durability of concrete structures in acidic water". *Cement and Concrete Research.*, vol. 19, n° 5, p 183-198
- [14] **Mcool, N.J.** "Acid Corrosion of Silos - An Overview." *Industrial and Engineering Chemistry*, (1958). 50(1). p 154-168
- [15] Site internet : "Fiches techniques : les constituants des bétons et mortiers" <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G10.pdf>; Cim Béton Consulté le 25 Mars 2023
- [16] Site internet : "Fumée de silice", <https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=Fum%C3%A9e+de+silice>, Consulté le 16 Mai 2023
- [17] **Nady G.M ; Ahmed Said A.**, " Mineral acid-activated sugarcane bagasse ash as solid acid catalyst for the liquid phase esterification of acetic acid with *n*-amyl, benzyl, and *n*-butyl alcohols", *Journal of Environmental chemical Engineering*, (2022), 10 (2),

Références bibliographiques

- [18] **Poyet S.**, "Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable". Thèse de Doctorat, Université de Montes La Vallées, (2003)
- [19] **Abdellaoui B.**, "Etude De La Durabilité Des Ciments Et Mortier Polymères Face Aux Milieux Agressifs", Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf de M'SILA – (2020).
- [20] **Andrade C., Alonso C.**, "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site", *Construction and Building Materials*, 10 (5), (1996), p 315-328
- [21] **Sanjayan, J. G., Nazari, A., & Shaikh, F. U. A.** "Performance of Alkali-Activated Slag Mortars Exposed to Sulfuric Acid Attack." *Cement and Concrete Composites*, (2009). 31(5), p 277-284.
- [22] **Adenot. F, Buil. M.**, "Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water", *Cement and Concrete Research* (1992). 22 (3), p 259-272.
- [23] **Carde C., François R.**; "Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials", *Cement and Concrete Research*, (1997). 27(4), p 971-978,
- [24] **Roziere E.**; "Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle", Thèse de Doctorat, l'Ecole Centrale de Nantes, (2007).
- [25] **Belkhiri H., Derragui A.**, " Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses", Mémoire de Fin d'Etudes, Université Ziane Achour de Djelfa, (2016).
- [26] **Belaid S., Bali A., Kitouni A., Debicki K., Menadi B.**, "Performance of dune sand concrete in hot desert climate," *Construction and Building Materials*, (2007), 21 (2), p 231-239.
- [27] **Ferhat M., Kriker A., Houari A., Hanini A.**, "Influence of Dune Sand on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Exposed to Sulfuric Acid Attack," *Journal of Materials in Civil Engineering*, (2013), 25 (8), p 1082-1091.
- [28] **Belhachemi B.**, "Etude d'un milieu agressif acide sur un mortier à base de ciment composée", *Communication science et technologie*, (2012), 1 (1), p 37-44 .
- [29] **Benchaa B.**, "Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes", XXX^{ème} Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, Proceeding (2012).
- [30] **Benabed B., Kadri E.E., Azzouz L., et Kenai S.**, " Properties of Self-Compacting Mortar Made with Various Types of Sand". *Cement and Concrete Composites*;(2012).34 (10), p 1167- 1173.
- [31] **Benabed B., Azzouz L., Kadri E.H., Kenai S., et Belaidi A.S.**; « Effect of Fine Aggregate Replacement with Desert Dune Sand on Fresh Properties and Strength of Self-Compacting Mortars ». *Journal of Adhesion Science and Technology*; (2014). 28 (21): 2182-2195.
- [32] **Jing C., Zhou X., Tao G., et Da Chen.** "Experimental Study on the Performance and Microstructure of Cementitious Materials Made with Dune Sand". *Advances in Materials Science and Engineering*. (2016), p 1-8
- [33] **Kachouh N., El-Hassan H., El-Maaddawy T.**, "Influence of Steel Fibers on the Flexural Performance of Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregates and

Références bibliographiques

- Dune Sand", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, (2021), 10 (3), p 165–92.
- [34] **Mani M.**, "Experimental Characterization of a New Sustainable Sand Concrete in an Aggressive Environment", *Frattura Ed Integrità Strutturale*, (2020), 15.55, p 50–64.
- [35] **Nasa.** (2002). "Satellite Image of the Sahara Desert, Algeria." [Image Satellite du Sahara, Algérie]. NASA Earth Observatory. [Lien vers l'image : <https://earthobservatory.nasa.gov/images/4456/sahara-desert-algeria>]
- [36] **Guermi L.**, "Contribution à l'amélioration certaines caractéristiques du béton de structure a base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques", *Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla*, (2013).
- [37] **Azzouz H.**, "Etude des bétons à base des sables de dune", *Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider, Biskra*, (2009).
- [38] **Givi A.N., Alengaram U. J.** "Effect of elevated temperature on the properties of mortar containing natural sand and granulated blast furnace slag"; *Construction and Building Materials*, (2015). 77 (3), p 174-181.
- [39] **Oyelaran O.A., Nebeife R.**, "Exploration and Exploitation of Silica Sand in the Central Northern Nigeria"; *International Journal of Engineering Research and Applications*, (2019). 9(7), p 52-59.
- [40] **Bear J., Verruijt A.**, "Modeling Groundwater Flow and Pollution." Partie du livre "Theory and Applications of Transport in Porous Media" book series (TATP, Volume (2), Springer (1987). P 153-159
- [41] **Balhachemi S., Berrafa F.**, "La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique", *Mémoire de Magister en Génie Civil, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain T'émouchent* (2017).
- [42] **Martinez M. L., Psuty N.P.**, "Coastal Dunes: Ecology and Conservation." *Ecological Studies*, Springer (2004). Volume 171.
- [43] Site Internet, "Différents types de sable de dune" https://www.google.com/search?q=different+type+de+sable+de+dune&sxsrf=ALeKk019%20WBfBWlUf_iw6hUlp94A9u7kD2g:1600395976392&source=lnms&tbn=isch&sa=X%20&ved=2ahUKEwjluLDN0_HrAhXHx4UKHb0tB, consulté le : 13 Mars 2023
- [44] Site Internet, "lignes de transformation de ciment", <https://www.khalesindustrie.com/nos-articles/ligne-de-transformation-de-ciment-colle>, consulté le: 20 Mai 2023
- [45] **Chauvin J.J.** "Les sables", *Guide technique d'utilisation routière. ISTED*, 76 p. France, (1987).
- [46] **Keddam L.;** " Caractérisation expérimentale des mortiers à base de poudre de marbre" *Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou*, (2017).
- [47] Site Internet : "Caractérisation d'un mortier à base de sable", https://www.google.com/search?q=Exemple+d%20E%20%99un+mortier&sxsrf=1600396533395&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiLpP3W1fHrAhXtDmMBHTAfBwEQ_AUoAXoEC_AwQA&biw=1024&bih=657, consulté le : 15 Avril 2023
- [48] **Komar A.**, " Matériaux et éléments de construction ", *Editions MIR. Moscou*, (1978), p 539.

Références bibliographiques

- [49] **Belhocine A., Nagoudi N.**, "Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux". Mémoire de Master en Génie civil, Université Kasdi Merbah Ourgla, (2014).
- [50] **Barbieri L., Carloni, C., Guattari C.**, "Lime-Based Plasters with Cement: An Innovative Strategy for Sustainable Restoration of Historical Buildings." Sustainability, (2017). 9(12), 2307-2315.
- [51] **Schacht, C. A.** "Refractories Handbook." (2004). CRC Press. P 520.
- [52] **USG Corporation.** "Gypsum Construction Handbook." 7th Edition, (2009). Wiley.
- [53] **Vásquez V., Gagliardo J. D., Carlucci, S.** "Thermal Insulation Systems in Building Construction: A Comparative Life Cycle Assessment between Expanded Polystyrene and Rock Wool Insulation." Energy and Buildings, (2016). 126, p 432-442.
- [54] **Beall, C.** (2009). "The Art of the Stonemason" Firefly Books. P 654
- [55] Site Internet : "[société des ciments de benisaf \(scibs.dz\)](https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=soci%C3%A9t%C3%A9+des+ciments+de+benisaf+%28scibs.dz%29)", <https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=soci%C3%A9t%C3%A9+des+ciments+de+benisaf+%28scibs.dz%29>, consulté le : 26 Mai 2023.