

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

المركز الجامعي لعين تموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent

Institut de Technologie

Département de genie civil



Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : Travaux publics

Thème

La valorisation de sable de dune (sable de Naama)

Durabilité et comportement mécanique

Présenté par :

- 1) Balhachemi Sarra
- 2) Berrafa Fatouma Imane

Devant le Jury composé de :

Mr	MCA (Ain Temouchent)	président
Mr	MCB (Ain Temouchent)	encadreur
Mme	MAA (Ain Temouchent)	examineur
Mme	MAB (Ain Temouchent)	examineur

Année universitaire 2016/2017

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier grandement ALLAH le plus puissant qui nous aide et nous donne le courage et la volonté pour terminer ce travail.

Je tiens également à remercier vivement mon encadreur Mme DERBAL Ahlem pour sa grande disponibilité et pour son engagement et ses précieux conseils pour leur soutien ainsi que pour la pertinence de ses remarques dans la construction de ce travail de recherche.

Nos remerciement s'adressent à tous nos enseignants durant les années des études

Ensuite, je joins ces remerciements aux membres les jurés d'avoir accepté d'examiner jugé
ce travail

Je voudrais remercier aussi l'équipe de laboratoire MDC de centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent et l'équipe de l'unité de LTPO qui ont accepté de me faire partager leur expérience pour ce travail.

Enfin nous tenons à remercier nos familles pour leur encouragement et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à nos recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Merci

Dédicace

✚ Du profond de mon cœur je dédie ce mémoire à tous qui me sont chers :

A la plus belle créature que Dieu a créée sur terre ma mère qui a œuvré pour ma réussite, la lanterne qui éclaire mon chemin par son amour, son soutien et ses précieux conseils pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon père décédé trop tôt qui ma toujours poussée et motivée merci papa que dieu le tout puissant l'accueille en son vaste paradis inchaallahe.

A ma grand mère et mes frères: Med Nadir, Maroua

A mon mari qui a toujours était à mes cotés

A ma belle famille Bengoudifa : mes beaux parents, ilyes, Khadija, Nabila, djana

A ma binôme : Berrafa Fatouma Imene

A tous nos enseignants durant les années des études

A tous les étudiants de la promotion 2016/2017 spécialité génie civil

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer cette mémoire.

Sommaire

Remerciement

Introduction générale	2
-----------------------------	---

Partie bibliographique

Chapitre 1 : généralité sur le béton

1. Introduction.....	5
2. Historique de béton.....	5
3. Définition du Béton.....	6
3.1. Différents types de béton.....	7
a .Le béton prêt à l'emploi	7
b.Le béton armé	8
c.Le béton fibré	8
d .Le béton précontraint	9
e.Le béton Hautes Performances.....	10
f.Le béton projeté.....	10
g.Le béton auto compactant, auto plaçant et auto nivelant.....	11
h.le béton caverneux, drainant et poreux (les bétons légers)	12
i.Le béton de ciment blanc.....	12
j.Le béton bitumineux.....	13
3.2. Classification des bétons.....	14
4. Constituant de béton	14
4.1. Le ciment	15
4.2. Les granulats.....	16

4.2.1-Les type de granulats	16
4.2.2. Les classes de granulats.....	17
4.2.3. La Nature des granulats.....	18
4.2.4. Les familles des granulats.....	18
4.3. L'eau de gâchage.....	19
4.4. Adjuvants.....	19
4.4.1. Définition.....	19
4.4.2. Les principaux adjuvants.....	19
4.5. Additions minérales.....	20
5. Les propriétés de béton.....	20
5.1. Les propriétés du béton frais	20
5.2.Les propriété du béton durci	21
5.3. Les propriétés mécaniques.....	21
5.3.1. Résistance à la compression.....	21
5.3.2. Résistance à la traction.....	23
5.3.3. Coefficient de dilatation.....	23
5.3.4. Les propriétés rhéologiques.....	24
5.4 : Les propriétés physiques.....	24
5.4.1. Poids volumique.....	24
5.4.2. La perméabilité.....	24
5.4.3. Tenue au feu.....	24
5.4.4. Durabilité.....	25
5.5. Propriétés thermiques du béton.....	25
5.6. Les propriété acoustique.....	25

Conclusion.....	25
-----------------	----

Chapitre 2 : la durabilité de béton

1. Introduction.....	27
2. Béton durable et béton résistant	27
3. Les essais de durabilité sont de deux types	28
4. Le gel	29
4.1. Les dégradations occasionnées par le gel.....	29
5. Dégradation par la corrosion des armatures.....	30
5.1. Effets de la corrosion.....	30
5.2. Origines principales de la corrosion.....	31
5.2.1 .La carbonatation.....	31
5.2.1.1. Réaction de carbonatation.....	31
5.2.2. La pénétration des chlorures.....	32
5.2.2.1. Mécanisme de pénétration des chlorure.....	33
6. Les attaques chimiques du béton.....	35
6.1. Les attaques sulfuriques.....	35
6.1.1. Définition.....	35
6.1.2 .Attaque par les sulfates.....	36
6.2. Attaque par les acides.....	37
6.2.1. Acide fort et acide faible.....	38
6.3. Attaque l'eau de mer.....	39
Conclusion.....	39

Chapitre 3 : valorisation de sable de dune

1. Introduction.....	41
2. Définition de sable.....	44
3. Les classe de sables.....	45
4. Caractéristiques physicochimique.....	45
5.Écologie des milieux sableux.....	47
6. les familles de sables.....	47
7. Les sables de dunes.....	49
7.1. Définition.....	49
7.2. Qu'est ce qu'une dune ?.....	49
7.3. Intérêt de sable de dune.....	50
7.3.1. Les aspects économiques.....	50
7.3.2 Les aspects techniques.....	50
7.4. Type de dune	51
7. 5.Les formes de sable de dune.....	52
7.6 .Les différents milieux de la dune	52
7.7. La dune littorale.....	56
7.7.1 : Le mouvement de dune littorale.....	57
7.7.2. La formation des dunes littorales.....	57
7.8. : Mécanismes de formation.....	58
7.9 : Physique des dunes	58
7.10 .Propriétés.....	60
7.11. Utilisation du sable de dunes.....	60

7.11.1 : Diverses utilisations.....	60
7.11.2 .Utilisation du sable de dunes dans le béton	61
7.11.3 : Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier.....	61
Conclusion.....	61

Partie 2 : partie expérimentale

Chapitre 4 : matériaux utilisé et méthode d’essais

1. Introduction	63
2. Caractéristique des matériaux utilisés.....	63
3. Sable.....	63
3.1.1 Les essais utilisés dans le sable de dune	65
a. Analyse chimique	65
b.Détermination de bleu méthylène ou (la tache)	65
c. Analyse granulométrique sable de dune « SD1 ».....	66
d. Equivalent de sable	69
e. La masse volumique apparente et absolue	71
f. Teneur en eau	73
g. Foisonnement de sable	74
h. Matière organique norme XP P 94-047.....	76
3.2 Sable de carrière << SD2>>.....	78
3.2.1 Les essais utilisés dans le sable de carrières.....	78
a. Analyse granulométrique.....	78
b. Analyse physiques	79
3.3 Le sable corrigé.....	80

a. Analyse granulométrie	80
b. Analyse physiques	81
4. Ciment	82
5. L'eau de gâchage	83
6. Formulation des mortiers	83
7. Les Milieux agressifs.....	85
7.1. Préparation des attaques chimiques	85
7.1.1. L'acide sulfurique (H ₂ SO ₄).....	85
7.1.2. L'acide chlorhydrique (HCl)	85
7.1.3. L'eau de mer	86
8 .Essai sur les mortiers	87
8.1 Essai de la perte de masse	87
8.2 Essai de résistance à la flexion	87
8.3 Résistance a la compression.....	89
Conclusion	89

Chapitre5 : Résultats des essais et interprétations

5.1 Introduction	91
5.2 Perte de masse	91
5.2.1 Perte de masse des éprouvettes de référence conservée dans l'eau	91
5.2.2 Perte de masse des éprouvettes conservées en HCl.....	92
5.2.3 Perte de masse des éprouvettes conservées en H ₂ SO ₄	94
5.2.5 Perte de masse des éprouvettes conservées à l'eau de mer.....	96
5.3 Les résultats de PH dans les milieux agressifs.....	98
5.4 Résultats des essais de traction par flexion et des essais de compression.....	98

5.4.1 Eprouvettes de référence.....	98
5.4.2 Eprouvettes conservées en HCl.....	100
5.4.3 Eprouvettes conservées en H ₂ SO ₄	101
5.4.5 Eprouvettes conservées à l'eau de mer.....	103
Conclusion	104
Conclusion générale.....	106

Liste des figures

Figure 1.1: Le béton prêt à l'emploi

Figure 1.2 : le béton armé

Figure 1.3 : le béton fibré

Figure 1.4 : le béton précontraint

Figure 1.5 : Le béton Hautes Performances

Figure 1.6 : le béton projeté

Figure 1.7 : le béton auto plaçant

Figure 1.8 : le Béton léger

Figure 1.9 : Le béton de ciment blanc

Figure 1.10 : Le béton bitumineux

Figure 1.11 : les composants de béton

Figure 1.12 : les constituants de ciment

Figure 1.13 : les classes des granulats

Figure 1.14 : effet de compression sur le béton simple

Figure 1.15 : résistance de béton à la compression et la flexion à 28 jours

Figure 1.16 : effet de traction sur le béton simple

Figure 2.1 : le sable

Figure 2.2 : Sable de Largeur de champ = 5,5 mm et 0,50 et 1.0 mm

Figure 2.3 : le sable roulé siliceux

Figure 2.4 : les sables de concassages calcaire.

Figure 2.5 : le sable de dune

Figure 2.6 : la dune de Sahara algérienne.

Figure 2.7 : Les formes de dunes.

Figure 2.8 : coupe transversale des différents milieux de la dune

Figure 2.9 : Dune verte

Figure 2.10 : la dune blanche ou jaune

Figure 2.11 : la dune grise

Figure 2.12 : la dune noire

Figure 2.13 : la dune brune

Figure 2.14 : Dune baltique

Figure 2.15 : mouvement des dunes.

Figure 2.16 : La formation dunaire

Figure 2.17 : La barkhane (Sud-Marocain)

Figure 2.18 : la morphologie de la barkhane.

Figure 3.1 : la durabilité de la structure.

Figure 3.2 : le mécanisme de dégradation par le gel.

Figure 3.3 : réaction de la carbonatation.

Figure 3.4: corrosion des armatures.

Figure 3.5: La pénétration des Cl⁻

Figure 3.6: La pénétration des chlorures

Figure 3.7: dégradation due au sulfate.

Figure 3.8 : dégradation due aux acides.

Figure 4.1 : Sable de dunes de NAAMA

Figure 4.2 : Sable de carrière SACOA

Figure 4 .3: carte d'Algérie (wilaya de NAAMA)

Figure 4 .4 : Analyse de bleu méthylène du sable de dune

Figure 4 .5 : résultat de bleu méthylène de sable de dune.

Figure 4 .6 : vibreur de tamis

Figure 4 .7 : tamis en mm

Figure 4. 8: Granulométrie par tamisage de sable de dune « SD1 »

Figure 4 .9: Résultat d'équivalent de sable

Figure 4 .10: Les matériaux de la masse volumique apparente

Figure 4.11 : les échantillons avant l'étuve

Figure 4.12 : Étuve du laboratoire de MDC du C.U.A.T

Figure 4.13: les échantillons après l'étuve

Figure 4.14: Les matériaux de Foisonnement de sable

Figure 4.15: four à 450 °

Figure 4.16: Les matériaux de Matière organique

Figure 4.17: les échantillons après calcination

Figure 4.18: Granulométrie par tamisage de sable de carrières << SD2>>.

Figure 4.19: le sable corrigé

Figure 4.20 : Le ciment utilisé.

Figure 4.21 : Le malaxeur Hobart électrique.

Figure 4.22: Eprouvette prismatique 4x4x16 cm

Figure 4.23: Appareil de chocs

Figure 4.24: L'acide sulfurique

Figure 4.25: L'acide chlorhydrique

Figure 4. 26: Conservation des éprouvettes dans les solutions chimiques.

Figure 4.27 : Machine de compression et de flexion.

Figure 4.28: écrasement des éprouvettes du mortier

Figure 4.29 : éprouvette du mortier après l'écrasement

Figure 5.1: éprouvette de référence (témoin).

Figure 5.2: Perte de masse des éprouvettes de référence (témoin).

Figure 5.3: éprouvette conservées en HCl.

Figure 5.4 : Perte de masse des éprouvettes conservées en HCl.

Figure 5.5: éprouvette conservées en H₂SO₄.

Figure 5.6 : Perte de masse des éprouvettes conservées en H₂SO₄.

Figure 5.7: éprouvette conservées à l'eau de mer.

Figure 5.8: Perte de masse des éprouvettes conservées à l'eau de mer.

Figure 5.9 : Résistance à la traction par flexion des éprouvettes de référence.

Figure 5.10 : Résistance de compression des éprouvettes de référence

Figure 5.11 : Résistance à la traction par flexion éprouvettes conservées en HCl

Figure 5.12 : Résistance de compression éprouvette conservée en HCl

Figure 5.13 : Résistance à la traction par flexion éprouvettes conservées en H₂SO₄

Figure 5.14 : Résistance de compression éprouvette conservée en H₂SO₄

Figure 5.15 : Résistance à la traction par flexion éprouvettes conservées à l'eau de mer.

Figure 5.16 : Résistance de compression éprouvette conservée à l'eau de mer.

Liste des équations

Equation 1.1.....	22
Equation 1.2.....	23
Equation 2.1.....	31
Equation 2.2.....	31
Equation 2.3.....	33
Equation 2.4.....	36
Equation 4.1.....	66
Equation 4.2.....	66
Equation 4.3.....	67
Equation 4.4.....	67
Equation 4.5.....	68
Equation4.6.....	70
Equation4.7.....	72
Equation 4.8.....	72
Equation 4.9.....	74
Equation 4.10.....	74
Equation4.11.....	75
Equation 4.12.....	77
Equation 4.13.....	80
Equation 4.14.....	80
Equation 4.15.....	87
Equation 4.16.....	90
Equation 5.1.....	92
Equation 5.2.....	92

Equation 5.3.....	94
Equation 5.4.....	94

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les avantages et les inconvénients du béton léger

Tableau 1.2 : les classes des granulats

Tableau 4.1 : Analyse chimique de sable de dune.

Tableau 4.2 : Valeur de bleu méthylène de sable de dune.

Tableau 4.3 : tamisage de sable de dune << SD1 >>

Tableau 4.4 : Résultats Equivalent de sable de sable de dune

Tableau 4.5 : Nature et qualité ES du sable.

Tableau 4.6 : Résultats Teneur en eau de sable de dune

Tableau 4.7 : Résultats Foisonnement de sable de dune.

Tableau 4.8 : tamisage de sable de carrières << SD2 >>.

Tableau 4.9 : Caractéristiques physiques de sable de carrières << SD2 >>

Tableau 4.10 : tamisage de mélange

Tableau 4.11 : Analyse physiques du mélange.

Tableau 4.12 : Composition chimique du ciment de Béni-Saf

Tableau 4.13 : Composition minéralogie du ciment de Béni-Saf

Tableau 4.14 : des caractéristiques chimiques de l'eau.

Tableau 4.15 : Concentration des solutions.

Tableau 5.1 : Perte de masse des éprouvettes de référence (témoin).

Tableau 5.2 : Perte de masse des éprouvettes conservées en HCl.

Tableau 5.3 : Perte de masse des éprouvettes conservées en H₂SO₄.

Tableau 5.4 : Perte de masse des éprouvettes conservées à l'eau de mer.

Tableau 5.5 : Les résultats de PH dans les milieux agressifs.

Tableau 5.6: Résistance à la traction par flexion et de compression des éprouvettes de référence.

Tableau 5.7 : Résistance à la traction par flexion et de compression éprouvettes conservées en HCl

Tableau 5.8 : Résistance à la traction par flexion et de compression éprouvettes conservées en H₂SO₄

Tableau 5.9 : Résistance à la traction par flexion et de compression éprouvettes conservées à l'eau de mer.

Résumé

Le sable des dunes algériennes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'utilisation de ce nouveau matériau dans le secteur de la construction, peut soulager d'avantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

Le présent travail a pour but d'apporter des solutions et des réponses sur l'utilisation du sable de dunes peuvent remplacer en totalité les sables alluvionnaires (CONCASSAGE) pour fabriquer du béton ayant de bonnes propriétés physico-mécanique et durabilité, dans différents milieux.

Dans cette étude, nous avons examiné l'influence de l'environnement de conservation et la nature du sable sur l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un côté, et d'un autre côté sur la durabilité du béton vis-à-vis des agressions chimiques.

Mots clés: *le sable des dunes, les sables alluvionnaires, durabilité, formulation, compression de béton*

Abstract

The sand of the Algerian dunes is a widely available material in Algeria. This material is practically untapped, despite the possible characteristics that it can present. The use of this new material in the construction sector can further ease the habitat area and contribute to the development of the regions of southern Algeria, very rich in sand dune.

The aim of this work is to provide solutions and answers on the use of dune sand, which can replace alluvial sands (CONCASSAGE) in order to produce concrete with good physico-mechanical properties and durability in different media.

In this study, we examined the influence of the conservation environment and the nature of sand on the evolution of the mechanical properties on one side and on the durability of the concrete on the Chemical aggressions.

Keywords: *dune sand, alluvial sand, durability, formulation, compression of concrete*

المخلص

الكثبان الرملية الجزائرية هي مادة متوفرة لثبوتها في الجزائر. هذه المواد هي غير مستغلة تقريبا، على الرغم من خصائصها تستخدم هذه المواد الجديدة في صناعة البناء والتشييد، ويهدف هذا العمل إلى توفير الحلول والأجوبة على استخدام الكثبان الرملية يمكن أن تحل تماما رمال الغرينية (سحق) لجعل الخرسانة ذات خصائص فيزيائية وميكانيكية جيدة والمتانة في بيئات مختلفة.

في هذه الدراسة، درسنا تأثير الرمال الطبيعية على تطور الخصائص الميكانيكية وعلى الاستدامة الخرسانة لتأثير كيميائي.

كلمات البحث: الكثبان الرملية والرمال الغرينية، وقوة التحمل، وصياغة، وضغط ملموس

1. Introduction générale :

De nos jours le béton est devenu le matériau le plus utilisé au monde dans le domaine du génie civil. Les pratiques de l'industrie du béton sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement traditionnelles. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-compactant). Dans notre pays, s'ajoute un bouleversement supplémentaire : l'emploi d'un nouveau type de sable de dune de NAAMA.

En Algérie, Les organismes de contrôle de la qualité du béton de structure exigent à ce que les agrégats sont constitués à partir des sables alluvionnaires ou de carrière et du gravier concassé ; tous ces facteurs incitent les acteurs du secteur du génie civil à rechercher la valorisation d'autres matériaux locaux de substitution qui soient aptes à fournir, si possible, des bétons de qualité équivalente aux bétons ordinaires.

Le sud Algérien dispose des réserves naturelles importantes renouvelables en sable de dune, caractérisé par une granulométrie fine mais de composition chimique et minéralogique riche en silicium malgré l'abondance ce matériau reste inconnu. Le sable de dune de l'erg occidental occupe 6% de la surface du Sahara Algérien.

Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction : indice de propreté élevé et absence dans sa composition de matières organiques et autres matières indésirables telles que les sulfates, sulfures ou carbonates.

Les ressources en granulats sont rares dans la majorité des régions, ceci nous encourage à chercher des techniques permettant de valoriser des matériaux disponibles localement, et de les utiliser dans les différents domaines de construction, d'où l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation de sable de dunes pour la formulation des bétons dont il serait le constituant principal.

Notre présente étude s'inscrit dans cette politique de valorisation du sable de dune de Naama Son exploitation en génie civil présente un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie La hausse de la demande du sable de construction dans ce pays et l'incapacité des

carrières locales à fournir du sable fin de granulométrie inférieure à 2 mm, nous ont poussé à étudier la faisabilité d'incorporer ce type de sable dans des nouveaux bétons.

L'objectif essentiel de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'influence et les effets des sables de dune sur les caractéristiques physico-mécaniques, et de la durabilité des bétons.

➤ Ce mémoire sera organisé comme la suite :

La première partie : est consacré à une étude bibliographique qui comporte trois chapitres, le premier est une représentation générale de béton. Le deuxième illustre la durabilité et le comportement mécanique des bétons et enfin le dernier entame le sable de dune de Naama.

La deuxième partie : c'est une étude expérimentale composé de deux chapitres, le premier définit les matériaux et les méthodes d'essais utilisé pour les confections des mortiers.

Dans le deuxième chapitre on, présente les résultats obtenus et leurs interprétations ; enfin on retrouve une conclusion générale.

1. Introduction :

Le béton a été depuis longtemps le matériau le plus utilisé au monde dans la construction, plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde [1]. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques.

Le béton répond parfaitement à ces conditions de choix :

- il est fabriqué à partir de matières premières naturelles largement répandues à la surface de la terre ;
- sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'emploi d'une main-d'œuvre rapidement formée ;
- il autorise les plus grandes audaces architecturales et techniques, puisque, mis en place à l'état fluide, il épouse les formes de moules ou de coffrages les plus complexes ;
- sa résistance mécanique dépasse aujourd'hui largement celle des meilleures roches naturelles ;
- sa durabilité est plus que séculaire dès lors qu'il est correctement formulé et mis en œuvre ; il s'accommode des environnements corrosifs et résiste bien, en particulier, aux actions agressives de l'eau de mer ; il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies ;
- son prix de revient, enfin, fait du béton le matériau de construction par excellence.

2. Historique de béton :

Les Romains de l'Antiquité savaient faire du béton. Ils avaient découvert que, pour fabriquer un liant hydraulique qui fasse prise sous l'eau, il fallait mélanger à de la chaux des déchets de fabrication des tuiles et des briques ou des cendres volcaniques (provenant notamment de Pozzuoli, dans la baie de Naples, qui donna son nom à la pouzzolane, roche volcanique).

Cette connaissance leur a, par exemple, permis de construire des ports protégés par des jetées en béton qui faisait prise sous l'eau, contrairement à la chaux .

Leur savoir s'est ensuite perdu au Moyen Âge. C'est la mise au point et le développement de la production des ciments artificiels modernes qui a permis l'essor de la construction actuelle en béton.

Aux barques en béton (1848) de Joseph-Louis Lambot (1814-1887) et aux caisses à fleurs (1849) de Joseph Monier (1823-1906) succèdent les réalisations d'entrepreneurs qui développent des « systèmes » de béton armé : François Coignet (1814-1888), qui met au point le béton aggloméré ; Monier, dont les brevets de 1877 et 1878 seront exploités en Allemagne ; François Hennebique (1842-1921), dont la société construira plus de 7 000 ouvrages, parmi lesquels le siège de cette dernière au 1, rue Danton (1900) à Paris et la villa de l'architecte à Bourg-la-Reine (1903) sont des exemples encore existants ; Armand Considère (1841-1914), qui invente le béton fretté (1901)... En 1906, cette première phase prend fin avec la publication des *Instructions relatives à l'emploi du béton armé*, véritable premier règlement français de calcul des structures en béton armé. Au XX^e siècle, c'est l'invention du béton précontraint par Eugène Freyssinet (1879-1962) qui ouvrira de nouveaux horizons au matériau béton. La précontrainte, qui consiste à garder le béton dans un état comprimé grâce à des câbles en acier tendus, permet d'atteindre de grandes portées avec du béton et a trouvé, notamment, son application dans les ponts. Depuis lors, les progrès dans les sciences des matériaux ont permis d'améliorer encore de manière spectaculaire les propriétés des bétons [2].

3. Définition du Béton :

Le béton est probablement le plus ancien matériau composite. Il est fabriqué à partir d'un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique lui-même fabriqué avec des minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

Il existe deux grandes filières de réalisation des bétons :

- Le *-béton coulé en place*, qui provient soit de centrales de béton prêt à l'emploi (B.P.E.), installations fixes permettant de fabriquer des bétons à propriétés spécifiées, soit de fabrication sur chantier de bétons à composition prescrite.

- Les *–produits en béton préfabriqué*, éléments composant les structures, poutres, poteaux, éléments de façade, dalles de plancher, les réseaux d'assainissement, etc., qui peuvent être fabriqués de manière industrialisée [1].

3.1-différents types de béton :

- ✓ Les Bétons Prêts à l'Emploi
- ✓ Le béton armé
- ✓ Le béton fibré
- ✓ Le béton précontraint
- ✓ Les Bétons Hautes Performances
- ✓ Le béton projeté
- ✓ Les bétons auto compactant, auto plaçant et auto nivelant
- ✓ Les bétons caverneux, drainant et poreux (les bétons légers)
- ✓ Le béton de ciment blanc
- ✓ Le béton bitumineux

a. Le béton prêt à l'emploi :

Le Béton Prêt à l'Emploi est préparé dans une centrale à béton. Le camion toupie livre sur chantier un produit frais, aux propriétés techniques et esthétiques déterminées, qui épouse les formes du coffrage. Le béton prêt à l'emploi permet :

- d'obtenir des bétons de qualité constante et parfaitement adaptés aux exigences de l'ouvrage
- d'accroître la productivité des chantiers et réduire les investissements en matériel et en hommes
- de réduire la pénibilité du chantier en supprimant la manutention liée au chargement de bétonnières [3].



Figure 1.1: Le béton prêt à l'emploi [2]

b. le béton armé :

Le béton armé associe intimement un béton avec des armatures métalliques pour obtenir un matériau qui cumule les qualités de résistance en compression et en traction.

- Il allie la résistance à la compression du béton à la résistance à la traction de l'acier.
- Le choix des éléments d'armature, leur ancrage et leur répartition dans le béton est capitale.
- Un enrobage soigné des armatures est nécessaire pour les préserver des phénomènes D'oxydation [3].



Figure 1.2 : le béton armé [2]

c. Le béton fibré :

Ce sont des bétons dans lesquels ont été incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. De façon générale, ces bétons présentent :

- Une meilleure résistance à la traction
- Une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure, abrasion...)
- Une bonne maîtrise de la fissuration
- Une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface [3].



Figure 1.3 : le béton fibré [2]

d. Le béton précontraint :

Le béton précontraint associe béton et armatures selon une technique imaginée par l'ingénieur E. Freyssinet en 1928 : la précontrainte. Lors de sa fabrication, le béton est soumis à des contraintes préalables permanentes de compression. Une fois en service, le béton, utilisé au mieux de ses possibilités en compression, va s'opposer plus efficacement aux contraintes de traction appliquées à l'ouvrage.

- La précontrainte peut être appliquée au béton soit par pré-tension, soit par post-tension
- Le béton précontraint est adapté aux ouvrages soumis aux contraintes importantes (pont, réservoir)
- Il est recommandé pour la réalisation d'éléments de faible épaisseur assurant des portées longues [3].



Figure 1.4: le béton précontraint [2]

e. Le béton Hautes Performances :

Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique présentant un fort dosage en ciment et en adjuvants, des granulats de faible dimension et une porosité réduite. Ils présentent une durabilité et une résistance exceptionnelles (de 130 à 250 MPa en compression/de 20 à 50 MPa en traction par flexion) qui permet de se passer d'armatures passives dans les éléments structurels. Les BFUP se caractérisent également par :

- une très grande ouvrabilité leur conférant souvent un caractère auto-plaçant
- une résistance très importante aux agressions
- des aspects de parements esthétiques et une texture de parement très fine [3].



Figure 1.5: Le béton Hautes Performances

Figure 1.5 : le béton Hautes Performances [2]

f .Le béton projeté :

Le béton projeté, ou gunite, est un béton propulsé, après malaxage, sur un support sous forme de jet. Il permet de réaliser les formes les plus complexes (dômes, coques, etc.) ou difficiles d'accès (tunnels, travaux acrobatiques, etc.). Il est également souvent utilisé dans les travaux souterrains ou en technique de réparation ou de soutènement.

Il existe deux techniques de projection, la projection par voie humide et la projection par voie sèche, chacune ayant des avantages et des inconvénients [3].



Figure 1.6: le béton projeté [2]

g .Le béton auto compactant, auto plaçant et auto nivelant :

Les Bétons autobloquants sont hyper fluides et se mettent en place, sans vibration, sous l'effet de leur propre poids et de leurs caractéristiques d'écoulement. Ils épousent ainsi des formes de coffrage complexes. Ils offrent de nombreux avantages :

- réduction des délais, gain de productivité, économie de main d'œuvre
- amélioration des conditions de travail et de sécurité
- qualité des parements accrue [3].



Figure 1.7: le béton auto plaçant [2]

h. le béton caverneux, drainant et poreux (les bétons légers)

Les bétons légers permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés. Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique, la conductivité variant dans le même sens que la densité [3].



Figure 1.8: le Béton léger [2]

➤ **Les avantages et les inconvénients :**

Les Avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Plus léger qu'un béton classique • Bonne isolation phonique et thermique • Mise en place facile et rapide • Forte maniabilité • Non inflammable 	<p>Résistance moins élevée que pour un béton ordinaire</p>

Tableau 1.1 : Les avantages et les inconvénients du béton léger

i. Le béton de ciment blanc :

Fabriqués avec du ciment blanc, ces bétons présentent les mêmes caractéristiques qu'un béton traditionnel : résistance, durabilité ... mais offrent l'agrément de teintes claires ou colorées. Ils sont particulièrement prisés pour des réalisations esthétiques et qualitatives.

- Le ciment blanc est le meilleur allié des bétons apparents
- Il révèle les couleurs naturelles des constituants du béton : sables, gravillons sans les altérer
- Il est le médium idéal des pigments naturels ou synthétiques
- Il met en valeur les reliefs du parement par la clarté qu'il confère au béton [3].



Figure 1.9: Le béton de ciment blanc [2]

j. Le béton bitumineux :

Un enrobé (ou enrobé bitumineux ou béton bitumineux ou grave bitume ou encore, appellation étrangère, asphalte) est un revêtement de voirie. C'est un mélange de graviers, de granulats concassés, de sable et d'un liant hydrocarboné appelé bitume enrobé bitumineux (environ 5%) appliqué en une ou plusieurs couches pour constituer la chaussée des routes [3].



Figure 1.10: Le béton bitumineux [2]

3.2-Classification des bétons :

Le béton est classé selon :

❖ **La résistance mécanique :**

- Béton ordinaireinférieure à 50 Mpa
- Béton à haute performance entre 50 et 80 Mpa
- Béton à très haute performance.....entre 80 et 150 Mpa
- Béton exceptionnel.....supérieure à 150 Mpa

❖ **La masse volumique :**

- Béton extra lourd.....supérieur à 2500Kg / m³
- Béton lourd..... Entre 1800 et 2500 Kg / m³
- Béton léger.....entre 500 et 1800 Kg / m³
- Béton extra léger inférieure à 500 Kg / m³

❖ **En fonction de sa teneur en ciment :**

- Béton standard : dosé à 350kg de ciment.
- Béton : dosé de 150 à 350 kg/m³ de ciment.
- Béton sec ou Grave ciment ou Grave drainante: entre 56 kg et 112 kg/m³ (entre 3,5 et 7%) de ciment
- Béton maigre ou stabilisé : mélange de ciment et de sable. [4]

4. Constituant de béton :

Le béton est un matériau composite résultant du mélange d'un squelette granulaire (granulats) et d'une matrice pâteuse durcis sable composée de ciment, d'eau et le plus souvent d'adjuvants.

- Ciment, eau, granulats et adjuvants sont les constituants les plus fréquemment utilisés.
- D'autres constituants peuvent être ajoutés pour obtenir des performances particulières [3].

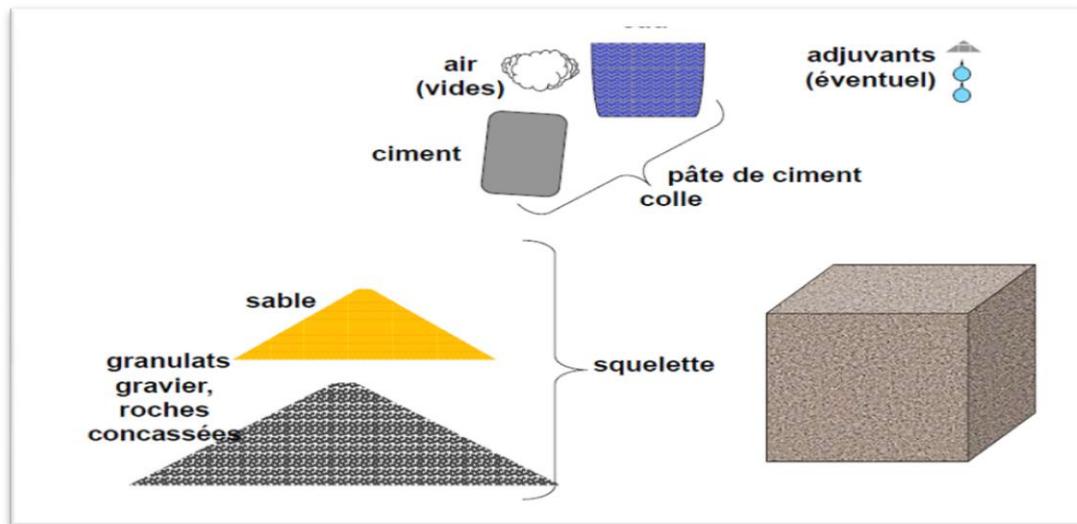


Figure 1.11 : les composants de béton [2]

4.1. Le ciment :

Le ciment est un des composants essentiels du béton. Agissant comme une colle, il permet d'agrèger les différents constituants du béton.

Le ciment est un liant hydraulique qui fait prise par hydratation, c'est-à-dire au contact de l'eau. Il existe des ciments courants régis par la norme EN 197-1, et des ciments spéciaux qui possèdent des propriétés spécifiques de prise ou de résistance : ciment alumineux fondu, ciment prompt naturel... régis par des normes spécifiques.

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- préparation du cru ;
- cuisson ;
- broyage et conditionnement ;

La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est fournie par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Ces matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes [5].



Figure 1.12: les constituants de ciment [2]

4.2. Les granulats:

Squelette granulaire c'est le mélange entre le sable et de graviers intervient dans la résistance finale du béton, occupent près de la 3/4 du volume du béton et influent donc sur ses propriétés. Le granulat est d'abord caractérisé par sa granularité, qui est la distribution dimensionnelle des grains, exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La mesure de la granularité se nomme granulométrie.

4.2.1. Les type de granulats :

- **le granulat naturel** est le granulat d'origine minérale n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. Dans cette catégorie se rangent des granulats de roche, comme le calcaire, le porphyre, le trappe... ;
- **le granulat artificiel** est le granulat d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres. Dans cette catégorie se rangent des granulats transformés, comme le schiste expansé, l'argile expansée, mica expansé (vermiculite)... ;
- **le granulat recyclé** est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux... [6].

4.2.2. Les classes de granulats:



Figure 1.13: les classes des granulats [2]

De là, on déduit sa classe granulaire en termes de dimension inférieure (d) et supérieure (D) de tamis, exprimée par la dénomination d/D , des dimensions exprimées en millimètre.

- **Le sable** : granulat pour lequel la dimension la plus grande (D) est inférieure ou égale à 4 mm, et dont la dimension la plus petite (d) est égale à 0. Par exemple : « sable 0/2 ». (nb : dans la norme NF EN 12620, le D peut aller jusqu'à 6 mm).
- **Le gravillon** : granulat pour lequel la dimension la plus petite (d) est supérieure ou égale à 4 mm, et la dimension la plus grande (D) est inférieure ou égale à 12 mm. Par exemple : « gravillon 4/12 »
- **La grave** : désigne quant à elle tous les granulats de dimension (d) égale à 0, et dont la dimension la plus grande (D) est supérieure à la limite désignant les sables, c'est-à-dire supérieure à 4 mm (6 mm dans le cas de la norme NF EN 12620) et ce jusqu'à 90 mm. C'est un mélange de sables et de gravillons, voire de fillers. Elle peut être produite d'emblée, sans passer par la séparation puis le mélange des sables et gravillons. Par exemple : « grave 0/31.5 ».
- **Ballasts** : Granulat, constitué de pierres dures régulièrement concassées, ou parfois de laitier de haut fourneau, destiné à soutenir les traverses, à les maintenir et à répartir uniformément sur la plate-forme la charge supportée par la voie tout en restant perméable aux eaux superficielles [6].

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Filles	0/D	$D < 2\text{mm}$ avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70% de passant à 0,063mm.
Sables	0/D	$d=0$ et $D \leq 4\text{mm}$
Graves	0/D	$D \geq 6,3\text{ mm}$
Gravillon	d/D	$d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 6,3\text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d = 31,5\text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

Tableau 1.2 : les classes des granulats. [6]

4.2.3. La Nature des granulats :

Il est aussi caractérisé par sa nature minéralogique, inhérente au gisement duquel il est issu.

Ce peut être une roche :

- éruptive de type granite, porphyre...
- métamorphique de type schiste, gneiss...
- sédimentaire de type siliceux (silex, quartzite...) ou carbonaté (calcaire, dolomie...).

4.2.4. Les familles des granulats :

La dimension de ces granulats varie d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable 0/D avec $1\text{ mm} < D \leq 6,3\text{ mm}$.
- Gravillon d/D avec $d \geq 1\text{ mm}$ et $D \leq 125\text{ mm}$.
- Grave 0/D avec $D > 6,3\text{ mm}$. [2]

4.3. L'eau de gâchage :

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

L'eau permet au ciment de faire prise (c'est un des réactifs de la réaction d'hydratation), et de donner au béton une consistance (ouvrabilité) adaptée à l'ouvrage à réaliser. L'eau est un constituant très important du béton, car elle peut en influencer la qualité, en fonction de sa qualité et de sa quantité [3].

4.4. Adjuvants :

4.4.1. Définition

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci [AFNOR NF EN 934-2/A2, 2006]. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, mais peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires.

Leur rôle et leur efficacité dépendent de la nature du produit chimique et de l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton frais [1].

4.4.2. Les principaux adjuvants

- **les plastifiants et fluidifiants réducteurs d'eau** : qui remplissent deux fonctions : il permet, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance fluide et même liquide ; à maniabilité donnée, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton frais. Ce sont des résines mélamines ou des naphthalènes sulfonâtes. Leur action s'exerce par défloculation et dispersion par répulsion électrostatique des grains de ciment en solution dans l'eau, et leur durée d'activité n'excède pas 1 ou 2 heures.
- **les retardateurs de prise du ciment** : qui prolongent la durée pratique d'utilisation du béton frais. Ce sont généralement des sucres ou des lignosulfonates. Ils sont utiles pour le transport du béton sur de grandes distances ou pour sa mise en place par pompage, particulièrement par temps chaud.

- **les accélérateurs de prise et de durcissement** : qui permettent, pour les premiers, la réalisation de scellements ou d'étanchements et, pour les seconds, une acquisition plus rapide de résistance du béton durci ;
- **les entraîneurs d'air**, qui confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène. L'influence des adjuvants peut varier sensiblement en fonction de la nature et de la composition du ciment ; des problèmes de compatibilité peuvent apparaître entre adjuvants et ciments [1].

4.5. Additions minérales :

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [2].

5. Les propriétés de béton :

Matériau composite, le béton peut répondre à un grand nombre de spécifications : isolation thermique et phonique, aspect, durabilité, sécurité incendie... Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés :

- à l'état frais lorsqu'il est plastique et qu'on peut le travailler,
- à l'état durci quand sa forme ne peut plus être modifiée, ses caractéristiques continuent à évoluer. [3]

5.1 . Les propriété du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage, moule...) et à enrober convenablement les armatures. A la clé, une grande liberté de formes.

- La consistance d'un béton est la grandeur qui caractérise son ouvrabilité.

L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange.] ont défini l'ouvrabilité du béton comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage du ferrailage. Faury (1958) souligne que

l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de malfaçons. Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction.

- La composition du béton et les moyens de sa mise en œuvre doivent être appropriés
- La teneur en eau doit être limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité [3]

5.2 . Les propriétés du béton durci :

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées [3]

5.3. Les propriétés mécaniques :

5.3.1. Résistance à la compression :

Une bonne résistance à la compression est la performance la plus souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à 28 jours.

La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres :

- Le type et le dosage du ciment
- La porosité du béton
- Le rapport du dosage en eau au dosage de ciment [1]

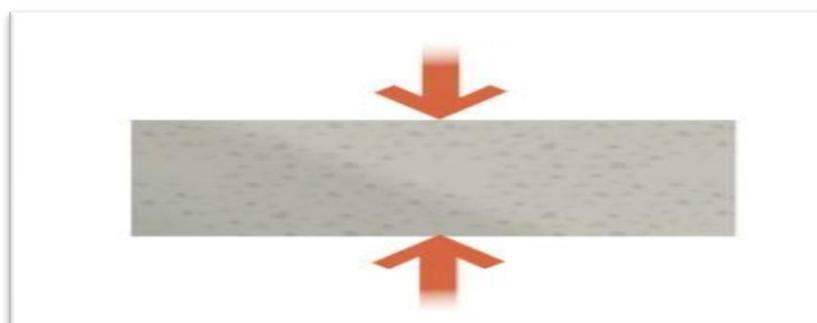


Figure 1.14: effet de compression sur le béton simple

La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, ceux de qualité atteignent 40 à 50 MPa, et les bétons à hautes performances peuvent dépasser 100 MPa.

Parmi les formules qui permettent de prévoir la résistance à la compression, celle de BOLOMEY et la plus connue :

$$R_{c28} = G * F_c \left[\left(\frac{C}{E} \right) - 0.5 \right] \dots\dots\dots \text{Equation 1.1}$$

R_{c28} : résistance à la compression du béton à 28 jours.

F_c = La résistance du ciment à 28 jours

C = dosage en ciment

E = dosage en eau

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la qualité d'eau de gâchage, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

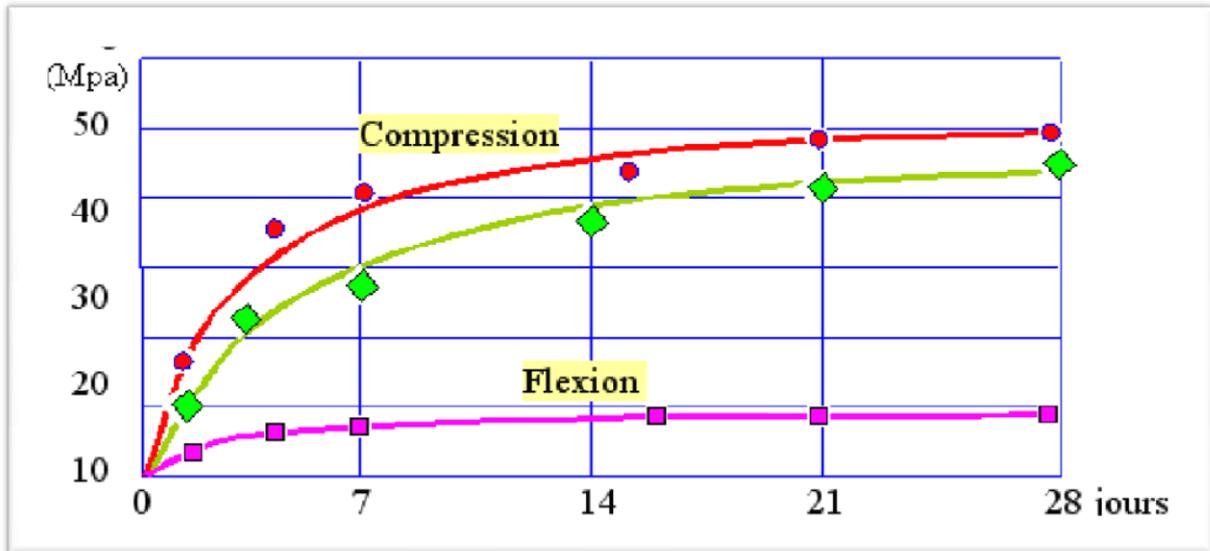


Figure 1.15 : résistance de béton à la compression et la flexion à 28 jours [2]

5.3.2. Résistance à la traction :

La résistance à la traction est environ égale au 1/10 de la résistance à la compression. Elle est définie par la formule :

$$\delta_j = 0.5 + 0.05 \delta_j \text{ en (MPa)} \dots \dots \dots \text{Equation 1.2}$$

(δ_j) : la résistance caractéristique en (MPa)



Figure 1.16: effet de traction sur le béton simple [2]

5.3.3. Coefficient de dilatation :

La valeur du coefficient de dilatation linéaire est généralement prise égale à 1.10^5 . En fait, cette valeur s'étend de $0,8.10^5$ (béton à granulats calcaires) à $1,2.10^5$ (béton à granulats siliceux).

5.3.4. Les propriétés rhéologiques :

Tous les matériaux, et, entre autres, le béton, sont, à des degrés divers, viscoélastiques. Le facteur temps intervient donc dans leur comportement et dans la formulation de leurs déformations. Il faut donc distinguer les déformations instantanées des déformations différées qui se produisent au cours du temps. Ceci est particulièrement vrai pour le béton, dont la résistance s'accroît asymptotiquement avec le temps, au fur et à mesure que se complète l'hydratation du ciment. [1]

5.4 : Les propriétés physiques :

On distingue, un peu arbitrairement, les propriétés physiques des propriétés mécaniques des bétons. Elles procèdent toutes, en fait, de leur degré de porosité.

5.4.1. Poids volumique :

il varie entre 23 et 24 kN/m³ pour les bétons ordinaires ; il atteint 25 kN/m³ pour les BHP. La présence d'armatures dans le béton armé ou précontraint conduit à prendre en compte dans les calculs un poids volumique de 25 kN/m³ (2.500 kg/m³) pour les bétons courants. [1]

5.4.2. La perméabilité :

Le béton est d'autant plus imperméable que la porosité est plus faible. Les bétons dont le rapport E/C est inférieur à 0,40 sont pratiquement imperméables à l'eau : leur perméabilité ne peut plus être mesurée.

- Résistance aux agents agressifs : les bétons compacts et à porosité réduite offrent une grande résistance aux effets corrosifs de divers agents agressifs. Ils présentent, en particulier, une excellente tenue vis-à-vis des effets corrosifs de l'eau de mer. [1]

5.4.3. Tenue au feu :

Résistant au feu jusqu'à des températures pouvant dépasser les 800°, le béton ne brûle pas et ne se consume pas. Les structures en béton incendiées peuvent en général être réparées là où des structures en d'autres matériaux devraient obligatoirement être reconstruites.

- Il ralentit la progression de la chaleur
- Il ne dégage pas de fumées et ne fond pas.
- Il prévient ainsi tous risques d'effondrement. [1]

5.4.4-Durabilité :

Les diverses propriétés physiques des bétons lui confèrent une grande durabilité. Réalisées correctement, selon les règles de l'art, les structures en béton conservent donc leur aptitude au service pendant toute leur durée de vie prévue, sans nécessiter de coûteuses réparations. [1]

5.5. Propriétés thermiques du béton :

Il apparaît très clairement que c'est l'ensemble de la démarche de conception qu'il faut passer au crible pour obtenir un confort thermique tout en réalisant de substantielles économies d'énergie. Le béton présente de nombreuses qualités qu'il faut savoir optimiser dans le cadre d'une analyse complète des besoins en énergie d'une habitation.

- Le béton est un matériau à forte inertie thermique
- L'isolation intervient en complément de ses propriétés d'inertie [1]

5.6. Les propriétés acoustiques :

Pour optimiser le confort acoustique de l'intérieur d'un bâtiment, c'est au niveau de la phase de conception même qu'il faut s'en préoccuper, toute intervention ultérieure posant des problèmes techniques et donc de coût parfois insurmontables. Les solutions bétons permettent de résoudre facilement nombre des exigences posées par la réglementation acoustique.

- Le béton : un bon absorbeur de son
- Grâce à sa masse et à sa compacité [1]

Conclusion :

Ce chapitre a pour l'objectif de faire quelques rappels sur les généralités suivantes :

- le comportement mécanique et physique du béton et les différents matériaux de construction et ces qualités.
- les additions sur le comportement mécanique et hygrométrique du béton et améliorer ces performances pour le développer afin de l'utiliser dans les préparations minces.

1. Introduction :

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lequel il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement (gel, eaux agressives...), avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible [7].

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits.

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution.

Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou (expositions), l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives (NF EN 206-1). Autrement dit, les exigences relatives aux performances du béton ne se superposent pas à celles relatives à sa composition, mais peuvent les remplacer, pour une même durabilité visée [8].

2. Béton durable et béton résistant :

La porosité est le paramètre de premier ordre qui caractérise la texture du béton ; ce n'est évidemment pas le seul paramètre, mais c'est celui qu'il faut fixer avant d'étudier tous les autres. Il conditionne presque toutes les propriétés du béton et, en premier lieu, sa résistance mécanique.

La résistance aux efforts de compression est la propriété principale du béton, celle qui permet son utilisation comme matériau de construction. Plus faible est la porosité, plus grande est la résistance. Mais presque toutes les autres propriétés du béton dépendent de ce même paramètre de premier ordre. Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus résistant sera aussi le plus rigide, le plus dur, etc. [7].

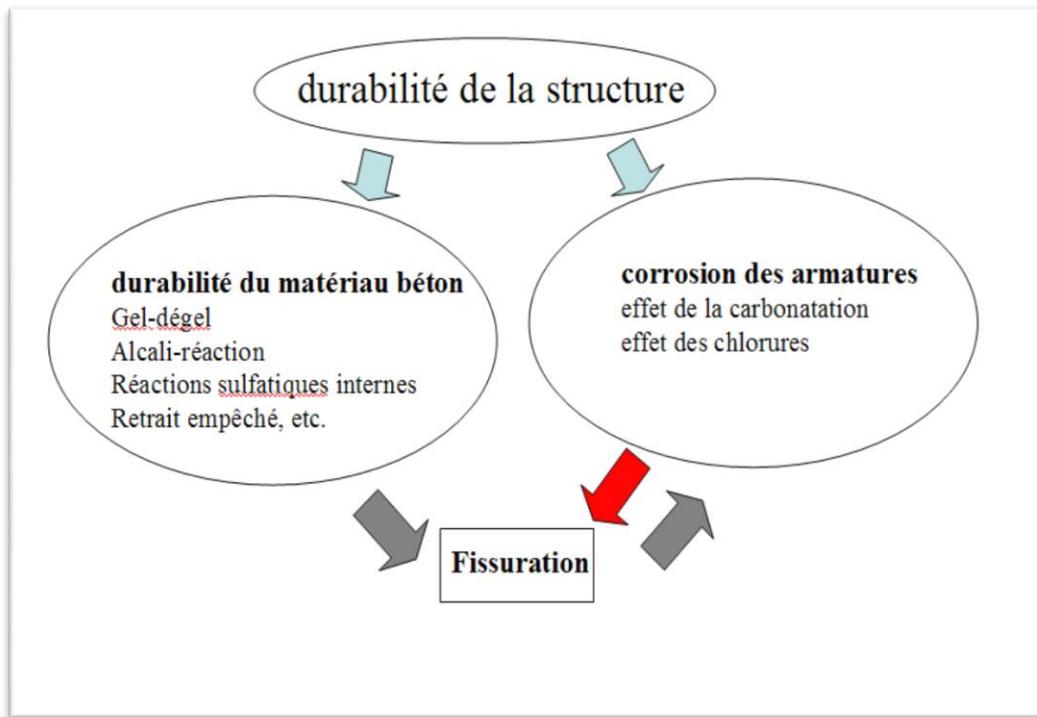


Figure 3.1 : la durabilité de la structure. [2]

3. Les essais de durabilité sont de deux types :

- indicateurs de durabilité caractérisant les propriétés du béton en relation avec la résistance aux agressions extérieures et permettant d'alimenter des modèles de vieillissement (exemple : coefficient de diffusion des ions chlore vis-à-vis de la protection des armatures en milieu marin et la perméabilité) ;
- les essais des attaques chimiques.

Les essais de durabilité constituent le socle de l'approche performant elle de la durabilité des bétons. L'objectif du projet national est de disposer, pour chaque classe d'exposition du béton définie dans la norme NF EN206-1, d'un ou plusieurs indicateurs associés à des essais qui permettent de comparer et/ou d'évaluer la capacité d'un béton à résister à une dégradation donnée.

Pour être légitimes et opérationnels, ces essais doivent disposer d'un référentiel technique robuste qui fasse consensus (modes opératoires, données de fidélité, effet de l'âge du béton) et qui puisse s'appliquer à la grande majorité des bétons utilisés à l'heure actuelle et dans l'avenir. Ils doivent également être mesurés à des échéances compatibles avec les contraintes de chantier,

avec des durées d'essai limitées (au maximum 3 mois) et des méthodes d'essai suffisamment simples pour être accessibles à un grand nombre de laboratoires et économiquement viables.

Les propositions de travail relatives aux essais de durabilité s'inscrivent donc dans un objectif général de rendre opérationnel le déploiement de l'approche performant elle sur l'ensemble des étapes de la vie d'un béton (spécification, formulation, contrôles de production et de construction et suivi du vieillissement). Le principe est de s'appuyer sur les travaux en cours et à venir pour faire émerger les consensus et approfondir les points critiques et les manques ; et ce en lien étroit avec les groupes de normalisation (GEF8 et GEDUB notamment), les groupes de travail nationaux (base de données des indicateurs de durabilité de l'AFGC notamment) et les travaux européens (CEN, RILEM par exemple) [9].

4. Le gel :

Les dégâts du gel de l'eau contenue dans les bétons non résistant se manifestent sous la forme d'un écaillage. En effet, l'eau qui gèle se dilate. La glace occupe un volume d'environ 9 % supérieur à celui de l'eau. [10]

4.1. Les dégradations occasionnées par le gel :

Peuvent être de deux types:

- une microfissuration répartie dans la masse du béton (feuilletage parallèle aux parois), provoquée par un mécanisme de gel interne;
- un délitage de la zone superficielle (dégradation superficielle), appelé écaillage, sous l'effet conjugué des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage.

Un gradient thermique important au voisinage de la surface, générée par l'application des sels à titre curatif sur un film de glace, amplifie la dégradation de surface.

Ces deux formes de dégradation peuvent se produire simultanément ou de manière indépendante, elles peuvent affecter la durabilité de la structure et en particulier la pérennité architecturale des ouvrages [11].

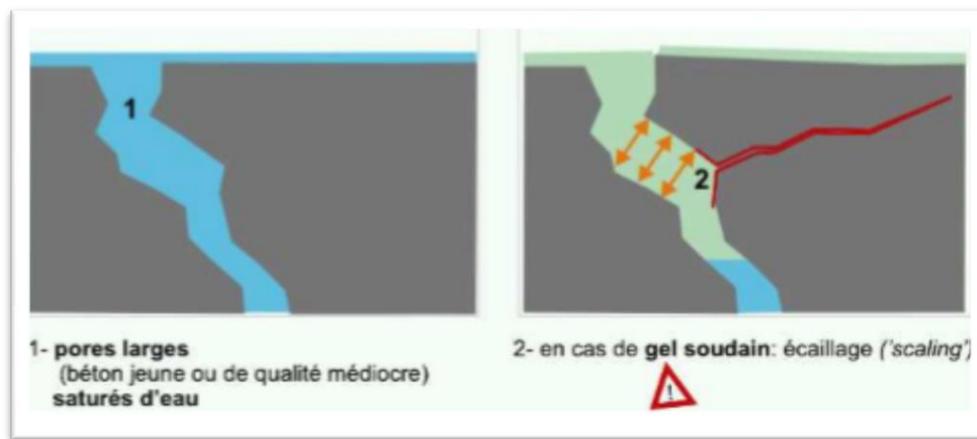


Figure 3.2 : le mécanisme de dégradation par le gel [2]

5. Dégradation par la corrosion des armatures :

Souvent la corrosion des armatures est la conséquence de l'acidification du béton. Le béton sensé jouer son rôle protecteur de l'acier est défaillant : les armatures rouillent et gonflent. Il ne faut pas attendre que les armatures soient à nu.

Pour enrayer la corrosion des armatures, il faut bien comprendre la chimie interne du béton et mettre en évidence les causes et la dynamique. Elles sont souvent à rechercher du côté de la détérioration du béton, mais aussi dans l'environnement : présence de sels, atmosphère marine, etc.

5.1. Effets de la corrosion :

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à sa résistance en traction) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton.

En règle générale, dans des milieux peu agressifs les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée de service escomptée de l'ouvrage.

Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs, risquent de conduire à une dégradation prématurée de l'armature en acier.

5.2. Origines principales de la corrosion :

- La carbonatation carbone (CO₂) dans l'atmosphère.
- La pénétration des chlorures

5.2.1 .La carbonatation :

Le CO₂ peut être dissous par la solution interstitielle du béton, et réagir avec certains composés calciques pour former des carbonates (carbonatation). Il en résulte une baisse du pH de la solution interstitielle du béton (de 12 à 9).

La pénétration du dioxyde de carbone dans le béton est un phénomène de diffusion. Elle est rapide lorsque le béton est assez sec. Mais la réaction de carbonatation a lieu lorsqu'il reste de la solution interstitielle dans le béton. C'est pourquoi, les conditions les plus favorables à la pénétration du dioxyde de carbone correspondent à une alternance d'humidité et de séchage. [11]

5.2.1.1. Réaction de carbonatation :



Pénétration du CO₂ dans le béton ► transformation du portlandite en carbonates de calcium :



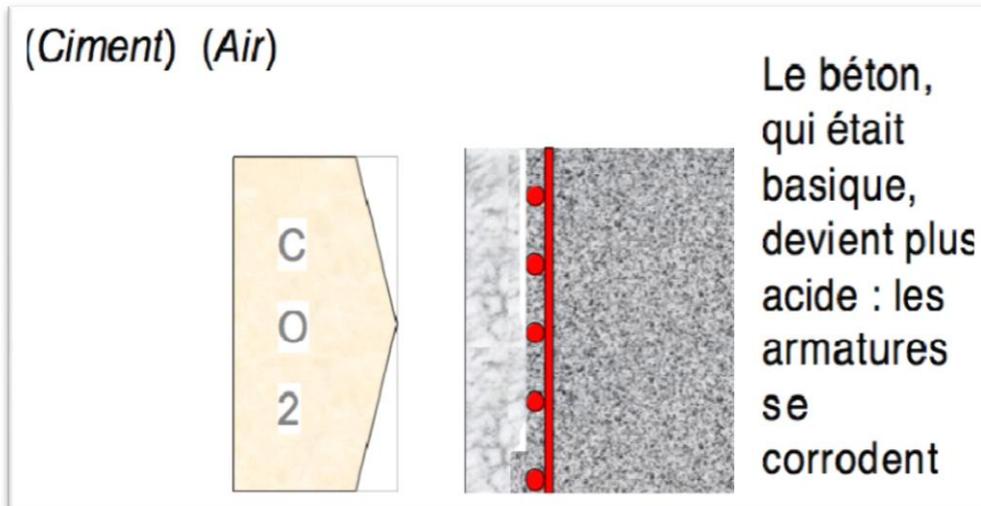


Figure 3.3 : réaction de la carbonatation.[2]

Les produits de corrosion d'un volume plus important font fissurer puis éclater béton

- ▶ Baisse du pH.
- ▶ Dépassivation des armatures.
- ▶ Corrosion.

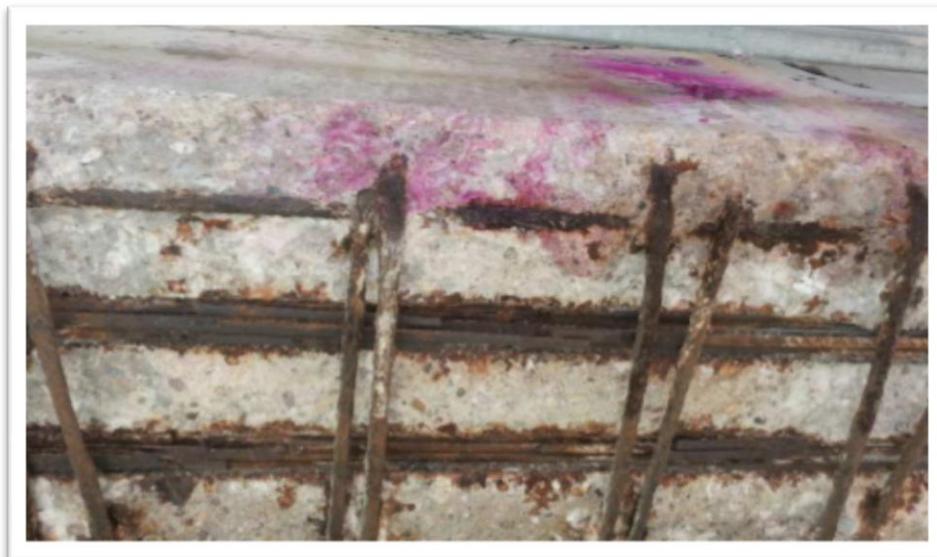


Figure 3.4: corrosion des armatures. [2]

5.2.2. La pénétration des chlorures :

Pénétration des ions Cl Mécanisme de pénétration:

- Entraînement mécanique par l'eau
- Entraînement mécanique par l'eau
- gradient de concentration si béton constamment humide [12]

Loi de diffusion :

$$\frac{\delta}{\delta t} Cl(x, t) = D^* \frac{d^2}{dx^2} Cl(x, t) \dots \dots \dots \text{Equation 2.3}$$

D : coefficient de diffusion apparent des ions Cl

➤ **Sources de Cl⁻:**

-constituants du béton (sables, gravillons, adjuvants)

-sels de déverglaçage

-sels marins [12]

5.2.2.1. Mécanisme de pénétration des chlorures :

La pénétration est généralement favorisée par le béton qui est:

- Fissuré.
- mal mis en œuvre.
- ❖ pas suffisamment compact (adéquation de la formulation à l'environnement)

La pénétration des chlorures nécessite de l'eau. Les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou absorption capillaire. [12]

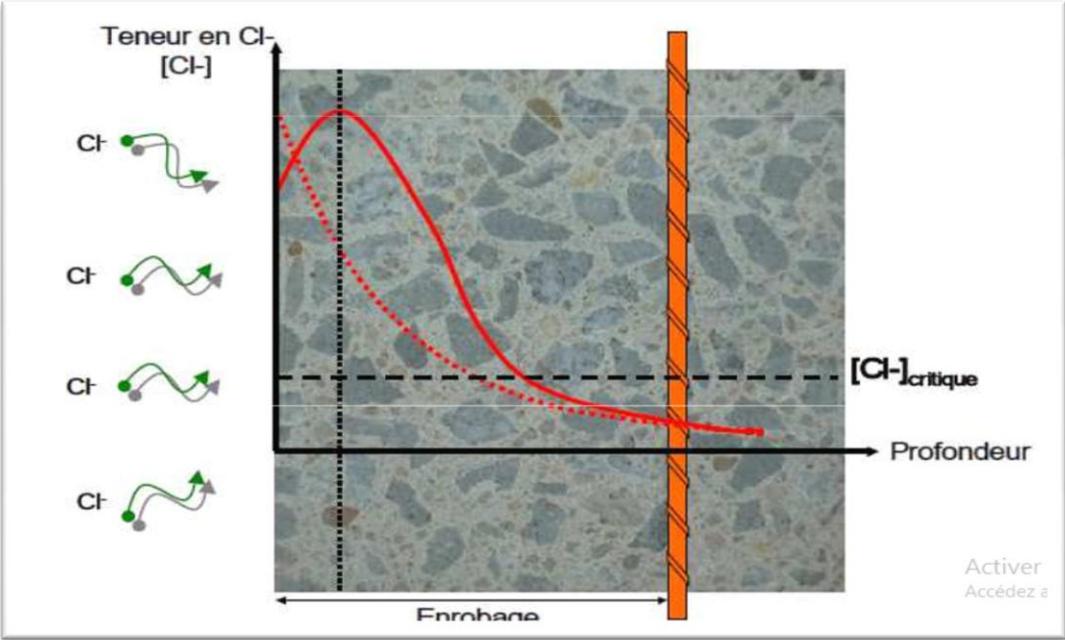


Figure 3.5: La pénétration des Cl⁻ [2]

Les produits de corrosion, d'un volume plus important, font fissurer puis éclater le béton

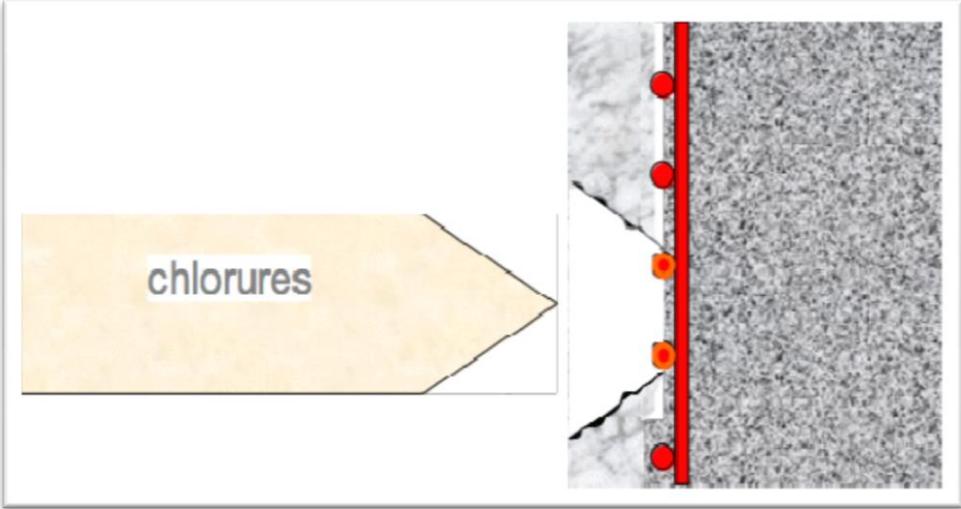


Figure 3.6: La pénétration des chlorures [2]

6. Les attaques chimiques du béton :

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en trois catégories :

- A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.
- C- La formation de produits expansifs à l'intérieur du béton. [13]

6.1. Les attaques sulfuriques :

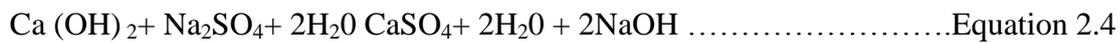
6.1.1. Définition :

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans.

L'attaque sulfurique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimio-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé. [13]

6.1.2 .Attaque par les sulfates:

Les engrais et les déjections animales (fumier, lisier, purin) peuvent contenir des sulfates. On les trouve en combinaison avec différents cations comme le sodium, le calcium, l'ammonium et le magnésium. Le sulfate de sodium réagit entre autre avec la chaux qui se libère lors de l'hydratation du clinker du ciment :



Le sulfate de calcium réagit avec les aluminates de calcium hydratés (principalement C,A) et forme ainsi un sulfo-aluminate de calcium (appelé étrangéité) dont la propriété est de gonfler considérablement en contact avec de l'eau. Les contraintes internes qui en résultent peuvent conduire une fissuration du béton et même à sa destruction. [13]

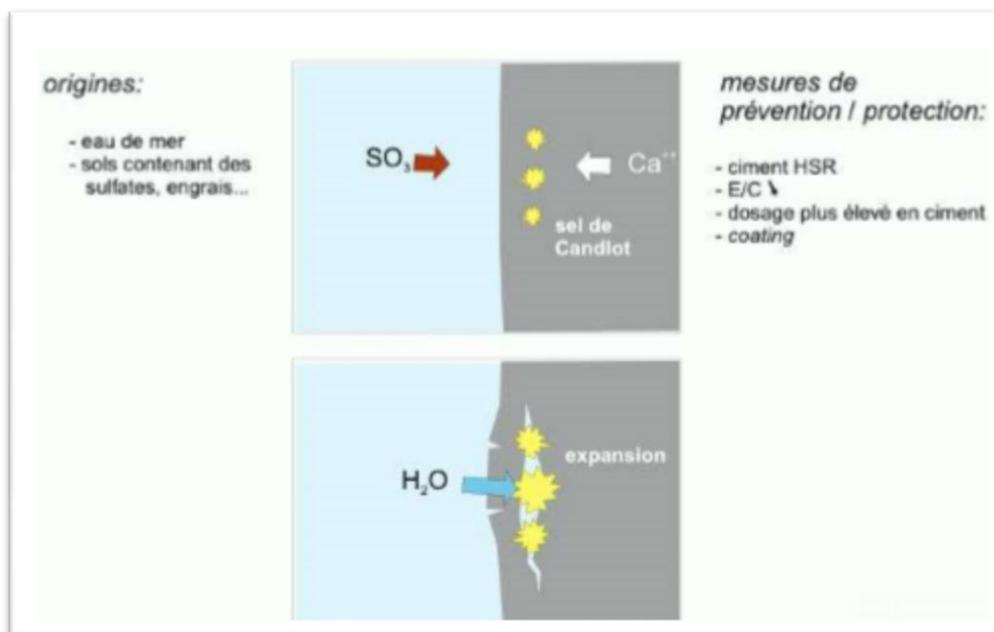


Figure 3.7: dégradation due au sulfate. [2]

➤ **principaux paramètres de la réaction :**

- eau et humidité (réaction et processus de transfert),
- température et durée de maintien lors de la prise et du durcissement (fonction de la géométrie de la pièce),
- teneur en sulfates et en aluminates du ciment,
- teneur en alcalins du béton (rôle sur la solubilité de l'ettringite).

6.2. Attaque par les acides :

Le béton est un matériau basique et se voit donc attaqué par les acides. Ceux-ci réagissent avec les matériaux à base de calcium du béton durci pour mener à la formation de sels de calcium de l'acide corrodant (sel soluble). IL y a donc dissolution de la structure du ciment durci. Les granulats calcaires eux aussi sont attaqués par les acides. Les granulats siliceux (de rivière ou de mer) ainsi que ceux de porphyres sont résistants. Dans le secteur agricole, l'attaque par les acides est la plus destructrice des agressions citées dans le schéma. Les principaux acides rencontrés sont les acides acétique et lactique.

On les trouve par exemple dans les jus de silos. Les aliments pour animaux en contact avec la salive et tombant à côté de l'auge attaquent également le sol de l'étable ou de la porcherie. La vitesse d'attaque dépend des éléments suivants : le degré d'acidité (pH) de la solution acide.

Un pH entre 6,5 et 5,5 est considéré comme faiblement agressif, un pH entre 5,5 et 4,5 comme moyennement agressif et un pH inférieur à 4,5 (jus de silos par exemple) comme fortement agressif ; les solutions stagnantes sont moins agressives que les solutions ruisselantes et répétées; la solubilité du sel formé. [13]

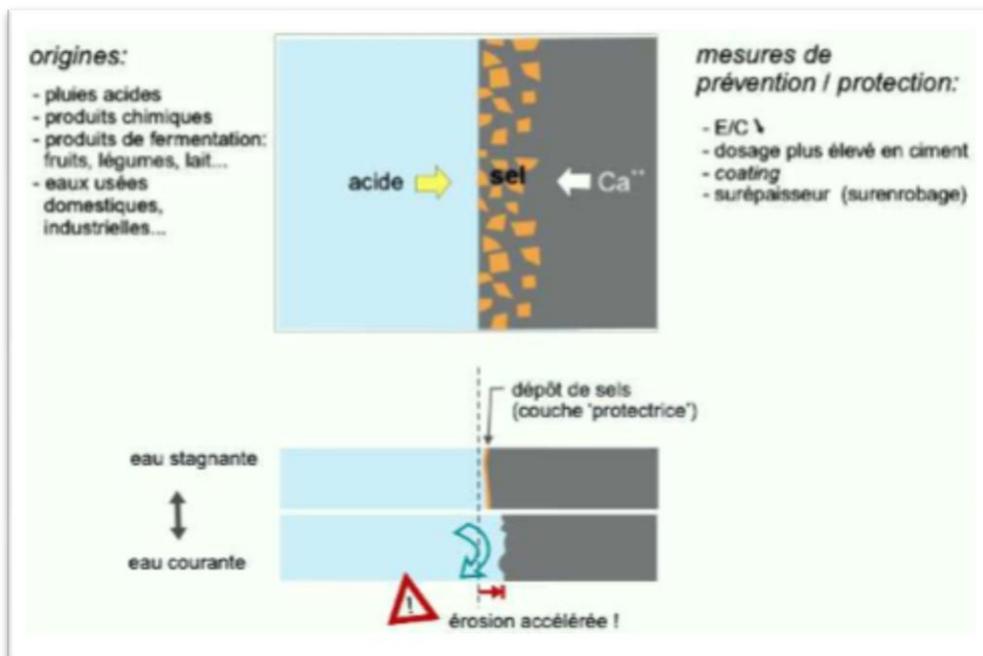


Figure 3.7: action due aux acides. [2]

6.2.1. Acide fort et acide faible :

Les acides forts se dissocient totalement dans l'eau. Parmi ceux-ci, on retrouve l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide nitrique (HNO₃), l'acide sulfurique (H₂SO₄), ... Au contraire, un acide faible ne se dissocie pas totalement dans l'eau.

De ce fait, une augmentation de la concentration d'un tel acide ne conduit pas automatiquement à une diminution du pH. C'est le cas de l'acide carbonique (H₂CO₃), de l'acide acétique (CH₃COOH), de l'acide lactique (C₂H₅OCO₂H), ... Une concentration plus élevée d'acide faible que d'acide fort est nécessaire pour atteindre une valeur de pH donnée.

Le pH ne dépend donc pas uniquement de la concentration de l'acide, mais aussi du type d'acide (faible ou fort). [13]

6.3. Attaque l'eau de mer :

• La durabilité du béton en milieu marin est fonction d'un nombre relativement important de paramètres.

- ✓ Paramètres chimiques (ions agressifs).
- ✓ Paramètres géométriques (marées et fluctuation du niveau de la mer).
- ✓ Paramètres physiques (cycles de gel-dégel, activation par les hautes températures).
- ✓ Paramètres mécaniques (abrasion).

- faible porosité et une faible perméabilité sont essentielles pour obtenir un bon comportement face à l'eau de mer.

-Un béton bien formulé et bien mûris possède généralement une très bonne durabilité face à l'eau de mer.

-Des dégradations peuvent apparaître très rapidement (5 à 10 ans) dans le cas d'ouvrages mal conçus (mauvais recouvrement des armatures) ou fabriqués avec un béton de mauvaise qualité (choix du type de ciment, dosage en ciment trop faible, E/C trop élevé, etc.). [13]

Conclusion

La durabilité des structures en béton, est un des facteurs importants dans le domaine du génie civil et du génie industriel. La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. La durabilité des structures en béton est maintenant devenue un point important, y compris dans l'approche normative des ouvrages, ne serait-ce que parce que les réparations ont un coût non négligeable.

Le béton est soumis à différentes sources de dégradations pouvant diminuer sa durabilité. L'approche performant elle basée sur des indicateurs de durabilité fixés en fonction de l'environnement de l'ouvrage concerné tend à répondre à cette problématique et à augmenter la durée de vie des ouvrages.

1. Introduction :

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

Chercheur	Thème	Type d'essai	Remarque
S. Guettala, B. Mezghiche	Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons 26 au 30 août 2013	des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques	l'utilisation du ciment prémélangé au sable de dune en poudre est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone, améliorer les propriétés physiques et mécaniques des bétons.
Laid BEDADI Mohamed Tahar BENTEBBA	Etude expérimentale d'un béton de sable de dune pour la fabrication des dalles et pré dalles armées et faiblement armées Juin 2011	Essai de consistance Essai de compression Essai de traction Essai ultrasonique	La substitution du sable alluvionnaire très utilisée généralement dans la région d'Ouargla peut être remplacé dans la majorité des bétons avec le sable de dune corrigé par le sable alluvionnaire.

<p>A. Bouaziz, R. Hamzaoui, S. Rezigue, A. Bennabi</p>	<p>Valorisation du sable de dune dans les formulations des mortiers et des bétons 29 au 31 mai 2013</p>	<p>essais de compression, flexion</p>	<p>L'utilisation du sable alluvionnaire dans la formulation du béton, donne des résistances supérieures par rapport à ceux obtenus dans le cas de l'utilisation du sable de dune .</p>
<p>Benchaa Benabed, Lakhdar Azzouz, El-hadj Kadri, Akram Salah Eddine Belaidi, Hamza Soualhi</p>	<p>Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes 6 au 8 juin 2012</p>	<p>essais de compression, flexion</p>	<p>-Les résistances mécaniques des mortiers augmentent avec le temps. -Les mortiers MSAD du sable mélange présentent les meilleures performances mécaniques.</p>
<p>AZZOUZ Hocine</p>	<p>Etude des bétons à base des sables de dune 03/05/2009</p>	<p>essais de compression, flexion la traction par fendage</p>	<p>Le béton à base de sable de dune donne des résistances à la compression satisfaisante. Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative</p>

<p>Gueddouda Mohamed Kamel, Goual Idriss, Taibi Saïd, Abou- Bekr Nabil, Lamara Mohamed</p>	<p>Conductivité hydraulique non saturée du mélange sable de dune-bentonite compacté. 13-15, 2015</p>	<p>Essai de perméabilité.</p>	<p>Les essais préliminaires basés sur le critère de perméabilité satisfait ce critère pour la conception des barrières ouvragées des fonds dès CET.</p>
--	--	-----------------------------------	---

Récemment, une mission analogue dans certaines régions du sud algérien, entreprise dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, a également confirmé cette similarité des caractéristiques des sables de dune de NAAMA.

Le sable de dune peut être considéré comme une source quasi inépuisable de matériau. L'utilisation et l'exploitation future de ce type de sable constituent ainsi une des nouvelles préoccupations des chercheurs et intéressent différents domaines comme la microélectronique, l'énergie solaire (cellule photovoltaïque), la métallurgie, le génie civil, et le génie mécanique. Ses applications et son exploitation sont liées à sa teneur en silice et à la taille, la forme et la nature de ses grains.

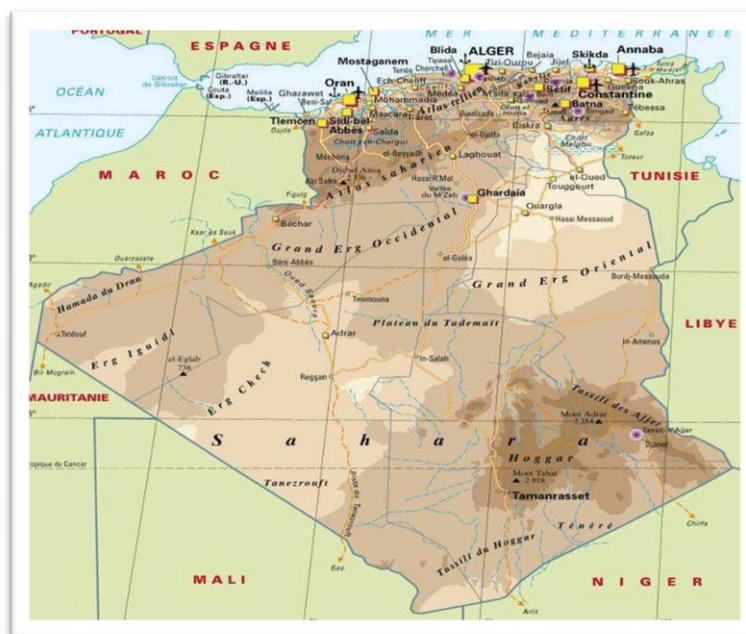


Figure 3.1 : Situation géographique des ergs de l'Algérie [2]

Nous nous sommes donc intéressés à la valorisation de ce type de sable de dune de Naama dans la fabrication de béton car il influence à la fois les propriétés du béton à l'états frais et à l'états durci (résistance mécanique et durabilité) Compte tenu de sa granulométrie (sable très fin, naturellement inférieur à 0.5 mm).

2. Définition de sable :

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0.063 (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaire de coquillage et de corail. [2] (voir figure)



Figure 2.1 : le sable [2]

3. Les classes de sables :

On peut classer les sables selon trois paramètres dont: [14]

a) *La granularité* : permet de séparer les sable en trois catégories sont:

- Sables fins.
- Sables moyens.
- Sables grossiers.

b) *La propreté et la teneur en fines* : elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

c) *La nature minéralogique* : En général, les sables peuvent être classés comme suit:

- Sables siliceux.
- Sables silico-calcaires.
- Sables calcaires.

4. Caractéristiques physicochimique :

Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées. On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluviatile ou marin qui est dit "émoussé-luisant". L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement. [2]



Figure 2.2 : Sable de Largeur de champ = 5,5 mm et 0,50 et 1.0 mm[2]

Le sable est souvent le produit de la décomposition du micaschiste du fait de l'érosion. Ainsi, le plus fréquent de ses composants est le quartz, constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et feldspaths. Un sable issu d'une roche volcanique est plutôt noir tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages. Il peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature : noir ou blanc

Le sable peut aussi prendre d'autres formes : arène, grès.

Les grains de sable sont assez légers pour être transportés par le vent et l'eau. Ils s'accumulent alors pour former des plages, des dunes. Un vent violent qui se charge en sable est une « tempête de sable ». Les grains les plus lourds se déposent en premier dans les milieux à forte énergie (rivière, haut d'une plage), les plus fins dans les milieux à énergie plus faible (delta, lac, bassin, crique).

La masse volumique du sable sec varie, selon sa granulométrie et sa composition, de 1,7 à 1,9 kg/l (en moyenne 1 850 kg/m³). [2]

5.Écologie des milieux sableux :

Des fonds marins aux déserts de sables en passant par les fonds de fleuves et rivières et les plages, un grand nombre d'espèces sont adaptées à un cycle de vie se déroulant pour toute ou en partie dans le sable.

La flore des sables est maintenant assez bien connue, mais l'écologie de la microfaune interstitielle du sable et l'écologie du sable sont encore des disciplines balbutiantes, bien que nées dans les années 1930 au moins (avec une thèse universitaire de Robert William Pennak) et quelques études sur la plage considérée comme écosystème. Difficiles à étudier dans le milieu naturel (sur la zone intertidale notamment), on les étudie parfois en laboratoire.

Sur terre et en zone sèche ou drainante les plantes sont souvent épineuses (cactées, panicauts...), crassulacées ou adaptées à la conservation de leur eau et fixatrices du milieu (Oyats)

Dans les sables anciens, humides, oligotrophes et acides, les animaux fouisseurs tels que les vers de terre ne survivent pas, mais des minuscules enchytraeidae (qui ressemblent à des vers de terre translucides ou blancs) peuvent être abondants.

Les dunes sont habitées et stabilisées par des organismes halophiles adaptés à des conditions de vie difficiles, notamment dans les pays froids ou chauds. Dans tous les cas, entre les grains de sables, à l'abri des ultraviolets solaires vivent des communautés d'organismes microscopiques. Même dans les zones où il gèle presque toute l'année, des microorganismes et des tardigrades peuvent être trouvés. [2]

6. les familles de sables :

On distingue Trois familles:

- **Les sables roulés siliceux (0 /2) :** dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.



Figure 2.3 : le sable roulé siliceux [2]

- **Les sables de concassage calcaires** sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.



Figure 2.4: les sables de concassages calcaire. [2]

- **Le sable de dune** qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités . [14]



Figure 2.5 : le sable de dune [2]

7. Les sables de dunes:

7.1. Définition :

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. D'après Fookes et Higginbotham (1968). le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques,

15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux.[15]

7.2. Qu'est-ce qu'une dune ?

Une dune est un relief ou un modelé composé de sable.

Une dune présente un profil transversal dissymétrique avec une pente douce du côté du vent et une pente plus raide du côté terre. La dune bordière délimite le haut de la plage par un bourrelet sableux de un à quelques mètres de haut. Sa base correspond à la haute mer et peut être endommagée lors des tempêtes. En arrière de ce premier cordon, on peut voir se développer un champ de dunes montrant des formes différentes : dunes alignées, dunes paraboliques, dunes en râteau... plus ou moins fixées par la végétation. [2]



Figure 2.6: la dune de Sahara algérienne. [2]

7.3. Intérêt de sable de dune :

L'intérêt d'utilisation de tels agrégats se situe à deux niveaux : technique et économique.

7.3.1. Les aspects économiques :

Les aspects sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement. [14]

7.3.2 Les aspects techniques :

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance. Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base. [14]

7.4. Type de dune :

1. **les avant-dunes** (fore dune en anglais), qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemple), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est-à-dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. Elle est différente d'une ancienne arrière dune en cours d'érosion, et d'une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur où une avant-dune active ne pourrait pas se former. En Espagne et en Tunisie, ces avant-dunes sont systématiquement considérées comme faisant partie du domaine public maritime, ce qui facilite leur protection. L'avant-dune se forme à partir de fixation du sable en haut de plage, par des plantes pionnières spasmophiles,
2. **les falaises dunaires** (dune cliffe en anglais) est plutôt un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux.
3. **les dunes perchées** (cliffe-top dune en anglais) apparaissent au sommet d'une falaise vive. Elles sont alimentées en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire.
4. **les cordons dunaires artificiels** sont construits par l'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. Ils nécessitent un entretien permanent, sans lequel ils se désintègrent en quelques décennies. Certains cordons sont ainsi semi-naturels (ex : avant-dunes plus ou moins

dégradées rectifiées par des engins et fixées par des oyats à Sangatte dans le Nord de la France.) [2]

➤ **type complexe :**

Tous ces types de dunes peuvent exister sous trois formes : simple, composée et complexe. Les dunes simples sont des collines avec un nombre minimal de côtés escarpés qui en définissent la typologie géométrique. Les dunes composées sont des plus grandes dunes, surmontées de dunes similaires plus petites. Les dunes complexes sont, elles, formées de plusieurs types de dunes différents.

Une dune en demi-lune soutenant une dune en étoile est une des dunes complexes les plus communes. Les dunes sont simples quand le vent reste constant pendant leur formation. [2]

7. 5. Les formes de sable de dune :

Il existe trois formes :

- La forme la plus commune sur la Terre (et sur Mars) des dunes est celle en demi-lune, aussi appelée transversale ou barkhane en forme de croissant. Les collines en demi-lune sont, généralement, plus larges que courtes Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels
- la dune parabolique sont en forme de U. Elles sont typiques des déserts côtiers. La plus longue dune en parabole connue mesure 12 kilomètres. Ce type de dune se forme quand, aux extrémités d'une formation sableuse, commence à apparaître de la végétation qui en arrête la progression, tandis que la partie centrale continue à avancer. Elles se forment quand le vent ne souffle que dans une seule direction dominante.
- les siouf ou SIF, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité. [16]

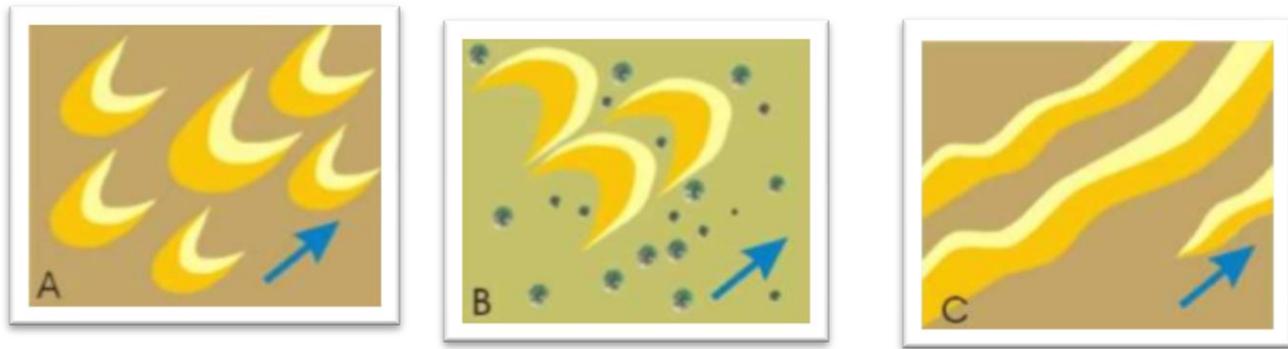


Figure 2.7 : Les formes de dunes. [16]

A: barkhanes ; B: dunes paraboliques ; C: dunes longitudinales

La flèche bleue indique la direction du vent dominant

7.6 .Les différents milieux de la dune :

Les dunes sont composées de milieux différents, On distingue différents types de dunes : les dunes mobiles peu ou pas fixées par la végétation (oyats, chiendents des sables etc.) ou dunes blanches, les dunes « reliques » définitivement fixées par la végétation comme les dunes grises (mousses, lichens, argousiers, etc.), les dunes noires (arbres) et les dunes fossiles recouvertes par des dépôts sédimentaires autres que le sable.

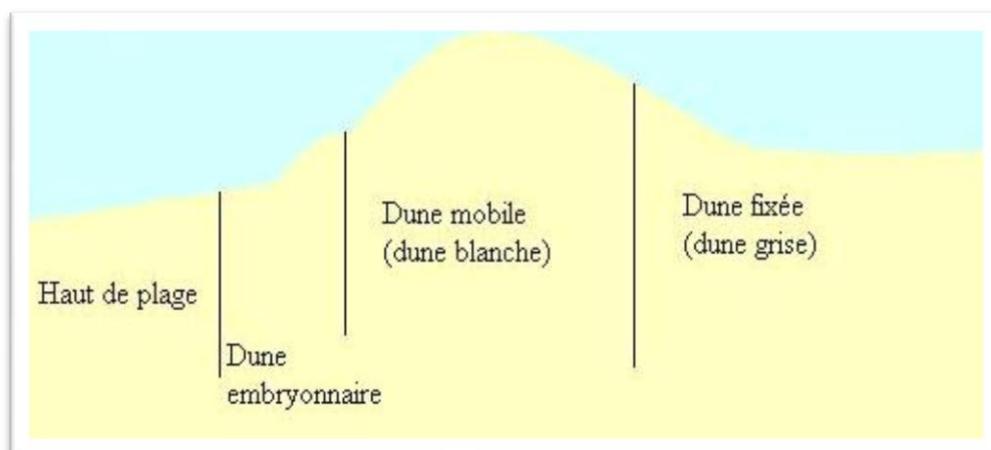


Figure 2.8: coupe transversale des différents milieux de la dune [2]

- **la dune verte** (appelée aussi avant-dune ou dune embryonnaire) : végétation pionnière des hauts de plage s'installant sur une dune en formation ou à la base d'une dune mobile, dominée par des peuplements clairsemés de psammophytes de type chiendent des

sables, Renouée maritime, Pourpier de mer, Soude brûlée, Cakilier maritime, Panicaut maritime, Euphorbe maritime et liseron des dunes. [2]



Figure2.9 : Dune verte [2]

Ces plantes favorisent l'installation de macro mycètes saprotrophes et fixent le sable, formant des buttes sableuses néoformées appelées nebkas et peuvent aboutir à son accrétion sous forme d'une accumulation subhorizontale située en pied de dune (banquette surélevée de quelques décimètres par rapport au haut de plage).

Cette dune est normalement éphémère, qu'elle soit balayée par les vagues de tempête ou qu'elle se transforme en un autre type plus évolué, la dune bordière où l'emplacement des obstacles primitifs n'est plus individualisable. [2]

- **la dune blanche ou jaune:** partie de la dune littorale mobile colonisée par l'Oyat, plante fixatrice adaptée à une assez faible salinité du substrat (2 % maximum) à laquelle s'associent d'autres espèces spasmophiles (Panicaut des dunes, Achillée maritime, giroflée des dunes, chou marin, liseron des dunes, gaillet des sables, Lis maritime).

Elle comprend un glacis externe ou une falaise sableuse et un plateau dunaire caractérisés par des formes de déflation (siffle-vent qui peut évoluer en couloir ou plaque de déflation, caoudeyre, dune parabolique) et des zones d'accumulation marquées (tuc, poudrières). À la dune vive succède une dune semi-fixée caractérisée par une accumulation moindre des sables soufflés par les vents (ces derniers étant majoritairement arrêtés par la dune blanche) et le développement d'une végétation dense en tapis. [2]



Figure 2.10 : la dune blanche ou jaune [2]

- **la dune grise** : partie de la dune sous le vent correspondant au talus interne de la dune blanche, où pénètrent des plantes herbacées fixatrices succédant aux espèces pionnières, le tout évoluant peu à peu vers une pelouse constituée d'un tapis dense de mousses et lichens (accompagnés de l'Immortelle des dunes, la Linaire des sables, la rose pimprenelle, l'œillet des dunes, l'Ophrys passion (**It**), la Canche blanchâtre (**en**), la Luzerne marine, le raisin de mer, le Chardon champêtre, le thym serpolet ou les Orobanches) qui enrichit le sable de matière organique et d'humus. Il existe souvent, au sein de cette dune et à l'arrière de celle-ci, des cuvettes naturelles ou artificielles (mares de chasse, prélèvements de sédiments) dont une partie est, au moins temporairement, en contact avec la nappe phréatique. [2]



Figure 2.11: la dune grise [2]

- **la dune noire** : la pelouse basse fait place à une pelouse haute envahie par des Bryophytes du genre *Tortula*, aux teintes brun foncé à noires lorsqu'elles sont sèches. [2]



Figure 2.12: la dune noire [2]

- **la dune brune (dune boisée ou frange forestière)** : la pelouse est progressivement remplacée par des prairies enrichies d'espèces pré-forestières (*Saule des dunes*, *Rosiers*), puis par des buissons et fourrés (*Ajonc*, *Prunelliers*), arbustes (espèces consolidatrices succédant aux fixatrices, du type *argousier*, *églantier*, *sureau*, *troène*...), voire un boisement littoral. [2]



Figure 2.13: la dune brune [2]

7.7. La dune littorale :

Les dunes littorales ou dunes bordières se forment sur le long des côtes basses où les vents et l'apport de sédiments par la dérive littorale permettent l'accumulation de sable sur les plages. À marée basse, le haut de plage est asséché par le vent ce qui permet le transfert des sables

vers l'intérieur des terres, essentiellement par roulage et saltation. La largeur de l'estran est donc un facteur primordial du bon développement des dunes: plus il est large, plus la surface de déflation éolienne et donc la quantité de sédiments soufflés sont importantes. Dans le processus de formation des dunes, les plantes pionnières jouent un rôle fondamental, assurant le dépôt, la fixation et la stabilisation de l'accumulation dunaire. Ces plantes sont adaptées à l'instabilité du substrat et présentent de longues racines traçantes.



Figure 2.14: Dune baltique [2]

La dune littorale est donc une forme d'accumulation sédimentaire fixée par une végétation spasmophile, il s'agit d'une construction bio géomorphologique. [2]

7.7.1 : Le mouvement de dune littorale :

Les dunes littorales, poussées par les vents, peuvent envahir graduellement les terres si la topographie de l'arrière-côte le permet; ce fut l'une des raisons de leur fixation le long de la côte landaise par la plantation d'une forêt de pin maritime. Lors des tempêtes, les dunes constituent une réserve de sable face à l'érosion des vagues: l'attaque directe des vagues entaille la dune et le sable prélevé est transféré dans les petits fonds. Il remonte normalement lors des périodes de calme sous l'action des houles. [2]

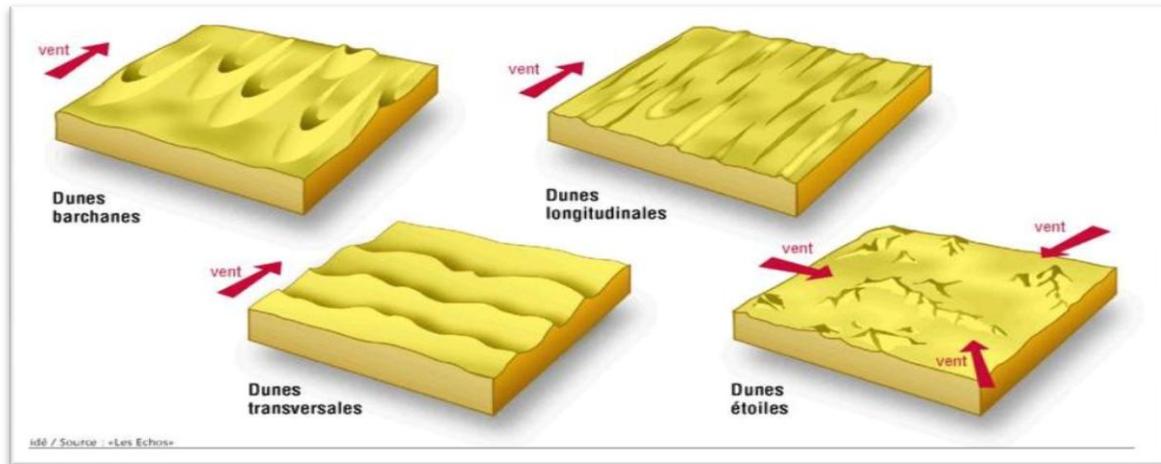


Figure 2.15: mouvement des dunes. [2]

7.7.2. La formation des dunes littorales:

La formulation des dunes littorales nécessite des conditions particulières:

- un stock de sable disponible apporté par les fleuves, la mer (bancs de sable au large) ou puisé dans les falaises.
- un vent de mer dominant et de vitesse suffisante pour déplacer les grains de sable.
- des obstacles aptes à piéger le sable : laisse de mer (débris divers et algues échoués sur la plage - photographie), végétation, topographie de la plage, etc.

7.8. : Mécanismes de formation :

Les dunes se forment dans des zones où le sable est abondant et non fixé par la végétation (désert, plage, lit fluvial à l'étiage). Le sable est érodé et pris en charge par le vent (déflation). Il est transporté aux ras du sol par saltation, puis s'accumule quand la compétence du vent chute (versant sous le vent). Une dune peut se déplacer par érosion du versant au vent et accumulation sur le versant opposer.

Le même processus peut se produire sous l'eau à la faveur d'un courant marin (dune hydraulique), par exemple dans le pas de Calais où elles abritent peu d'espèces mais des espèces rares et inféodées à ce milieu. [2]

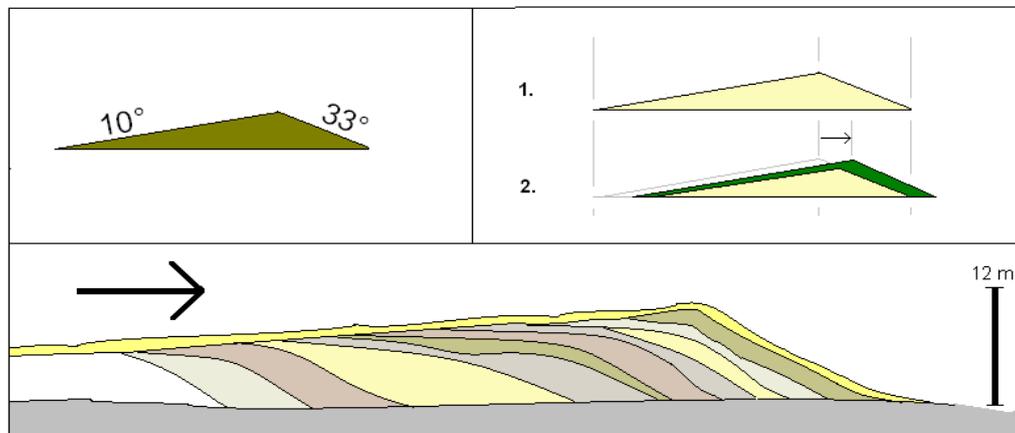


Figure 2.16: La formation dunaire [2]

7.9 : Physique des dunes :

Nous connaissons tous, au moins par des photos ou les images de télévision, les étendues majestueuses de dunes ressemblant à une mer de sable dans le désert.

Leurs formes répétitives modelées par le vent couvrent d'immenses surfaces et leurs déplacements menacent aussi bien les zones de cultures que les routes ou même les villes. Malgré cela, le mouvement des dunes était encore très mal compris faute d'équations rendant compte des mouvements superficiels des grains de sable sous l'action hydrodynamique du vent. En effet, il est hors de question de suivre les trajectoires de chacun de 10^{10} à 10^{12} grains d'une dune. Pourtant, grâce à une meilleure compréhension de la physique des milieux granulaires et grâce à la puissance des moyens informatiques actuels.

Une barkhane est une dune la plus étudiée à cause de sa simplicité par rapport à l'entière forme dunaire et à cause de sa vitesse de déplacement (jusqu'à 50-60 mètres par an), de la forme d'un croissant allongé dans le sens du vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels.



Figure 2.17: La barkhane (Sud-Marocain) [14]

Le vent fait rouler le sable pour qu'il remonte la pente du dos de la dune jusqu'à la crête et vienne former de petites avalanches sur le versant plus pentu du front. Ce phénomène fait avancer la dune. Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane

Elles se forment dans des conditions particulières avec des volumes de sable limités et se déplacent sur un substrat stable sous l'action d'un vent qui vient toujours de la même direction. Leur crête sépare le dos de la dune, incliné de 5 à 20° et le front nettement plus raide (32 à 35°) qui se prolonge par deux cornes dans la direction du vent.

L'évolution et la forme d'une dune, de connaître celle du champ de vent correspondant. Celui-ci est en général dans un régime turbulent en trois dimensions développé à toutes les échelles autour de la topographie dunaire. Mais en moyenne, le profil de vitesse en fonction de la hauteur suit une loi logarithmique établie depuis Prandtl en 1925, avec, à sa base, une "couche-limite" dans laquelle l'écoulement est essentiellement laminaire où les grains sont arrachés et transportés. [14]

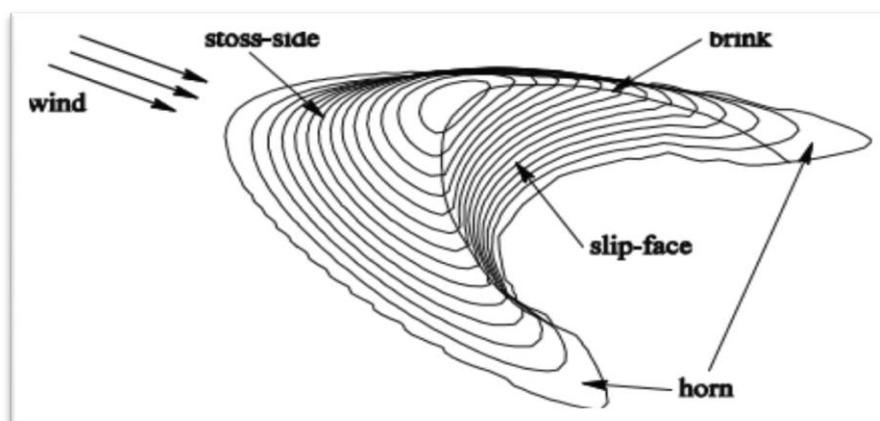


Figure 2.18: la morphologie de la barkhane. [14]

7.10 .Propriétés:

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable. Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes. Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°.

Le sable est utilisé pour faire du béton et comme matière première du verre. Il peut être utilisé pour filtrer les liquides. Du fait de sa facilité de manipulation, il est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de lest ou pour protéger (sac de sable contre les éclats d'explosion et les balles).

Il est aussi utilisé comme abrasif dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques. Le sable est également un élément important de l'industrie touristique, lorsqu'il est présent sur les plages et les dunes où il est également un élément indispensable à la protection de la côte.
[14]

7.11. Utilisation du sable de dunes:

7.11.1 : Diverses utilisations :

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique: remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux.

Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires; ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain), de la magnétite (oxyde de fer), de l'ilménite (oxyde de titane et de fer), etc.

Les placers d'ilménite, ou «sables noirs», sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane métal.

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels: érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée; destruction à terre de la nappe phréatique, etc. [14]

7.11.2 .Utilisation du sable de dunes dans le béton:

Le sable de dunes était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers, mais l'utilisation comme constituant principal du béton n'apparaît qu'après la naissance du béton de sable en 1853 par F.COIGNET (Rapport général et conclusion de 23e congrès mondial de la route). Cette naissance a donné le courage de commencer une nouvelle investigation qui a étudié la possibilité d'utiliser le sable de dunes comme un constituant principal dans les structures des ouvrages en génie civil; pour cette raison plusieurs actions de recherches, soit en Algérie ou à l'étranger, ont été engagées et hypothéquées.

7.11.3 : Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur le sable de dune telle que, définition d'un sable de dune, différents formes des dunes, Intérêt de sable de dune, et on a parlé aussi sur les devers utilisations des sable de dune comme il constitue l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, son utilisation dans la formulation de mortier, qui on va l'expliqué dans le chapitre suivant.

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps caractériser les matériaux employés dans Cette étude en présentant leurs propriétés chimiques et physiques. Les compositions des mortiers seront ensuite détaillées après avoir expliqué la méthode de formulation utilisée.

Les procédures de fabrication et de séquence de malaxage mises en place seront également définies.

Notre étude portera sur l'adaptation du sable de dune dans la composition de mortier, par la correction d'un autre sable. Dans notre cas, la correction est faite avec le sable de carrière, Son intérêt réside de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité.

2. Caractéristique des matériaux utilisés :

Afin de définir les caractéristiques des composants du mortier, nous avons réalisé les essais suivants :

- Masse volumique absolue et apparente,
- Analyse chimique
- Bleu méthylène
- Equivalent de sable
- Analyse granulométrique
- Module de finesse
- Matière organique
- Teneur en eau
- Foisonnement de sable

3. Sable :

Dans notre étude, on a utilisé deux sables :

- Sable de dunes de Naama « SD1 »
- Sable de carrière SACOA de Bénie-Saf « SD2 »



Figure 4.1 : Sable de dunes de NAAMA



Figure 4.2 : Sable de carrière SACOA

Nous avons utilisé le sable de dune prélevé de la wilaya de Naâma, située à l'ouest de l'Algérie, à la frontière avec le Maroc. Elle est voisine au nord avec les wilayas de Tlemcen et Sidi-Bel-Abbès, à l'est celle d'El-Bayadh et au sud celle de Béchar.



Figure 4 .3: carte d'Algérie (wilaya de NAAMA) [2]

3.1.1 Les essais utilisés dans le sable de dune :

a. Analyse chimique :

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de LTPO d'Oran

Elles sont résumées dans le tableau suivant :

éléments	La silice brute (HCL et NH ₄ CL)	Dosage de l'oxyde de calcium (Cao)	Dosage de l'oxyde de fer (FeO ₃)	Dosage de l'oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	L'anhydride sulfurique (SO ₃)	Evaluation des carbonates (caco ₃)
(%)	89.7	1.63	0.35	0.30	Nul	1.87

Tableau 4 .1 : Analyse chimique de sable de dune.

b. Détermination de bleu méthylène ou (la tache) norme P94 6068 :

Les molécules de bleu de méthylène ont pour propriété de se fixer sur les surfaces externes et interne des feuillets d'argile, la quantité de bleu adsorbée par 100gramme de sol s'appelle « Valeur Au Bleu » du sol et est notée VBS, la VBS reflète globalement :

- La teneur en argile (associée à la surface externe des particules).
- L'activité de l'argile (associée à la surface interne)



Figure 4 .4 : Analyse de bleu méthylène



Figure 4 .5 : résultat de bleu méthylène

Résultat :

La valeur du bleu du sol est donnée par :

$$VBS = B/M0 * 100 \dots\dots\dots \text{Equation 4.1}$$

La masse de bleu de introduite (en gramme) :

$$B = V * 0.01 = 0.45 \dots\dots\dots \text{Equation 4.2}$$

V = volume du bleu ajouté en cm³ = 45ml

M0 = 120 g

VBS = 0.2

Valeur de bleu de sol	Nature de sol
< 0.2	Sols sableux
0.2 - 2 .5	Sols limoneux
2 .5- 6	Sols limoneux – argileux
6-8	Sol argileux
>8	Sol très argileux

Tableau 4. 2 : Valeur de bleu méthylène de sable de dune.

- Notre essai et de nature de valeur de bleu de notre sol est sols sableux.

c. Analyse granulométrique sable de dune « SD1 »

Bute :

Cet essai "analyse granulométrique" nous permet d'identifier des sols, les classer et même également les nommer.

Principe

L'essai Analyses granulométriques consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis et passoirs reposants sur un fond de tamis un matériau en plusieurs classes de tailles décroissantes.

Appareillage spécial pour l'analyse granulométrique :

- balance et différents poids
- tamis en mm (20-16-12,5-10-8-6,3-5,4-3,5-1-0,2-0,08)
- vibreur de tamis



Figure 4 .6 : vibreur de tamis



Figure 4 .7 : tamis en mm

Calcule :

- (Pc) : passe cumulé= (en %)
- Et le passant= 100 – (pc).....Equation 4.3

Module de finesse :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat, Le module de finesse est égal au 1/100 e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm

- Norme Française [NFP 18-540] :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.50 - 5 \} \text{ Equation 4.4}$$

- Norme Européenne [EN 12620]

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0.125 - 0.25 - 1.50 - 1 - 2 - 4 \} \text{ Equation 4.5}$$

Lorsque M F est compris entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier.

Notre résultats et résumé dans le tableau suivant :

Tamis	Refus cumulés		Tamisat	Module de finesse
Dia mm	Poids	%	%	%
6.3				0.90
5			100	
2.5			100	
1.25			100	
0.63	21.33	2.13	97.87	
0.315	57.3	5.73	94.27	
0.16	825.89	82.59	17.41	
0.08	973.13	97.31	2.96	

Tableau 4. 3 : tamisage de sable de dune << SD1 >>

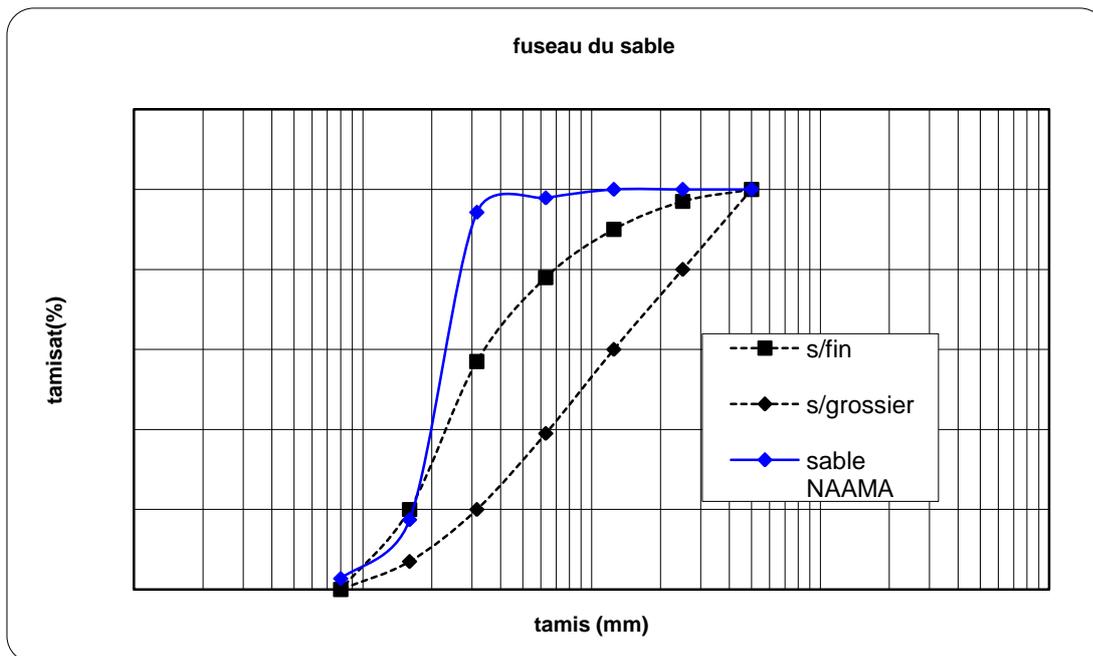
GRAPHE :

Figure 4. 8: Granulométrie par tamisage de sable de dune « SD1 »

- L'analyse granulométrique du sable de dune utilisé montre que la granulométrie est très serrée et son module de finesse est de l'ordre 0.9. Ce sable ne s'inscrit pas dans le fuseau Granulaire.

d. Equivalent de sable :

Essai d'équivalence de sable est spécifique aux sols grenue, il nous permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible argileuse dans les sols ou les agrégats fins : il est effectué sur des éléments de diamètre 5 mm

Son importance est capitale car la présence des éléments fins peut modifier le comportement rhéologique du matériau.

Principe:

L'essai équivalent de sable s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5 mm ; il prend en compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins.

Matériaux utilisés :

- La solution flocculant
- Cylindre gradué
- L'échantillon
- Le piston



Figure 4 .9: Résultat d'équivalent de sable

Calcule :

L'équivalent de sable est donné par la formule suivante :

$$ES = 100 \times \frac{h_2}{h_1} (\%) \dots \dots \dots \text{Equation 4.6}$$

H2 : sable propre seulement

H1 : sable propre + élément fins

Résultats résumé dans le tableau suivant:

	H1	H2	ES (%)	ES moyenne (%)
ESSAI 1	19	18.9	32.6	32.43
ESSAI 2	6.2	6.1	32.7	

Tableau 4. 4: Résultats Equivalent de sable de sable de dune

ES	Nature et qualité de sable
ES < 60	Sable argileux- n'est pas utilisable au béton
60 ≤ ES < 70	Sable légèrement argileux- de propreté admissible pour béton de qualité quant ou ne craint pas particulièrement de retrait
70 ≤ ES < 80	Sable propre- à faible pourcentage de fines argileuses- convenant parfaitement pour le béton haut qualité
ES > 80	Sable très propre – l'absence presque totale de fine sol argileux risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Tableau 4. 5: Nature et qualité ES du sable.

D'après notre résultat nous concluons le sable de dune de NAAMA c'est un sable argileux il provoque un Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.

e. La masse volumique apparente et absolue :

➤ La masse volumique apparente :

Définition :

- La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.
- La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.



Figure 4 .10: Les matériaux de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad \text{En g/cm}^3 \dots\dots\dots \text{Equation 4.7}$$

M1 : masse de récipient = 1503.46 g

M2: masse de récipient remplie = 2903.46 g

V : volume de récipient = 979.71 cm³

Résultats de notre essai :

$$\rho_{app} = 1.428 \text{ g/cm}^3$$

➤ **La masse volumique absolue :**

- La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.
- La masse volumique absolue est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{p_3 - P_1}{(p_2 - p_1) - (p_4 - p_3)} \dots\dots\dots \text{Equation 4.8}$$

P1 : pycnomètre vide = 107.23g

P2 : 1L+ masse de pycnomètre vide = 1107.23g

P3 : masse de pycnomètre + masse de sable = 607.23g

P4 : masse de pycnomètre + masse de sable + eau = 1413.35

Résultats de notre essai :

$$\rho_{abs} = 2.6 \text{ g/cm}^3$$

f. Teneur en eau :**Définition :**

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

Bute :

Détermination de la quantité d'eau contenue dans un sol.



Figure 4.11 : les échantillons avant l'étuve
du C.U.A.T



Figure 4.12: Étuve du laboratoire de MDC



Figure 4.13 : les échantillons après l'étuve

Calculer la W par la formule suivante :

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{M_h - M_s}{P_s} \dots\dots\dots \text{Equation 4.9}$$

E : poids de l'eau dans le matériau.

P_s : poids de matériaux sec.

P_h : poids de matériaux humide

Si W en exprime en% : $W\% = 100 \times \frac{M_h - M_s}{M_s} \dots\dots\dots \text{Equation 4.10}$

Résultats :

Elle est résumée dans le tableau suivant:

Essai	MH	MS	W%
1	21.6	20.6	4.62
2	21.6	20.7	4.34
3	25.1	24	4.58

Tableau 4. 6: Résultats Teneur en eau de sable de dune

g. Foisonnement de sable :

Définition et But :

La masse volumique apparente d'un granulat dépend de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que le degré de compactage et de l'humidité. La valeur apparente est utilisée dans le cas où l'on effectue les dosages en volume des différentes composantes du béton. Cette méthode toutefois présente des risques certains à cause du foisonnement.

Principe :

L'essai consiste à mesurer la variation de la masse volumique apparente d'un échantillon de sable en fonction de l'accroissement progressif de sa teneur en eau.

Matériel utilisé :

Le même matériel utilisé pour la mesure de la masse volumique apparente d'un agrégat.



Figure 4.14 : Les matériaux de Foisonnement de sable

Résultat :

Pour déterminer le coefficient de foisonnement de sable par la formule suivante :

$$\mathcal{F} = \frac{Mv1}{Mv2 \times (1+W) - 1} \dots \dots \dots \text{Equation 4.11}$$

Mv1: Masse volumique apparente du granulat sec [kg / m³]

Mv2 : Masse volumique apparente minimale du sable remanié [kg / m³]

W : Teneur en eau correspondante [%]

%	MASSE (g)	F
2	2582.7	0.75
3	2479.6	0.783
5	2417.1	0.78
10	2496.4	0.72
15	2571.3	0.67
20	2872.7	0.58

Tableau 4. 7: Résultats Foisonnement de sable de dune.

h. Matière organique norme XP P 94-047 :

Définition :

Teneur en matières organiques par calcination CMOC : Rapport de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon, détruites par calcination, sur la masse sèche des particules solides avant calcination de la fraction du matériau passant au tamis de 2 mm.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement séché, après calcination dans un four à une température de 450 °C.

Appareillage :

- Une balance dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la valeur de la masse mesurée.
- Des bacs pour passage des échantillons à l'étuve.
- Des capsules ou creusets avec leur pince de manutention.
- Un mortier avec son pilon ou un vibro-broyeur.
- Un four à calcination réglable à une température comprise entre 450 °C et 500 °C.
- Des tamis dont un tamis à ouverture carrée de 2 mm de côté.
- Une enceinte avec un dessiccateur.
- Une enceinte thermique ou étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C de classe d'exactitude C comme défini dans l'annexe A de la norme NF X 15-016 pour ce qui concerne la température uniquement.



Figure 4.15: four à 450 °



Figure 4.16 : Les matériaux de Matière organique

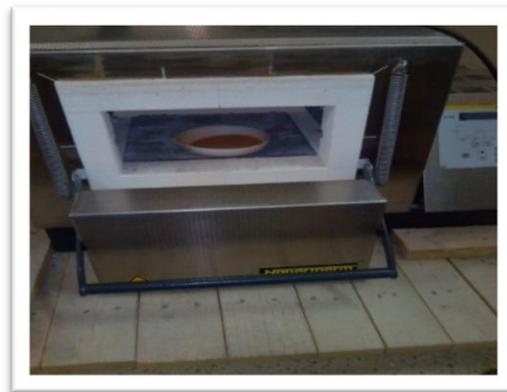


Figure 4.17: les échantillons après calcination

Expression des résultats :

La teneur en matières organiques est calculée à partir des pesées effectuées.

La teneur en matières organiques de la fraction granulométrique inférieure à 2 mm est la moyenne arithmétique des n prises d'essai et est exprimée en pourcentage arrondi au nombre entier.

$$C_{MOC} = 1/n \sum (m_1 - m_2) / (m_1 - m_0) \dots \dots \dots \text{Equation 4.12}$$

Résultat :

Essai 1 :

M0 : masse de sable = 50 g

M1 : creusé vide + sable = 152.71g

Essai 2 :

M0 : masse de sable =50 g

M1 : creusé vide+ sable= 149.44g

Après l'étuve de température de 450°C :

ES1 M2= 152.25g

ES2 M2=149.08g

⇒ C_{MOC} moyenne= 0.004

3.2 Sable de carrière << SD2>>:

Nous avons utilisé le sable de dune prélevé de l'EURL SACOA béni Saf, wilaya de d'Ain Temouchent, à l'analyse de sable en provenance de la carrière SKHOUNA béni Saf.

Ce sable peut être utilisé dans les bétons hydrauliques, tout en veillant sur l'homogénéité du front de taille de la carrière.

3.2.1 Les essais utilisés dans le sable de carrières :**a. Analyse granulométrique :**

Notre résultats et résumé dans le tableau suivant :

Tamis Dia mm	Refus cumulés		Tamisat %	Module de finesse %
	Poids	%		
6.3				3.20
5			100	
2.5	233.7	23.23	76.63	
1.25	619.9	61.99	38.01	
0.63	755.01	75.50	24.50	
0.315	786.7	78.67	21.33	
0.16	801.7	80.17	19.8	
0.08	821.6	82.16	17.84	

Tableau 4.8 : tamisage de sable de carrières << SD2>>.

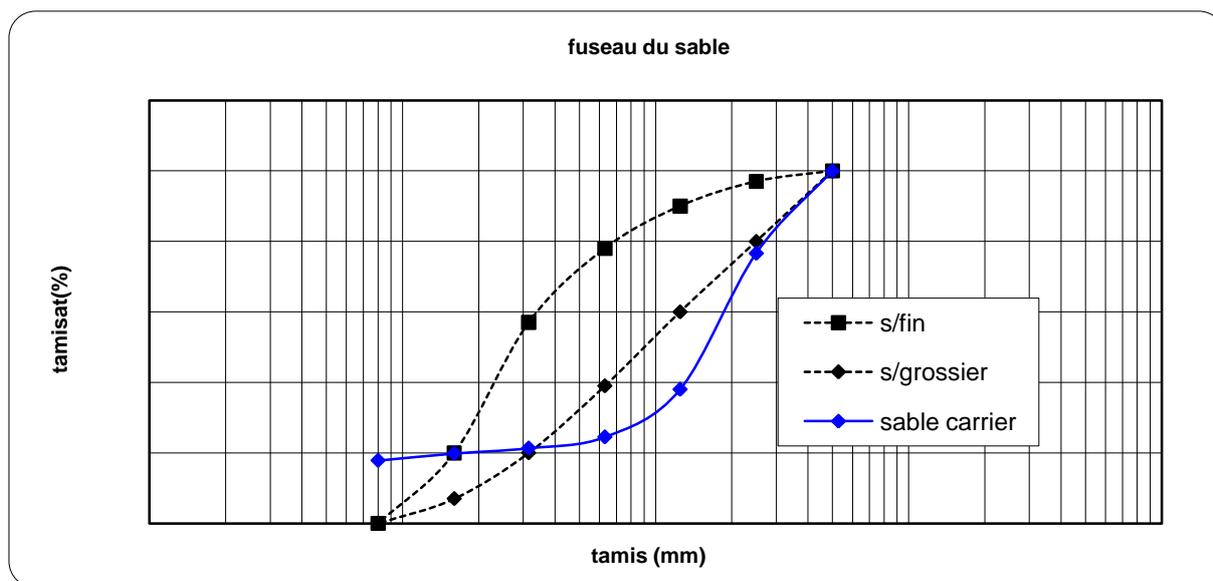
Graphe :

Figure 4.18: Granulométrie par tamisage de sable de carrières << SD2 >>.

- L'analyse granulométrique du sable de carrières, utilisé montre que la granulométrie est très serrée et son module de finesse est de l'ordre 3.2. Ce sable ne s'inscrit pas dans le fuseau Granulaire.

b. Analyse physiques :

ESSAIS	VALEURS		
Equivalent de sable	ES1 (%)	ES2 (%)	ES moyenne (%)
	83.50	83.67	84
La masse volumique apparente	1.518 g/cm ³		
La masse volumique absolue	2.642 g/cm ³		
Essai de bleu méthylène	VBS=0.041		

Tableau 4.9 : Caractéristiques physiques de sable de carrières << SD2 >>

3.3 Le sable corrigé :

C'est un mélange de deux sables :

Sable de dune <<SD1>> et sable de carrière <<SD2>>



Figure 4.19: le sable corrigé

Les normes préconisent pour un bon sable à béton, un module de finesse de l'ordre de 1.8 à 3.2. En utilisant la méthode théorique, en prenant un sable de dune avec un module de finesse MF=0.90 qu'on va corriger avec le sable de carrière dont le module de finesse MF= 3.20

Suivant les formules suivantes, on peut obtenir un mélange dont le module de finesse fixé au préalable à MF= 1.80

Le sable est corrigé d'après la formulation suivante:

$$SD1 = \frac{Mfm - mf2}{Mf1 - Mf2} = \frac{1.8 - 3.2}{0.9 - 3.2} = 60.87\% \dots\dots\dots \text{Equation 4.13}$$

$$SD2 = \frac{Mfm - mf1}{Mf1 - Mf2} = \frac{1.8 - 3.2}{0.9 - 3.2} = 39.13\% \dots\dots\dots \text{Equation 4.14}$$

a. Analyse granulométrie :

Tamis	Refus cumulés		Tamisat	Module de finesse
Dia mm	Poids	%	%	%
6.3				1.80
5			100	
2.5	81.8	8.18	91.82	
1.25	201.1	20.91	79.89	
0.63	286.1	28.61	71.39	
0.315	424.1	42.41	57.59	
0.16	809.39	80.94	19.06	
0.08	896.61	89.66	10.34	

Tableau 4.10 : tamisage de sable corrigé

Graphe :

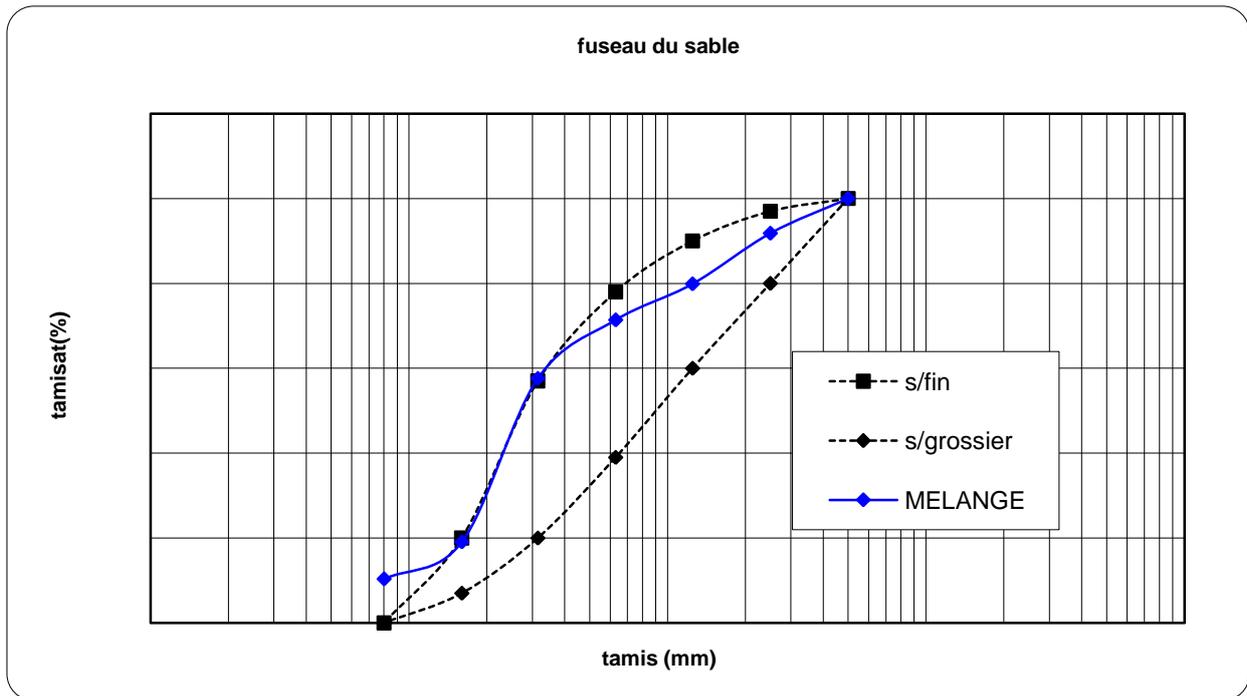


Figure 4.20: Granulométrie par tamisage de sable corrigé

- L'analyse granulométrique du sable corrigé 60.87% sable de dune et 39.13 % sable de carrière montre que la granulométrie est bien étalée et continue, avec le module de finesse de 1.80. Ce sable s'inscrit dans le fuseau granulaire.

b. Analyse physiques :

ESSAIS	VALEURS		
Equivalent de sable	ES1 (%)	ES2 (%)	ES moyenne (%)
	76.9	79.41	78.15
La masse volumique apparente	$\rho_{app} = 1.632 \text{ g/cm}^3$		
La masse volumique absolue	$\rho_{abs} = 2.638 \text{ g/cm}^3$		

Tableau 4.11 : Analyse physiques du sable corrigé.

4. Ciment :

Ciment portland avec ajout :

Le ciment qu'on a utilisé est un ciment portland avec ajout (CPJ-CEM II/42.5A) de la cimenterie de BENI SAF Ain Témouchent.



Figure 4.21: Le ciment utilisé.

Analyse chimique et minéralogique elle est contenue dans le tableau :

Tableau 4.12 : Composition chimique du ciment de Béni-Saf

Composition chimique	SiO ²	CaO	Al ₂ O ³	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ³	Perte au feu	CaO libre	R.I	K ₂ O	Na ₂ O
Teneur %	27.97	56.37	5.43	3.05	0.71	2.53	3.11	0.75	9.11	0.43	0.30

Tableau 4.13 : Composition minéralogique du ciment de Béni-Saf

composants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CS
Teneur en %	59.98	2.15	9.87	9.31	2.94

5. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais de formulation de mortier, est une eau courante de robinet de laboratoire de génie civil de notre université.

Analyse chimique de l'eau de gâchage :

Essais	L'anhydride carbonique (CO ₂) en (mg/l)	L'alcalinité totale (T.A.ET T.A.C) en (mg/l)	La dureté hydrotimétrique (TH) en (°F)	Dosage du calcium	Dosage des chlorures (NaCl) en (mg/l)	Dosage des ions sulfates (SO ₄) en (mg/l)	La valeur de PH	Résidus secs en (mg/l)
Résultats	2.3157	85.428	20	Nul	583	28.80	8.8	740

Tableau 4.14 : des caractéristiques chimiques de l'eau.

6. Formulation des mortiers :

La formulation du mortier normal Avec un mélange d'éléments :

- ✓ ciment : 350kg
- ✓ Le sable : 1305kg
- ✓ L'eau : 175 L
- ✓ Un rapport E/C = 0,5

Mode opératoire :

- Mettre le malaxeur HOBART dans une cuve de cinq litres répandant aux caractéristiques de la norme NF P 15-41 en marche à petit vitesse.
- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment.
- Après 30 secondes, introduire le sable régulièrement pendant 30 secondes qui suivent et continuer à malaxer pendant 30 secondes.
- Arrêter le malaxeur pendant une minute et 30 secondes et enlever à l'aide d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent à la paroi et au fond vers le milieu de celui-ci.
- Verser le mortier dans des moules prismatiques 4x4x16 cm en trois couches et la mise en place dans une appareil de chocs est réalisée par vibration de 60 coups à l'aide de la table vibrante, 20 coups pour chaque couches.



Figure 4.22 :Le malaxeur Hobart électrique.



Figure 4.23 : Eprouvette prismatique 4x4x16cm



Figure 4.24: Appareil de chocs

Nous vont préparer deux séries des éprouvettes de mortier :

- 15 éprouvettes sous l'eau.
- 36 éprouvettes sous les milieux agressives.

Après 24h du coulage nous avons démoulé les 15 éprouvettes de mortier puis conservées Immédiatement dans l'eau chaque 3 éprouvette pour une durée de 3,7, 14 ,21et 28 jours.

7. Les Milieux agressifs :

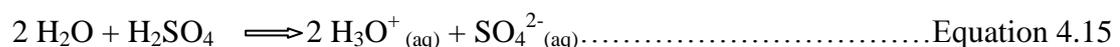
Après décoffrage, les 36 éprouvettes de mortier ont été démoulées puis conservées Immédiatement dans les différents milieu agressifs des mortiers en a les immergé dans des solutions contiens 5% des produit chimiques pour une durée de 28,60 ,90 jours.

Dans chaque solution chimique on fait 9 éprouvettes, les échantillons sont immergés dans 4 types de solutions chimiques : 5% acide chlorhydrique (HCl), 5% acide sulfurique (H₂SO₄), 5% acide acétique (CH₃COOH), et l'eau de mer.

7.1. Préparation des attaques chimiques :

7.1.1. L'acide sulfurique (H₂SO₄):

L'acide sulfurique, appelé jadis huile de vitriol ou vitriol fumant, est un composé chimique de formule H₂SO₄. C'est un acide minéral dont la force (pK_a = -3,0) est seulement dépassée par quelques super acides. Il est miscible à l'eau en toutes proportions, où il se dissocie en libérant des cations hydronium :



7.1.2. L'acide chlorhydrique (HCl) :

L'acide chlorhydrique concentré ou dilué, noté HCl_{aqueux}, se présente essentiellement sous forme d'une solution aqueuse contenant les solutés ioniques suivants :

- les ions de type oxonium ou hydronium ; plus précisément des ions hydrate d'hydrogène notés H₃O⁺ diversement solvates, en moyenne par cinq molécules d'eau ;
- les ions chlorurent Cl⁻.

L'acide chlorhydrique est le principal constituant des acides gastriques. Cet acide minéral est couramment utilisé comme réactif dans l'industrie chimique. L'acide chlorhydrique concentré est un liquide très corrosif aux émanations ou « fumées » toxiques, il doit être manié avec précaution.



Figure 4.25: L'acide sulfurique + L'acide chlorhydrique

Solution	Concentration(%)	Quantité/10 litres d'eau	Observation
H ₂ SO ₄	5	1300 ml/10 L	Acide fort
HCl	5	500 ml/10 L	Acide fort

Tableau 4. 15 : Concentration des solutions.

7.1.3. L'eau de mer :

L'eau de mer utilisée est de la méditerranée de la plage de Béni- Saf.

Pour assurer la conservation des échantillons dans un PH constant, des mesures sont faites chaque 7jours à l'aide du PH mètre. Les solutions fait un changement.



Figure 4. 26: Conservation des éprouvettes dans les solutions chimiques.

8 .Essai sur les mortiers :

Les essais mécaniques selon les normes ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4 x 4 x 16) cm³ sont utilisés pour caractériser les mortiers à différentes échéances :

- 1- Essai de la perte de masse
- 2-La flexion trois points (3 pts) sur trois éprouvettes de 4×4×16 cm³.
- 3- La compression pure sur les demi-éprouvettes 4x4x4 cm³.

8.1 Essai de la perte de masse :

Les mesures de la perte de masse sont réalisés par les pesées des éprouvettes 4x4x16 cm dans le but de suivre l'évolution des échanges hydriques et chimiques entre les éprouvettes et le milieu de conservation sont testé à 28 ; 60 ; 90 jours.

Le degré de l'attaque est évalué par la formule :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100 \dots\dots\dots \text{Equation 4.16}$$

Avec M₁, M₂ les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

8.2 Essai de résistance à la flexion :

La résistance de mortier a été déterminée à l'aide d'une machine de compression et de flexion sur des éprouvettes prismatique 4x4x16 cm conformément à la norme NF P18-407



Figure 4.27: Machine de compression et de flexion.

Les éprouvettes 4x4x16 ont été disposées dans la machine d'essai la mise en charge a été effectuée on obtenues après une rupture de flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la figure (suivant).



Figure 4.28: écrasement des éprouvettes du mortier

8.3 Résistance à la compression :

L'essai de compression sur des cubes de 4x4x4 cm, a été réalisé sur la même machine de compression et de flexion.

Les demi- prismes des éprouvettes 4x4x16 obtenues après rupture en flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la figure suivante :

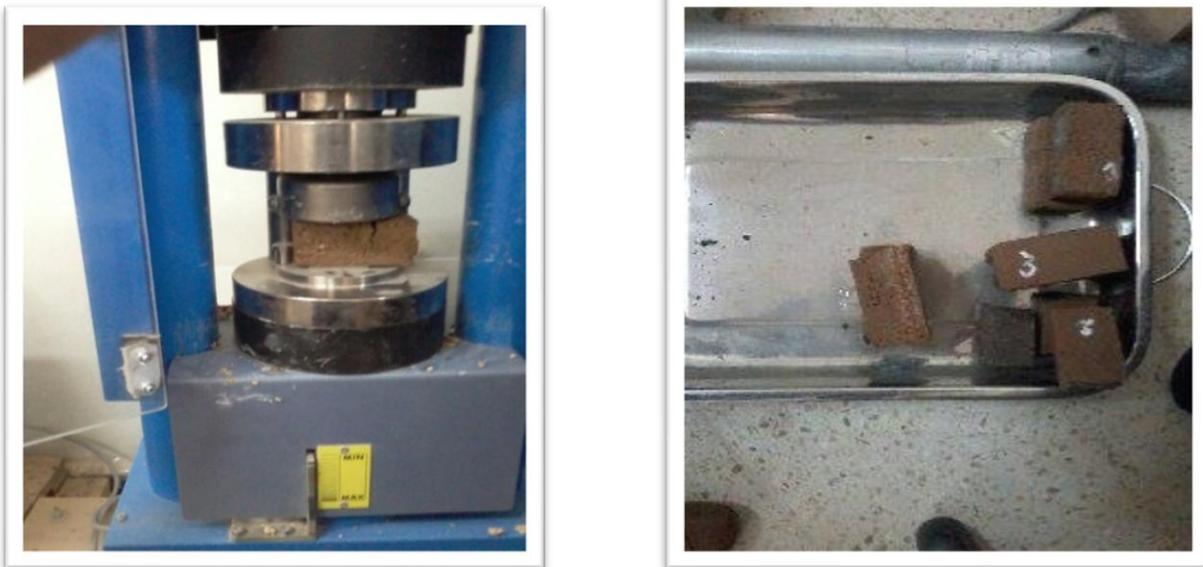


Figure 4.29: éprouvette du mortier après l'écrasement

Conclusion

- L'étude concernant le présent chapitre nous a permis de décrire les différents matériaux utilisés dans ce travail et de donner une idée générale sur les procédures expérimentales sur le mortier.
- Tous les résultats et leurs interprétations des différents essais sont représentés dans le chapitre suivant.

5.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenues lors des essais de caractérisation des mortiers et de durabilité à savoir ; la perte de masse, et la résistance à la traction par flexion et de la résistance à la compression des mortiers dans l'eau et les différents milieux agressifs.

5.2 Perte de masse :

5.2.1 Perte de masse des éprouvettes de référence conservée dans l'eau:

M1= la masse Initial des éprouvettes en (g)

M2= la masse des éprouvettes conservée dans l'eau en (g)

On remarque une évolution de la perte de masse en fonction de l'âge cela est dû à la consommation des produits lors de l'hydratation du béton. Voir figure 5.2.

jours/échantillons	M1 en (g)	M2 en (g)	La perte de masse en (%)
3 jours	558,10	552 ,40	1 ,02
7 jours	557,07	548,61	1,51
14jours	550,20	539,85	1,88
21jours	545,50	527,45	3,30
28 jours	540,91	519,41	3,97

Tableau 5.1 : Perte de masse des éprouvettes de référence (témoin).



Figure 5.1: éprouvette de référence (témoin).

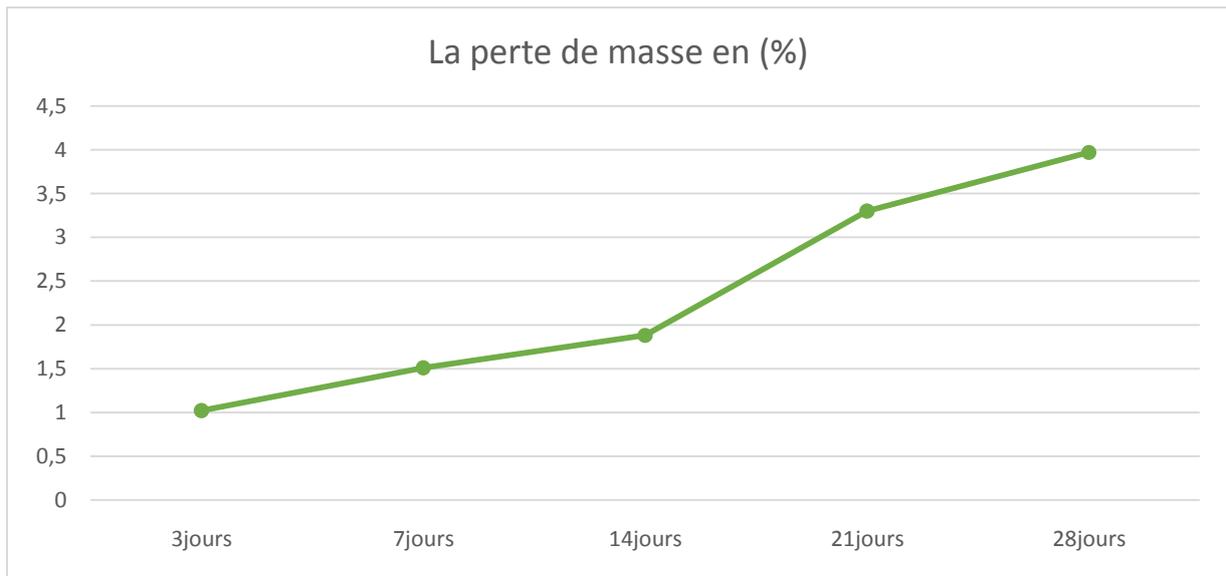
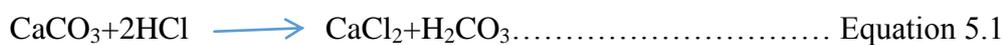


Figure 5.2: Perte de masse des éprouvettes de référence (témoin).

5.2.2 Petre de masse des éprouvettes conservées en HCl :

Après conservation dans l'acide chlorhydrique Hcl pendant 90jours on a estimé la durabilité de notre mortiers par le calcul de la perte de masse, on a constaté que la perte de masse suit une évolution du aux dégradations de notre mortier voir figure 5.4. L'action de l'acide sur un béton normal est d'en modifier la structure et la teinte de la surface. Celle-ci devient plus rugueuse (5.2) en raison des différences de résistance à l'acide de ses constituants. Elle devient aussi plus foncée car c'est avant tout la chaux de teinte claire qui est dissoute suite de réaction de la chaux libre dans le mortier avec l'acide.

Le calcaire réagit avec l'acide chlorhydrique pour former un sel(le chlorure de calcium CaCl₂) et de l'acide carbonique H₂CO₃ .On écrit l'équation :



Mais l'acide carbonique H₂CO₃ est instable à température et pression normale. La molécule se casse pour former de l'eau et du gaz carbonique qui s'échappe en faisant des bulles :



jours/échantillons	M1(g)	M2(g)	La perte de masse en (%)
28j	557,5	517,1	7,2
60j	560,6	502,6	10,3
90j	555,9	474,8	14,5

Tableau 5.2 : Perte de masse des éprouvettes conservées en HCl.



Figure 5.3: éprouvette conservées en HCl.

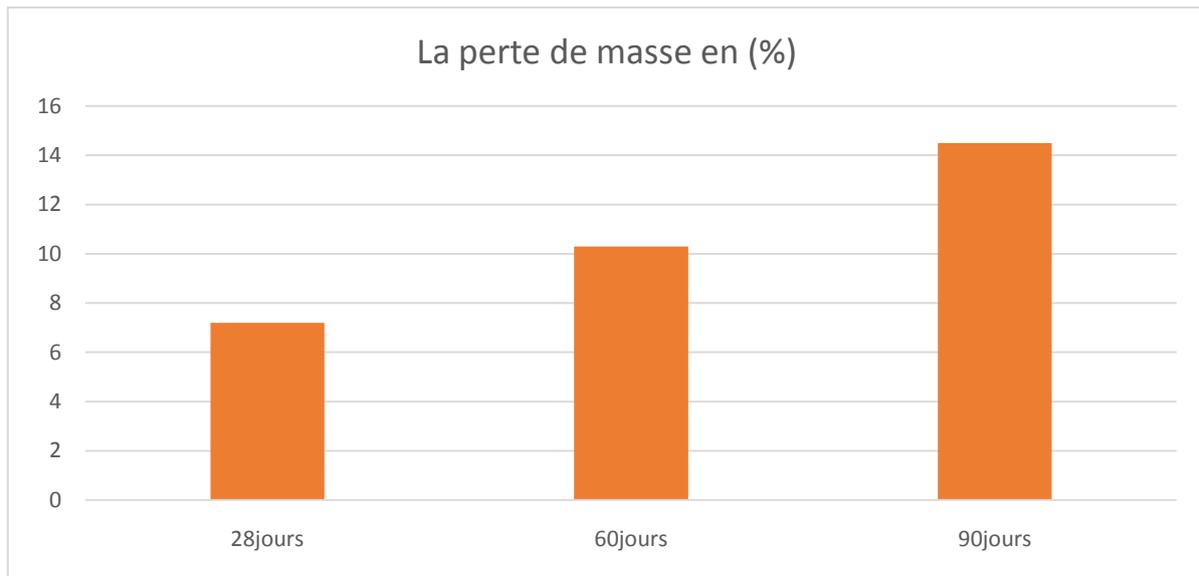
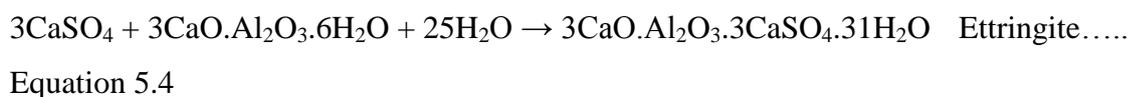


Figure 5.4 : Perte de masse des éprouvettes conservées en HCl.

5.2.3 Perte de masse des éprouvettes conservées en H₂SO₄ :

Pour les éprouvettes conservées dans l'acide sulfurique on a remarqué un autre comportement par rapport aux éprouvettes conservées dans l'acide chlorhydrique, on constate un gonflement des éprouvettes dû à la formation du gypse secondaire et de là l'ettringite suivant les équations suivantes :



Les produits de ces réactions occupent un plus grand volume que les réactifs initiaux et mènent ainsi à une expansion responsable de gonflement, de fissuration et s'accompagnant généralement d'une perte de masse. Le gonflement est généralement attribué à la formation d'ettringite (équation 4). Mais des études montrent que d'autres effets comme la détérioration due aux ions magnésium apportés par le sulfate de magnésium ou encore le gonflement associé à la formation de gypse est à prendre en compte. Il reste cependant probable que la conséquence la plus fréquente de l'attaque sulfurique est la formation d'ettringite expansive. En d'autres termes, trois processus superposés permettent de décrire globalement l'agression (Skany 2002). [16]

jours/échantillons	M1(g)	M2(g)	La perte de masse en (%)
28j	549,90	502,4	8,60
60j	550,61	467,9	15,02
90j	551,92	477,9	13,41

Tableau 5. 3: Perte de masse des éprouvettes conservées en H₂SO₄.

On remarque sur la figure 5.5 une détérioration de la surface des éprouvettes, une décoloration de la surface et une solution blanchâtre, dû à la dissolution de l'ettringite.



Figure 5.5: éprouvette conservées en H₂SO₄.

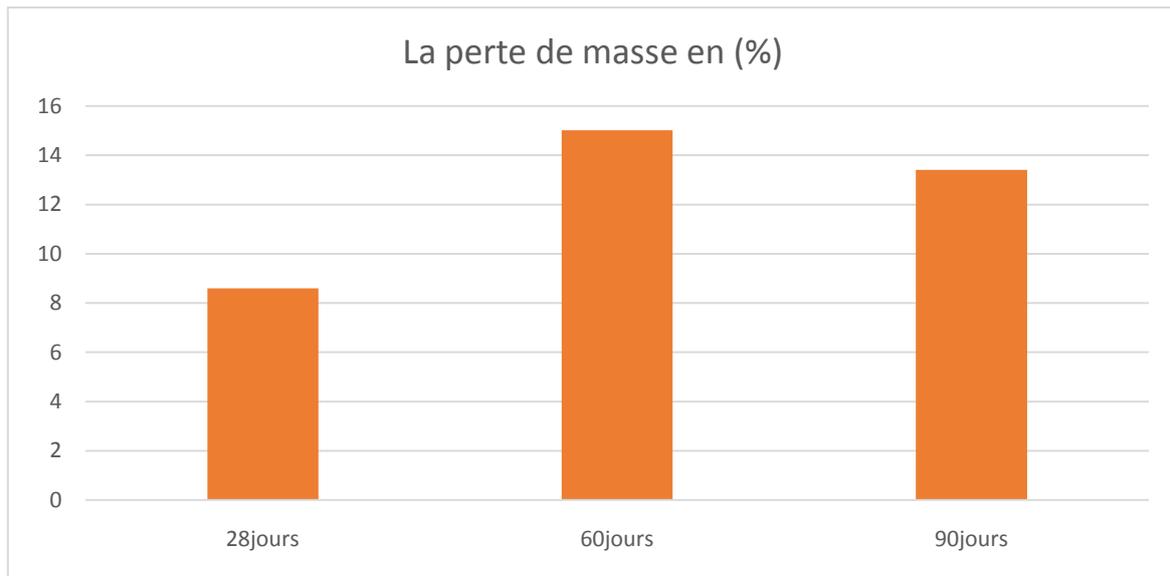


Figure 5.6 : Perte de masse des éprouvettes conservées en H_2SO_4 .

5.2.5 Perte de masse des éprouvettes conservées à l'eau de mer:

Pour les éprouvettes conservées dans l'eau de mer on a remarqué une évolution de la perte de masse en fonction de l'âge, la présence des sels dans l'eau de mer fait les mêmes effets de que les acides mais en petite quantité (concentration).voire figure 5.8

jours/échantillons	M1(g)	M2(g)	La perte de masse en (%)
28j	558,10	521,6	6,54
60j	557,22	523,7	6,01
90j	555,9	515,5	7,26

Tableau 5.4 : Perte de masse des éprouvettes conservées à l'eau de mer.

On remarque la présence des résidus blancs dû à la dissolution de l'ettringite. Une légère décoloration des éprouvettes est aussi observée. Voir figure 5.7.



Figure 5.7: éprouvette conservées à l'eau de mer.

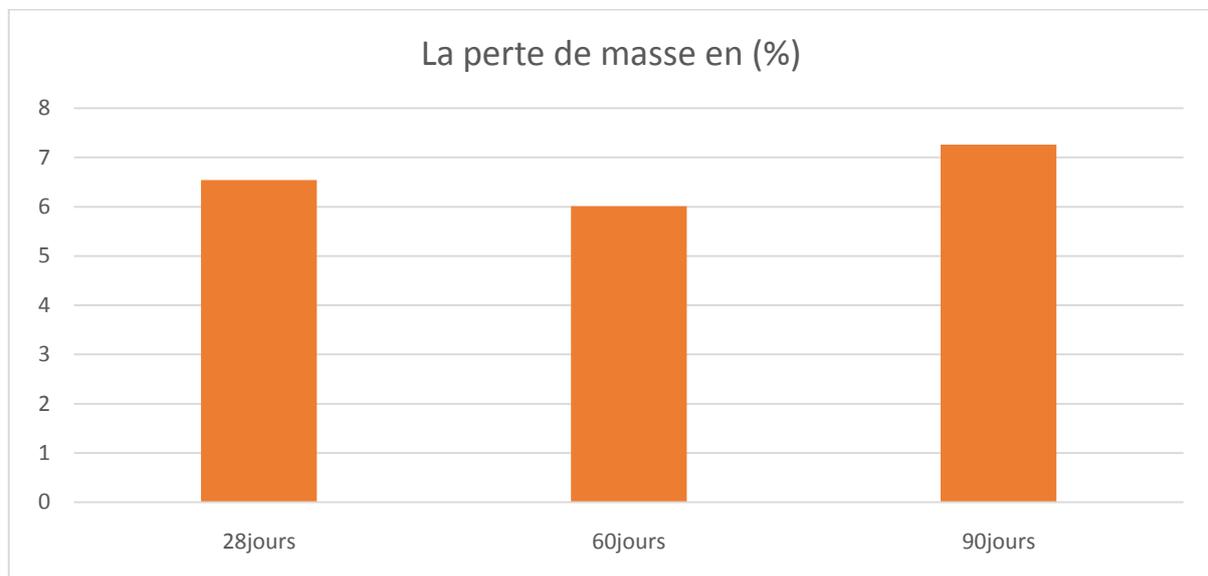


Figure 5.8: Perte de masse des éprouvettes conservées à l'eau de mer.

5.3 Les résultats de PH dans les milieux agressifs :

Suite aux mesures de PH on a remarqué une variation surtout au niveau de l'acide HCL.

Attaque chimie	1 ^{er} jour	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours	60 jours	90 jours
HCl	0	3	4	4	3	4	4
H ₂ SO ₄	1	1	1	1	1	1	2
Eau de mer	6.2	6.2	6.1	6.2	6	6.2	6.2

Tableau 5.5 : Les résultats de PH dans les milieux agressifs.

5.4 Résultats des essais de traction par flexion et des essais de compression:

Afin de comprendre le comportement mécanique des éprouvettes on a fait les essais de flexion par traction sur les éprouvettes prismatiques puis l'essai de compression sur les moitiés cubiques.

5.4.1 Eprouvettes de référence :

On remarque que les mortiers à base de sable corrigé ont donné des bonnes résultats pour les essais de compression du jeune âge on a noté 30 MPa à 3jours, et jusqu'à 78 MPa à 28jours.

Voir figure 5.9

jours/échantillons	3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
Résistance à la traction par flexion en (MPa)	0.546	0,743	0,776	0,85	1.314
La résistance à la compression (MPa)	30.435	41.672	64.715	68.020	78.068

Tableau 5.6 : Résistance à la traction par flexion et de compression des éprouvettes de référence.

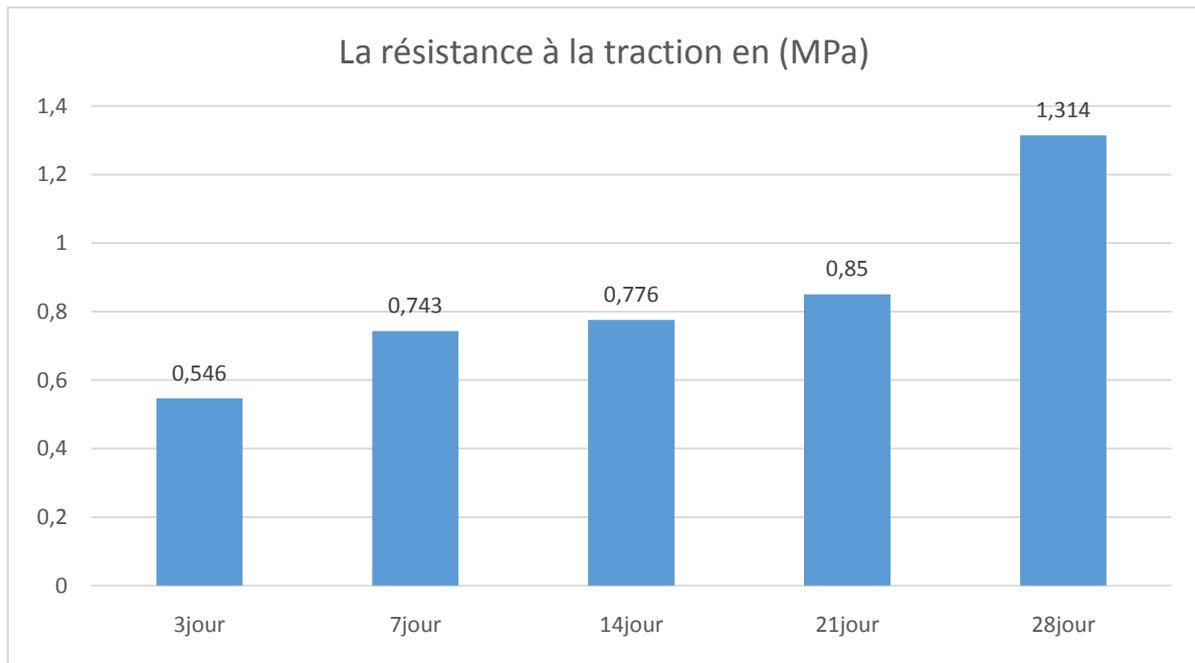


Figure 5.9 : Résistance à la traction par flexion des éprouvettes de référence.

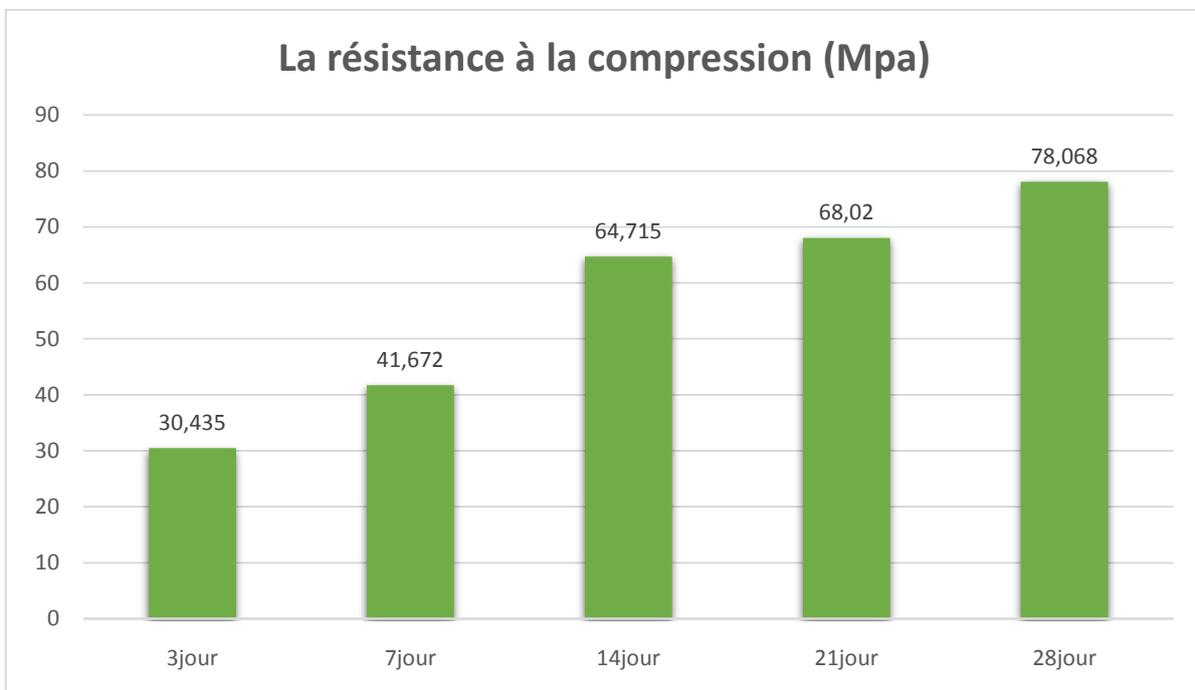


Figure 5.10 : Résistance de compression des éprouvettes de référence.

5.4.2 Echantillons conservés en HCl :

Lors des essais de flexion par traction on a eu des problèmes pour l'essai de 90 jours, donc les résultats non pas étaient prise en compte .on a remarqué que la résistance en compression des mortiers immergés dans l'acide chlorhydrique on diminuées par rapport les mortiers de références. Mais dans la globalité les résultats de résistance était bonne par rapport au milieu d'immersion, on a obtenu jusqu'à 54MPa à l'âge de 90 jours voir figure 5.11 et 5.12.

jours/échantillons	28 jours	60 jours	90 jours
La résistance à la traction en (MPa)	1.205	1.266	—
La résistance à la compression (Mpa)	62.996	54.671	54.772

Tableau 5.7 : Résistance à la traction par flexion et de compression échantillons conservés en HCl

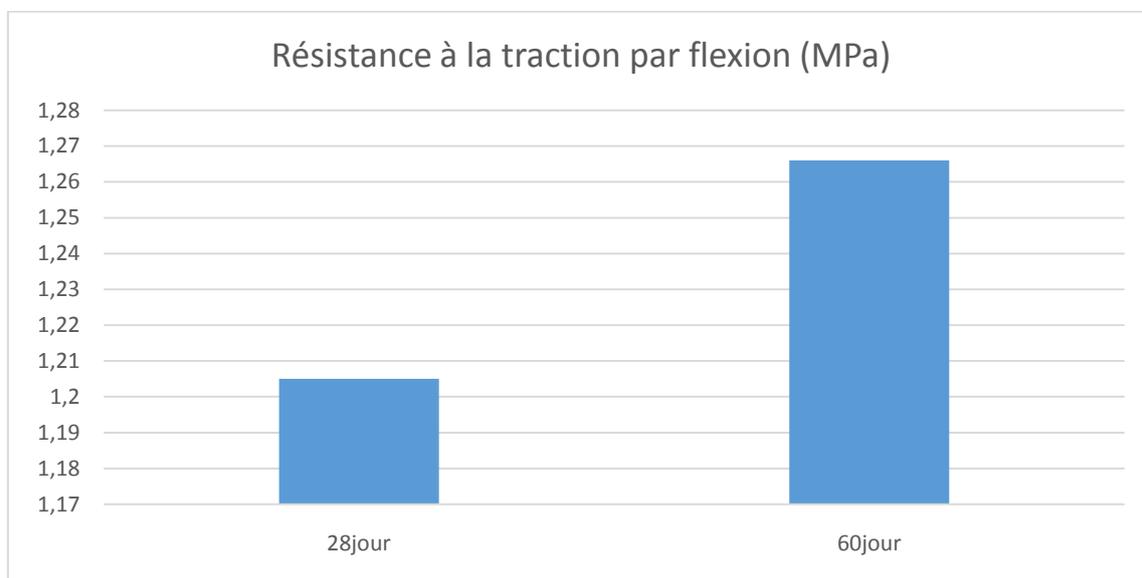


Figure 5.11 : Résistance à la traction par flexion échantillons conservés en HCl

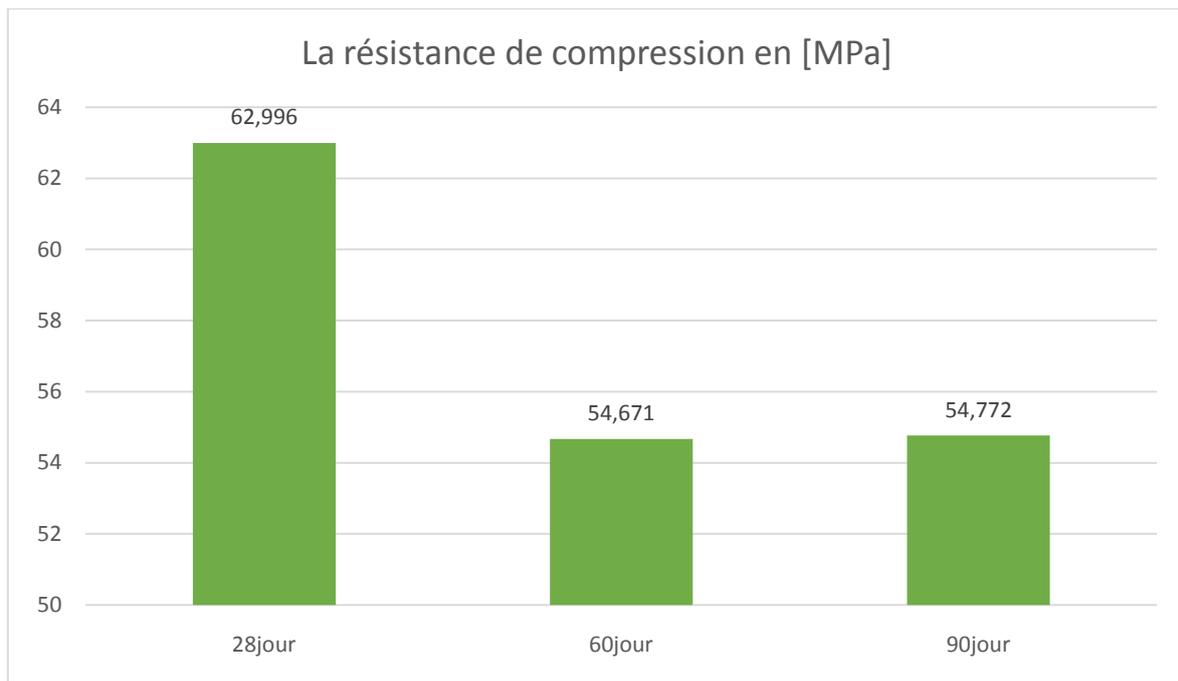


Figure 5.12 : Résistance de compression éprouvette conservée en HCl

5.4.3 Eprouvettes conservées en H₂SO₄ :

Le même problème est observé pour les éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique, les résultats pour l'âge de 90 jours non pas données des résultats fiables suite au disfonctionnement de la presse.

On remarque que la résistance en compression a diminué en fonction de l'âge. Sachant que l'acide sulfurique est un acide fort avec une concentration de 5% donc le phénomène de dégradation est accéléré.

jours/échantillons	28 jours	60 jours	90 jours
La résistance à la traction en (MPa)	1.061	1.627	—
La résistance à la compression (Mpa)	45.069	29.323	16.949

Tableau 5.8 : Résistance à la traction par flexion et de compression éprouvettes conservées en H₂SO₄

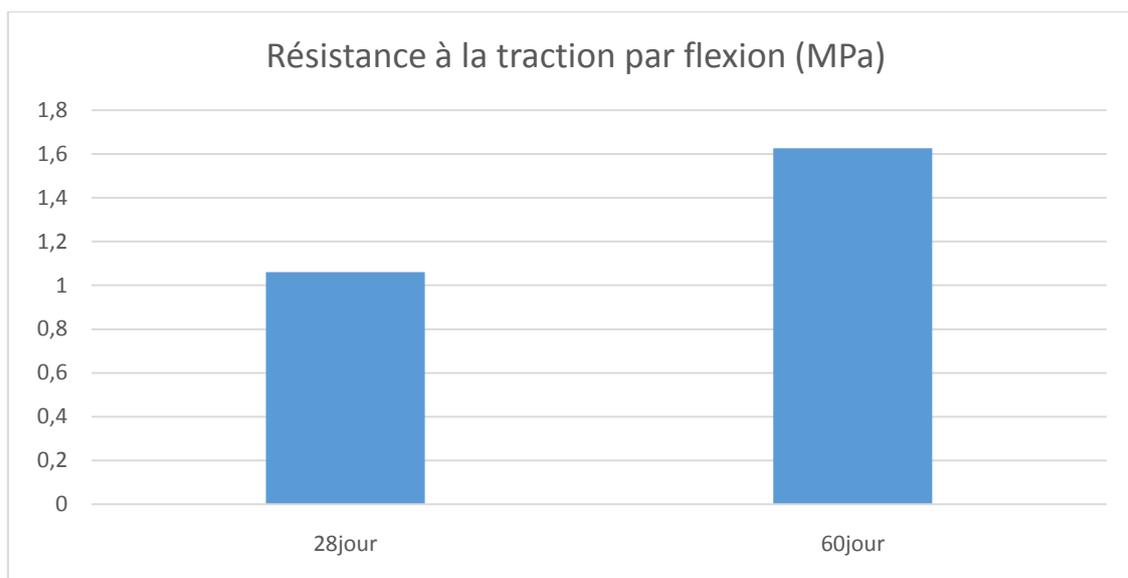


Figure 5.13 : Résistance à la traction par flexion éprouvettes conservées en H₂SO₄

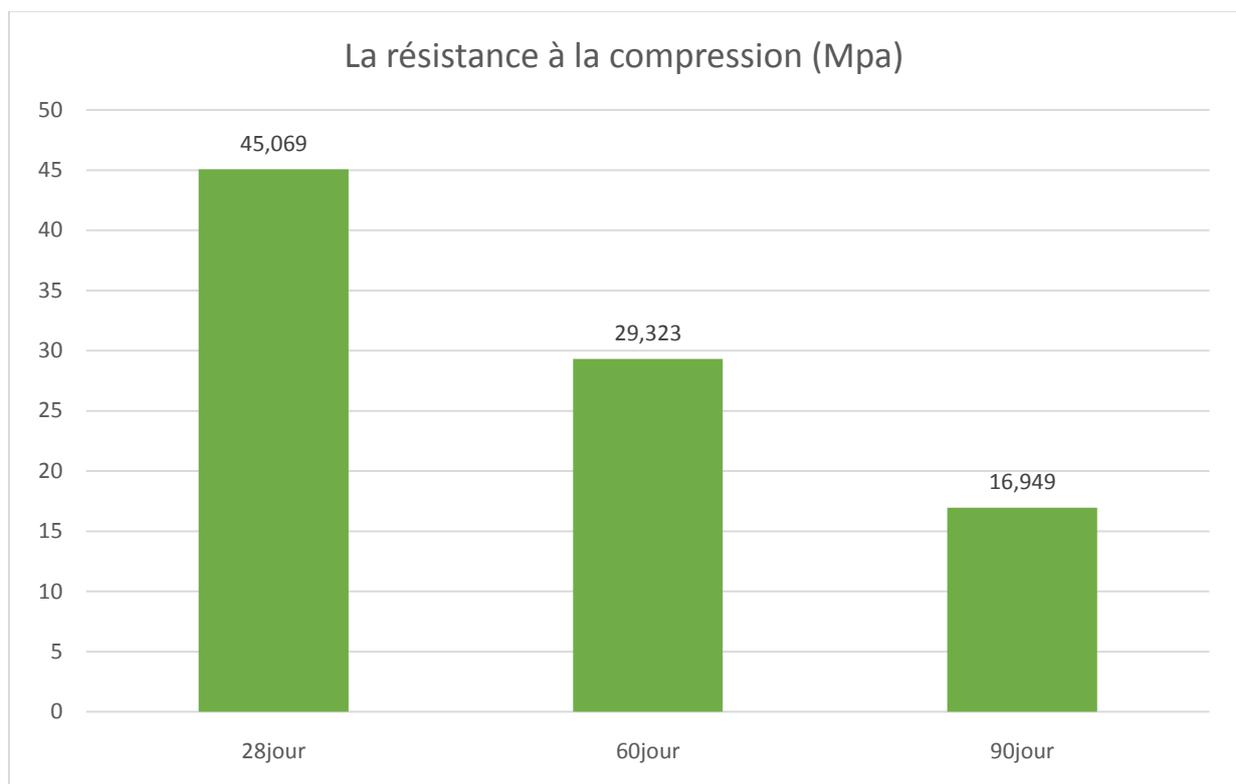


Figure 5.14 : Résistance de compression éprouvette conservée en H₂SO₄

5.4.5 Eprouvettes conservées à l'eau de mer :

La conservation des éprouvettes dans l'eau de mer n'a vraiment affecté la résistance en compression mais on a une diminution de la résistance mécanique en fonction de l'âge. Mais dans le sens globale on constate que l'utilisation du sable de dune de la région de Naama a donné de bons résultats vis-à-vis la résistance en compression mécanique.

jours/échantillons	28 jours	60 jours	90 jours
La résistance à la traction en (MPa)	1.110	1.125	—
La résistance à la compression (Mpa)	50.166	40.462	49.091

Tableau 5.9 : Résistance à la traction par flexion et de compression éprouvettes conservées à l'eau de mer

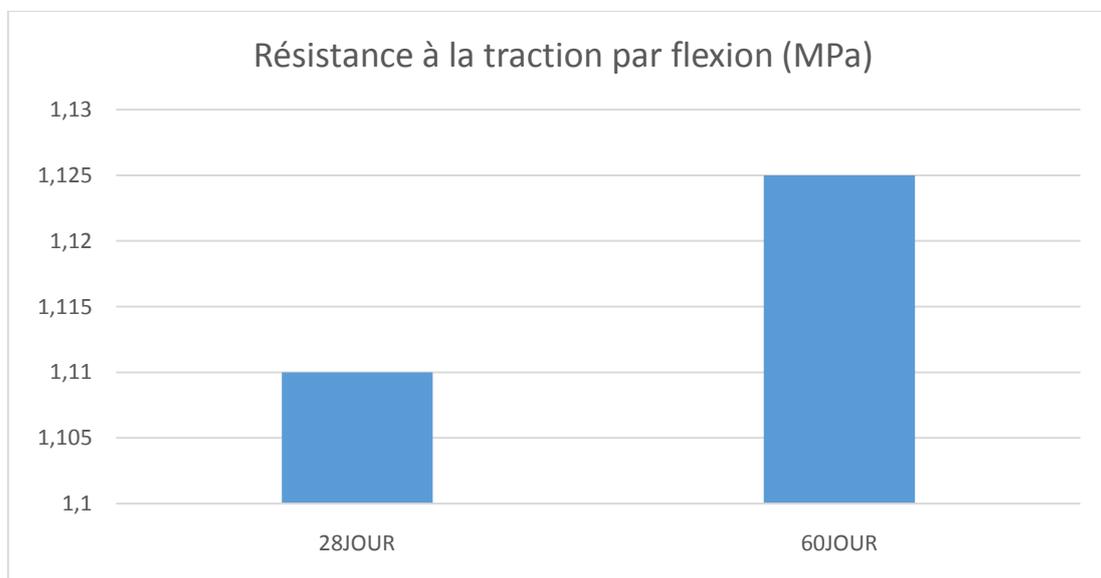


Figure 5.15 : Résistance à la traction par flexion éprouvettes conservées à l'eau de mer.

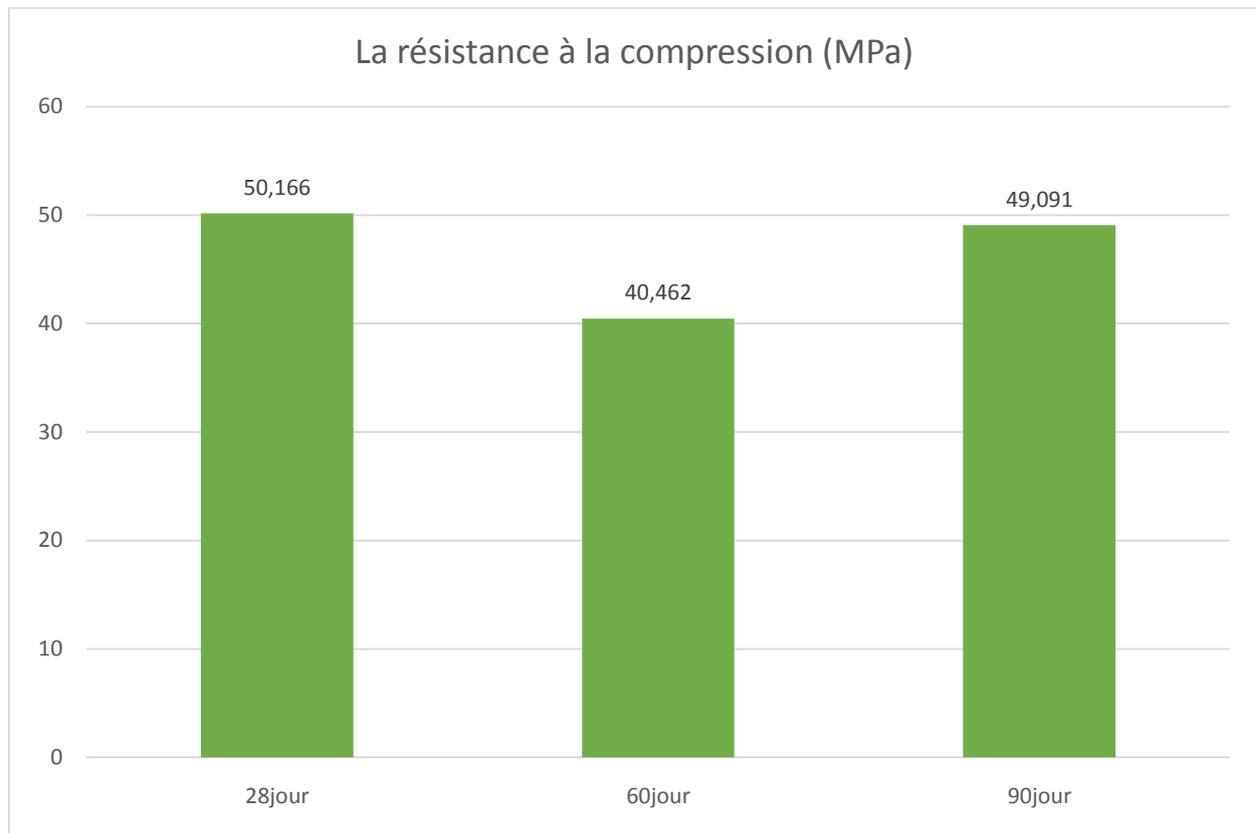


Figure 5.16 : Résistance de compression éprouvette conservée à l'eau de mer.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons fait la collecte des résultats obtenues lors des essais de résistance mécanique et de durabilité on a illustré ces résultats dans des tableaux et sous forme de graphes.

Conclusion générale :

Le désert occupe plus 60% du territoire national formé essentiellement de sable inexploité jusqu'à ce jour et dans l'unique but de valoriser cette richesse nationale en sable, on a entamé ce travail, qui nous a permis de mettre en valeur l'influence du sable de dune sur le comportement de mortier et de préciser un certain nombre de point :

- Plus de 85% de la silice (SiO_2) dans la composition chimique du sable de dune.
Le sable de dune est matériau sableux avec un équivalent de sable inférieur de 60% sa granulométrie est très serrée ne s'inscrit pas dans le fuseau granulaire ce pour cela on a corrigé par le sable de carrière est un matériau propre avec un équivalent de sable supérieur de 80%.
- le mortier d'étude présente une évolution du pourcentage de perte en masse, dans le cas de l'attaque de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et HCl, l'eau de mer.
- Les éprouvettes de l'acide sulfurique (H_2SO_4) elle constate un gonflement attribué à la formulation d'Ettringite.
- Les résistances mécaniques des mortiers, que ce soit en compression ou en flexion, Augmentent avec le temps de conservation (dans l'eau).
- Le mortier immergé dans la solution du sulfate et HCl de concentration 5% et l'eau de mer, présentent une augmentation des résistances mécaniques jusqu'à l'âge de 90 jours.
- L'utilisation du sable de dune dans la formulation du mortier, donne des résistances supérieures par rapport à ceux obtenus dans le cas de l'utilisation du sable de dune. Un gain de 30% en résistance à la compression a été observé même le dosage en ciment dans la formulation du béton du sable 0/5 est inférieur de 34%.
- L'abondance de sable de dune dans notre pays lui confère la caractéristique de matériau économique.
- L'utilisation du sable de dune soulage et cela marque son impact sur la protection de la nature et l'environnement.

Références bibliographiques

[1] le béton (Lucien Pliskin)

documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/32774/C°%26T_1992_26_58.pdf

[2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton>

[3] <http://www.infociments.fr/betons/types>

[4] Kacimi le 18 ,19 et 20 février 2001. La qualité du ciment par l'optimisation des laboratoires des cimenteries. Séminaire concernant la fonction laboratoires, son amélioration, son organisation et son optimisation. Université des Sciences et de la technologie, Oran.

[5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>

[6] Les constituants des bétons et des mortiers

https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiV4NrZ7fTAhWDORQKHdzjAmMQFghGMAU&url=http%3A%2F%2Fwww.infociments.fr%2Ftelecharger%2FCTG10.3041.pdf&usg=AFQjCNE_br0rJ5vgt_QVOX1B4Rvqdlgiw

[7] Mohammed Rissel Khalifa. Effet de l'attaque sulfurique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants. Architecture, aménagement de l'espace. Université d'Orléans, 2009. Français.

[8] THÈSE En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie).

[9] www.perfdub.fr/programme/theme-1-essais-de-durabilite/

[10] www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/27_fr.pdf

[11] www.gramme.be/unite9/beton/Documents/2_Choisir_un_beton_durable.pdf

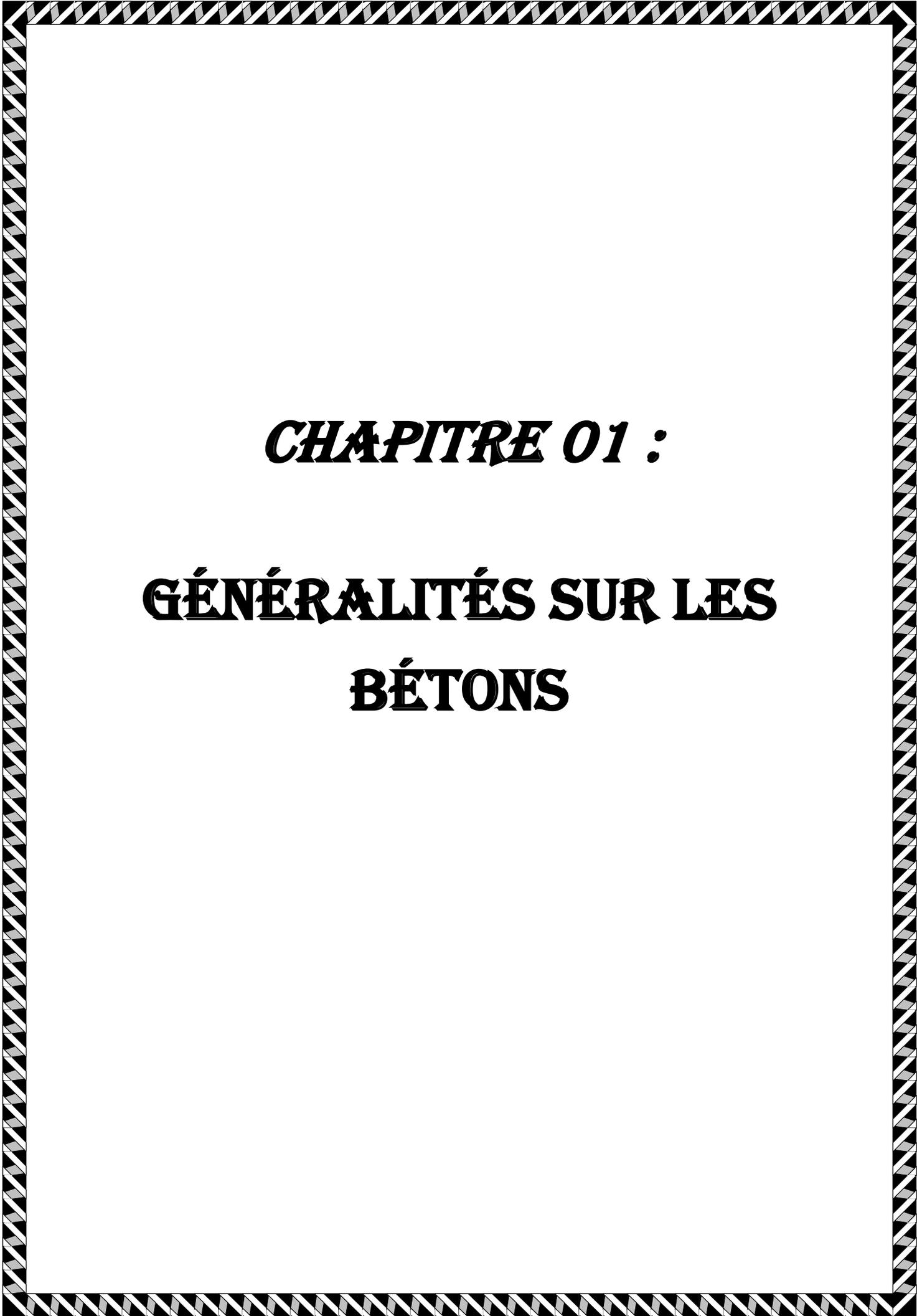
[12] www.cotita.fr/IMG/pdf/1-Principales_agressions_et_attaques_des_betons.pdf

[13] www.memoireonline.com › Sciences

[14] Mémoire de magister Spécialité : Génie civil Présenté par AZZOUZ Hocine : Etude des bétons à base des sables de dune 03/05/2009 université MOHAMED KHEIDER BISKRA

[15] KHangaoui, 2013).

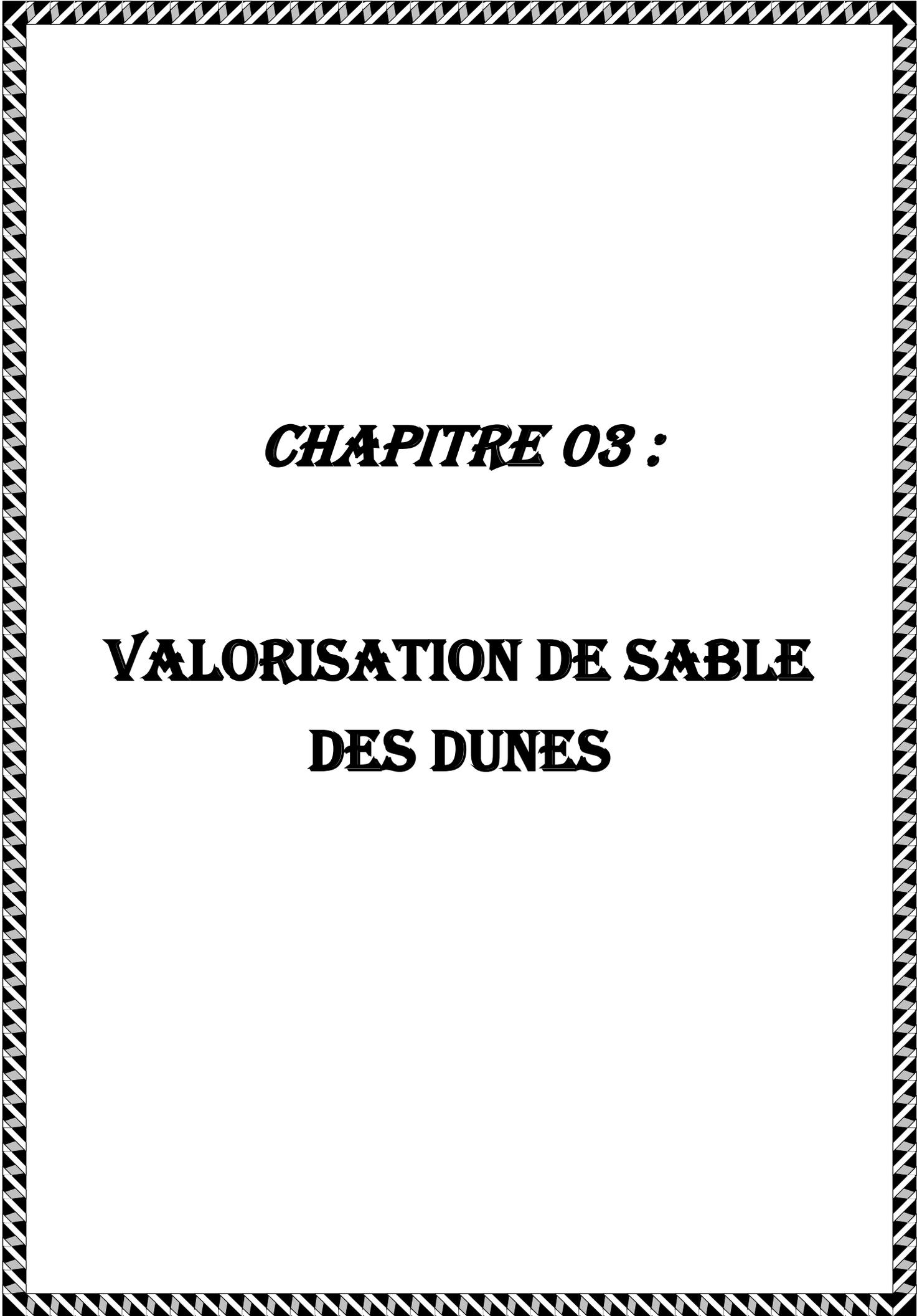
[16] thèse : L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis-à-vis des attaques chimiques (acides et sulfates) Présentée par Mr: Yassine SENHADJI



CHAPITRE 01 :

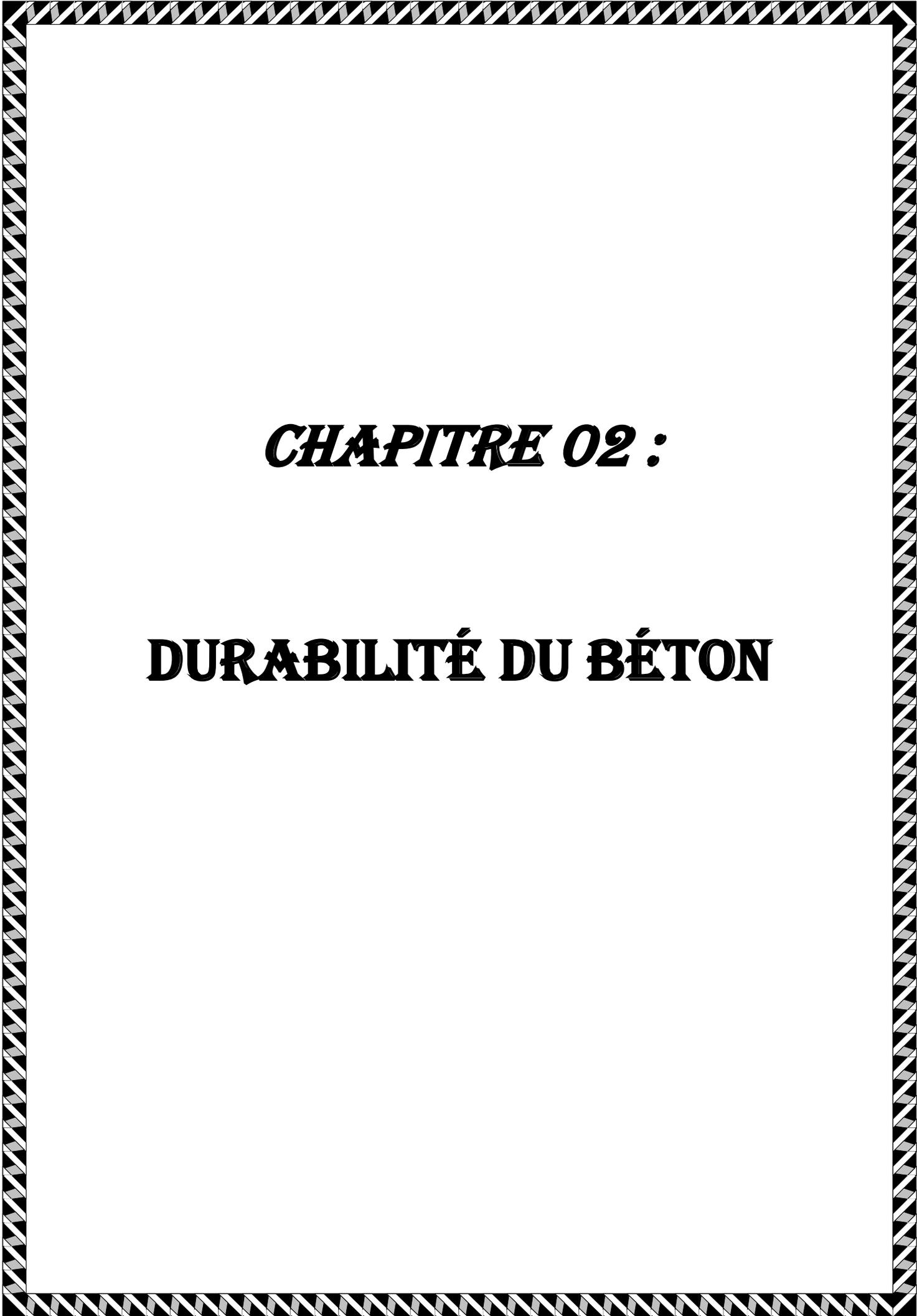
GÉNÉRALITÉS SUR LES

BÉTONS



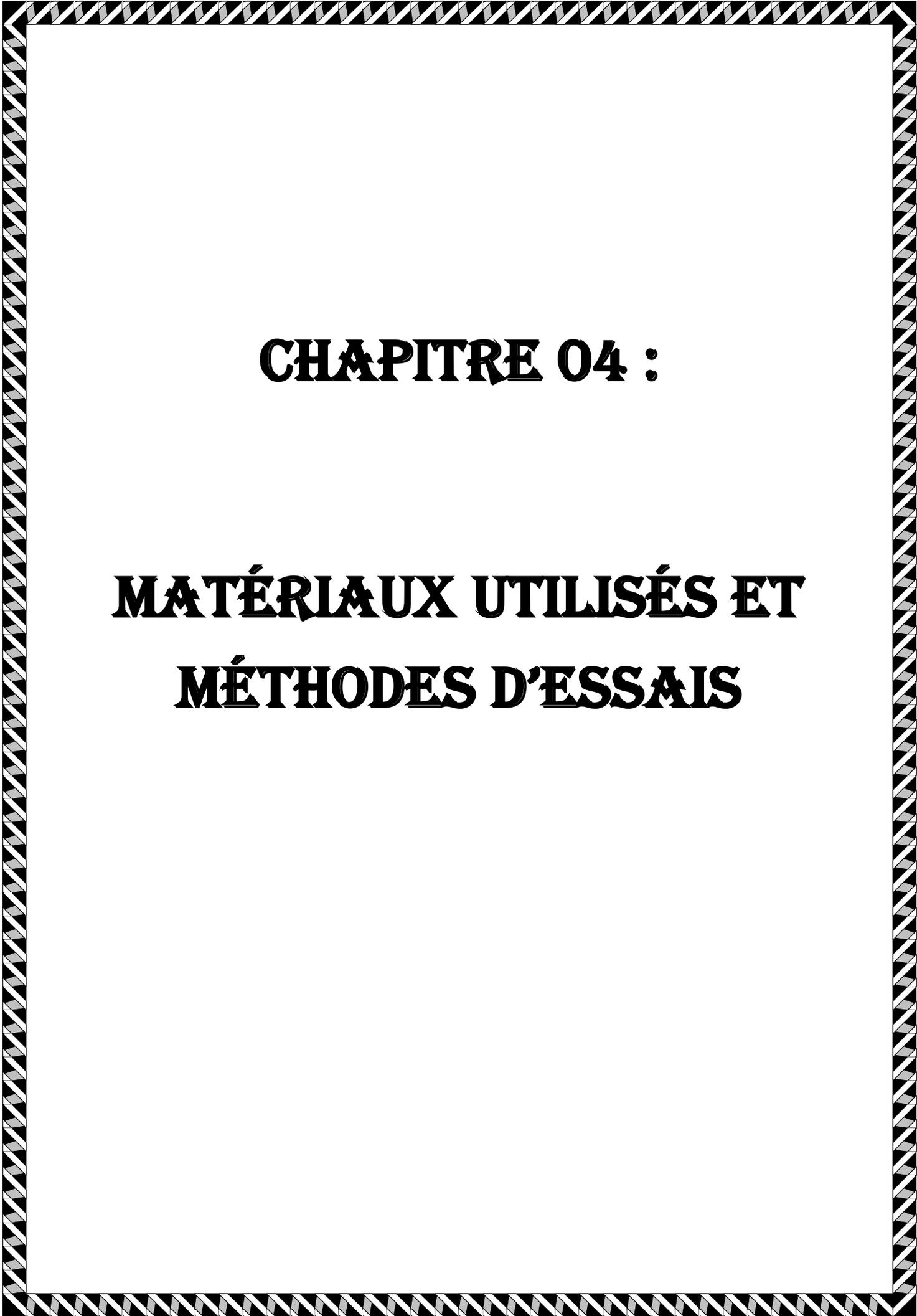
CHAPITRE 03 :

**VALORISATION DE SABLE
DES DUNES**



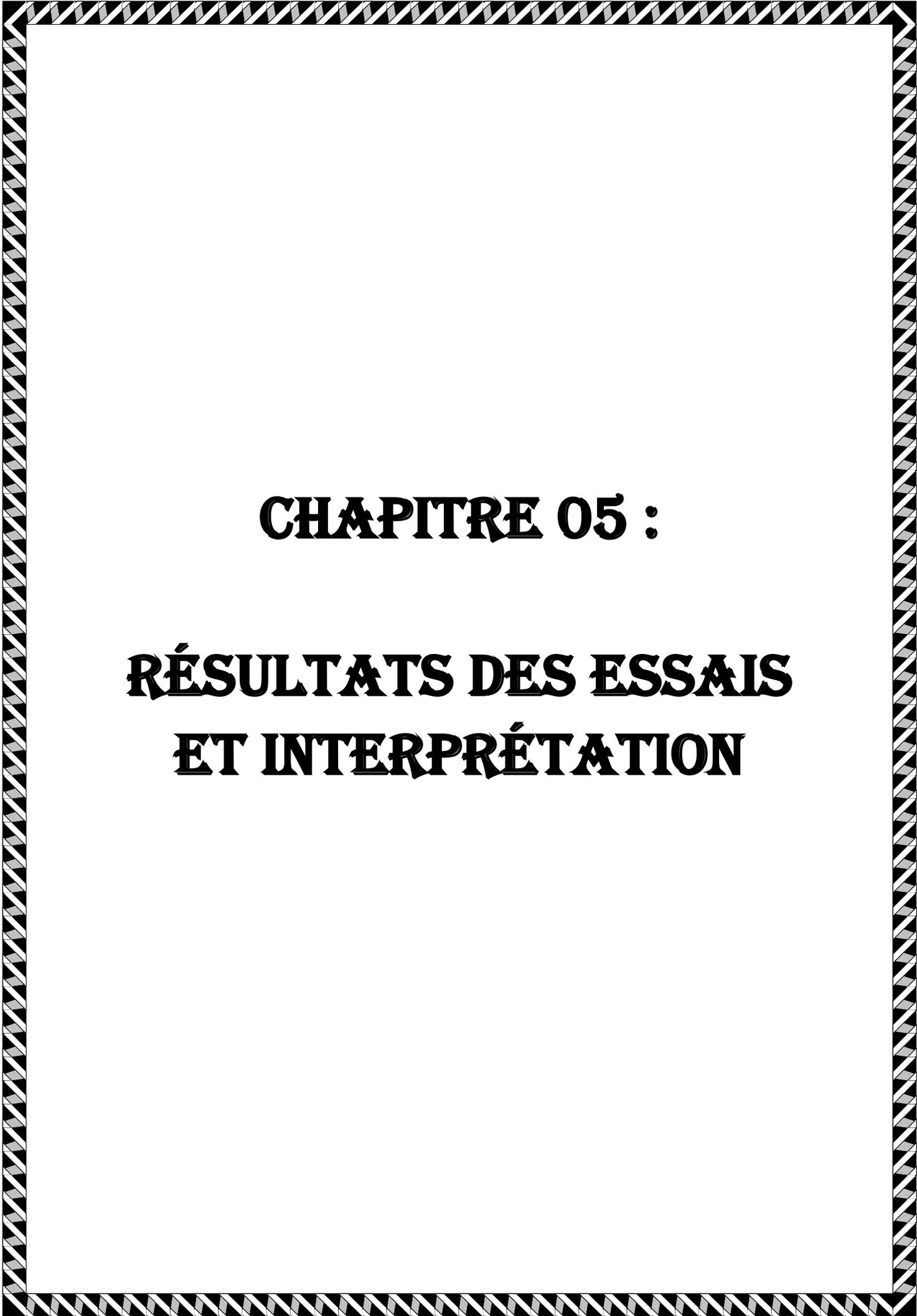
CHAPITRE 02 :

DURABILITÉ DU BÉTON



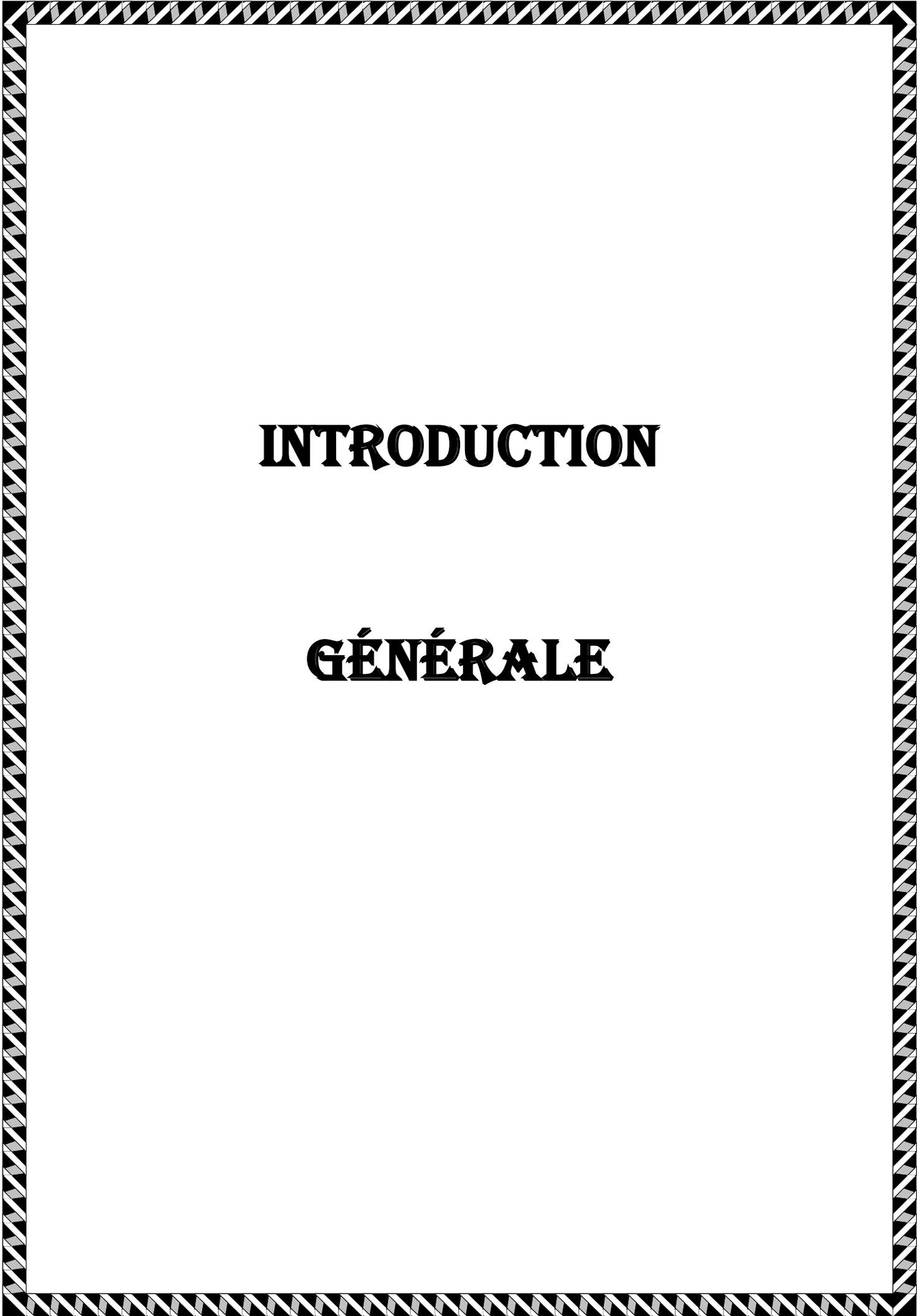
CHAPITRE 04 :

MATÉRIAUX UTILISÉS ET MÉTHODES D'ESSAIS



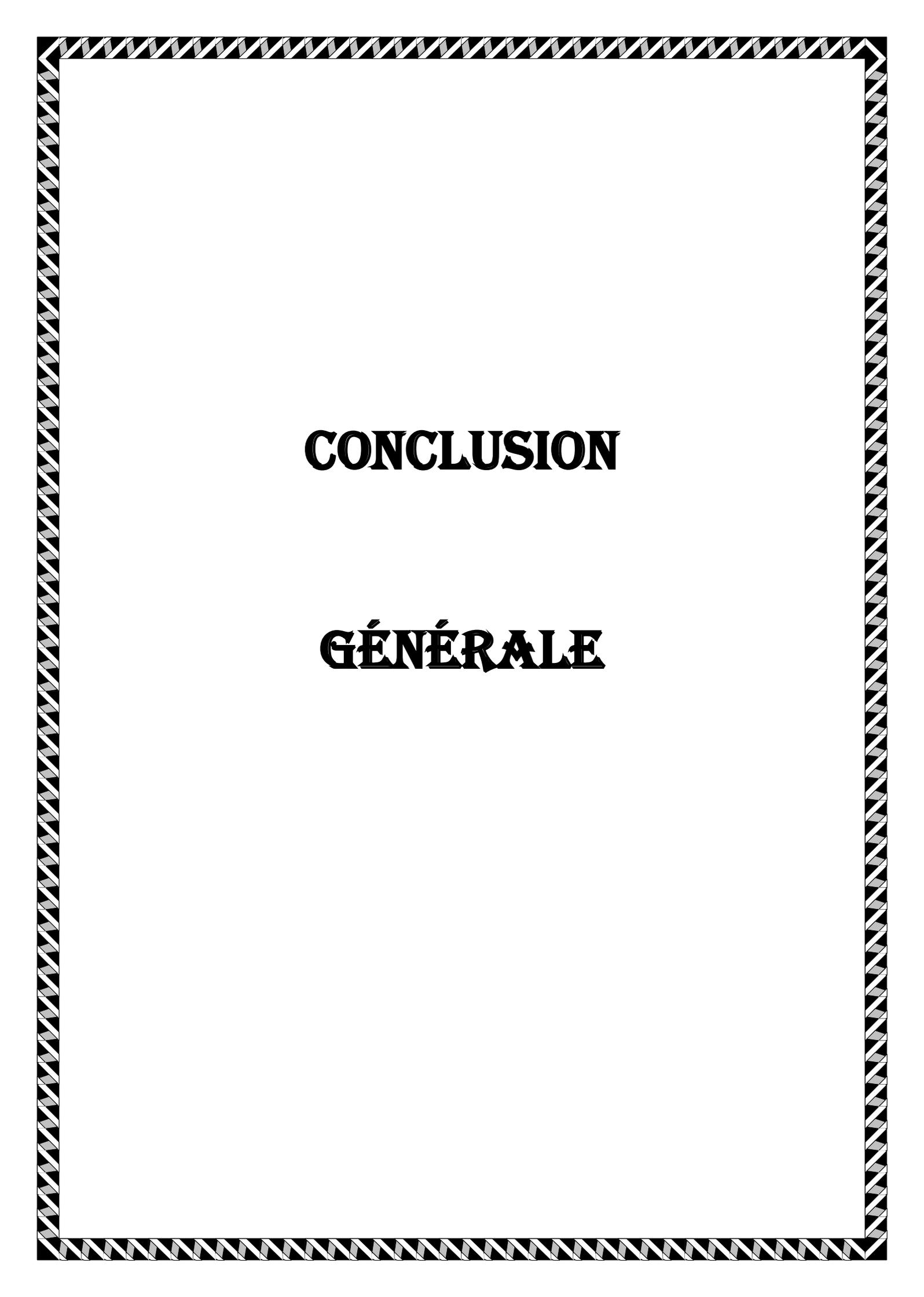
CHAPITRE 05 :

RÉSULTATS DES ESSAIS ET INTERPRÉTATION



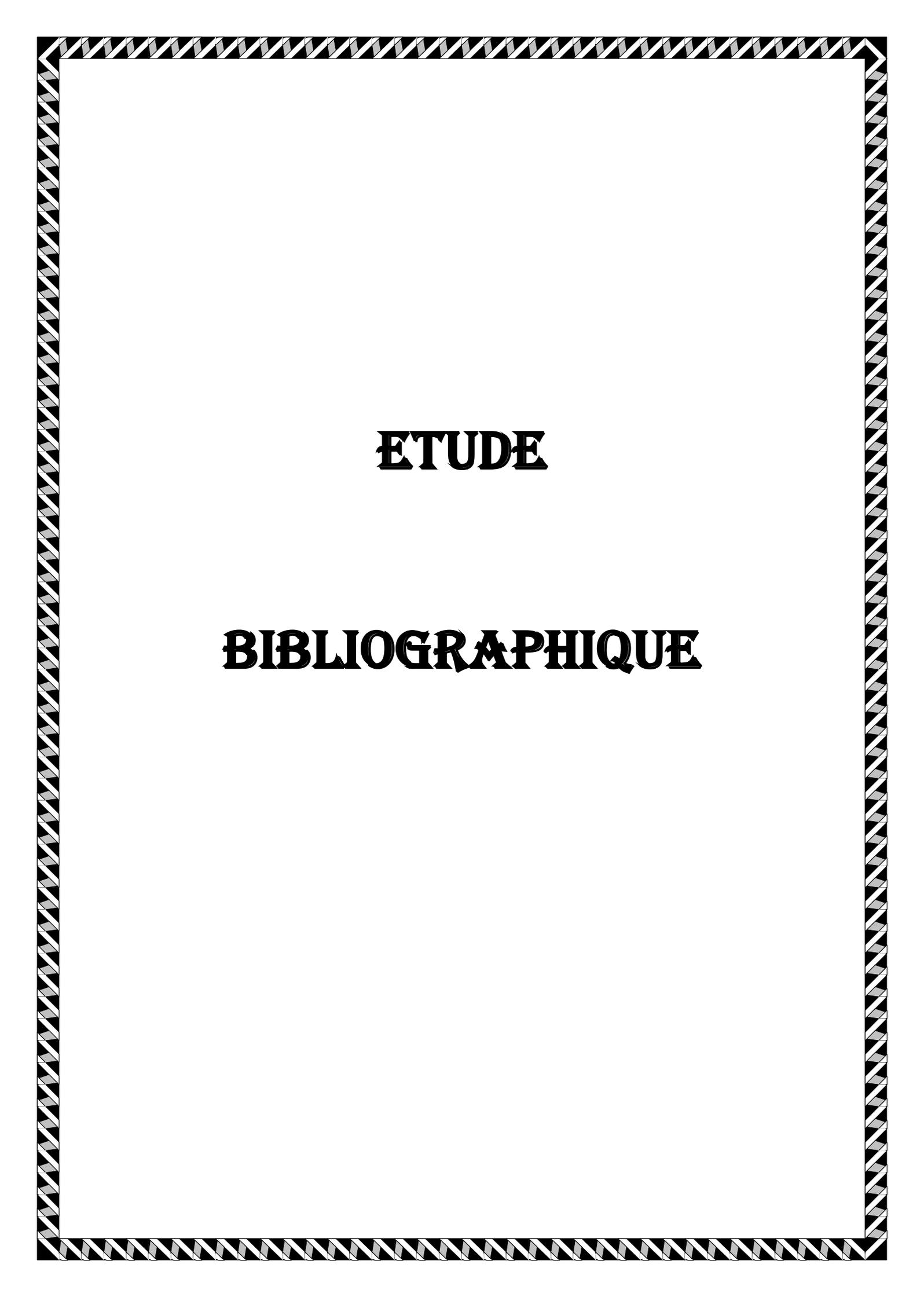
INTRODUCTION

GÉNÉRALE



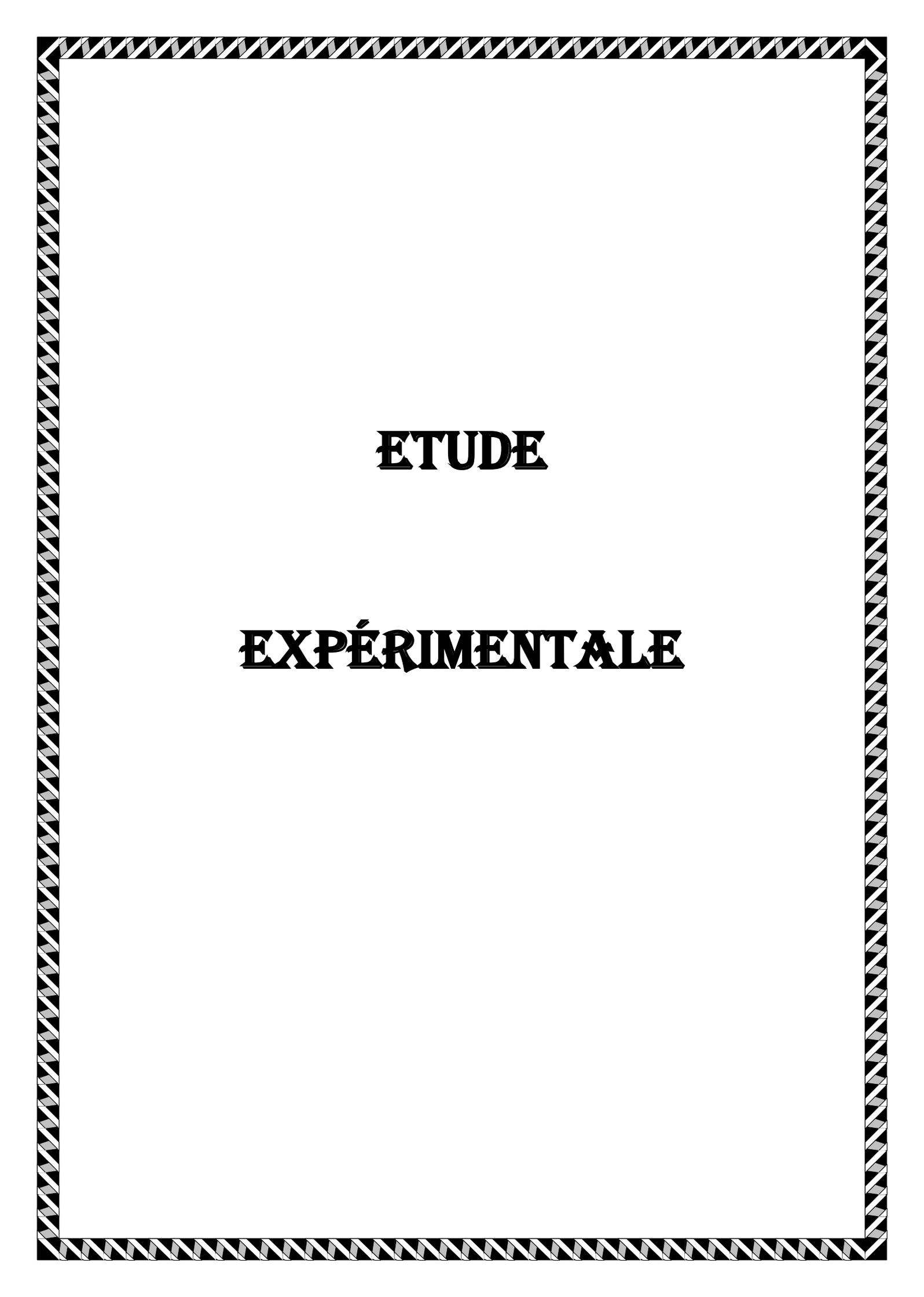
CONCLUSION

GÉNÉRALE



ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE



ETUDE

EXPÉRIMENTALE