



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département De Génie Civil



Mémoire de Fin D'études

En vue de L'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : STRUCTURE

Thème :

Etude comparative de l'utilisation
du sable de dune en substitution du
sable de rivière : cas des mortiers
normalisés

Réalisé par :
M^{elle} DAD Celia

Dirigé par :
M KHELIL. N (Promoteur)
M OULD OUALI .M (co-promoteur)

Année Universitaire :2018/2019

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le clément, le tout puissant, qui m'as mis sur le bon chemin et qui m'as donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*Je souhaite avant tout témoigner ma reconnaissance à **Monsieur Khelil Nacim** qui m'a fait confiance en acceptant de m'encadrer sur ce sujet. Je lui suis très reconnaissante de l'opportunité qu'il m'a donnée. Ses remarques pertinentes et son esprit de synthèse m'ont permis d'avoir une autre vision sur la problématique. J'estime avoir énormément appris à son contact.*

*Je voudrais aussi que mon Co-encadreur **Monsieur Ould Ouali Mohend**, trouve ici mes meilleures salutations et ma reconnaissance pour son accueil chaleureux, son soutien, ses conseils et ses remarques importantes qui nous ont permis l'achèvement de ce travail.*

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail et m'ont généreusement fait part de leur remarques qui serviront à perfectionner ce travail.

Mes plus sincères remerciements vont également aux responsables et personnels du Laboratoire Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de TIZI OUZOU, que j'ai côtoyé quotidiennement.

Mes plus sincères remerciements vont également aux responsables et personnels du Laboratoire Composite et Mécanique des Matériaux-Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement-Faculté : Sciences et Ingénierie- Université M'HAMED BOUGARA-Boumerdes

*Je remercie également **Mr Maghelat** le responsable du hall technologie et industriel d'Oued-Aissi ainsi que toute son équipe pour son accueil.*

*Enfin, Je tiens à remercier chaleureusement ma famille et en particulier **mes parents** qui m'ont épaulée tout au long de mes études.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A ma très chère grand-mère **Hammama** qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

*A mon très cher **père** que j'aime plus que tout et qui m'a toujours encouragée et
qui croit en moi, merci au meilleur papa du monde.*

*A ma très chère **mère** qui me soutient dans le bonheur comme dans la douleur,
qui me comprend mieux que quiconque.*

*Tous les trois ont éclairé mon chemin en me tenant la main tout au long de mes
années d'étude « Que Dieu me les garde ».*

*A ma très chère sœur **Lylia** et son mari **Said** ainsi que leurs enfants **Aris** et
Aline.*

*A mon très cher frère **Aghilas** et sa femme **Lydia**.*

*A toute la famille **DAD** ainsi que **BERROUCHE**.*

*A ma copine **Lylia MEZIANE** qui m'a aidée tout au long de ce travail.*

*A mes amies : **lysa Cherifi, Dylia***

A tous ceux que j'aime

CELIA DAD .

Résumé

Ce présent travail de recherche a consisté en l'étude du comportement mécanique des mortiers normalisés en utilisant le sable de dune en substitution du sable de rivière et qui se trouve de manière abondante dans l'Algérie (60% du territoire du pays). Ce sable présente des caractéristiques qui permettent d'entrevoir une valorisation dans le domaine de la construction sous forme de mortier pour maçonnerie.

L'objectif de ce travail était d'évaluer expérimentalement l'influence du sable de dune, sur le comportement mécanique des mortiers normalisés. Un programme expérimental a été mené sur un échantillonnage de diamètres de granulats de sable de dune et de sable Alluvionnaire ([0.2-0.315SD] -[0.315-0.5SD] -[0.5-0.63SD] -[0.315-0.5SR] -[1-1.25SR] -[3.15-4SR]), à travers des essais notamment de mesures de résistance à la compression et traction par flexion à raison de trois éprouvettes par essai. Afin de valoriser l'utilisations du sable de dune du sud algérien qu'est abondant en quantité quasi-inépuisable à la place du sable de rivière peu disponible sur le marché et dont l'utilisation est un impact environnemental négatif du fait de sa surexploitation importante.

Cette étude a permis de montrer les performances mécaniques quasi-similaires des mortiers normalisés à base de sable de dune à celles des mortiers à base de sable alluvionnaire.

Mots-clefs: mortier normalisé, sable de dune , comportement mécanique, sable alluvionnaire, ultrason

Abstract :

The present research work consisted in the study of the mechanical behavior of standardized mortars using dune sand as a replacement to river sand, and which is found in abundance in Algeria (60% of the country). This sand has characteristics that allow a possible valorization in the construction field in the form of masonry mortar.

The objective of this work was to experimentally assess the influence of dune sand, on the mechanical behavior of standardized mortars. An experimental program was carried out on a sampling of aggregate sizes of dune and alluvium sand ([0.2-0.315SD] - [0.315-0.5SD] - [0.5-0.63SD] - [0.315-0.5SA] - [1-1.25SA] - [3.15-4SA]), particularly through tests measurements of compressive and flexural tensile on three test specimens each. In order to enhance the use of sand from the dunes of southern Algeria, which is abundant in almost inexhaustible quantities, instead of river sand which is very little available on the market and which use has a negative environmental impact due to its significant over-exploitation.

This study allowed to show the almost similar mechanical performances of standardized mortars based on dune sand with those of mortars based on alluvium sand.

Keywords : standardized mortar, dune sand, mechanical behavior, alluvium sand, ultrasound

SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract.....	IV
Sommaire.....	V
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux.....	XII
Abréviation.....	XIV
Introduction générale	1

Partie I : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 Introduction	3
I. 2. Classification et types des mortiers	4
a. La nature.....	4
b.En fonction de leur masse volumique.	5
c.Suivant leur emploi	6
I.3.Propriétés de mortiers	7
I.3.1.La fluidité	7
I.3.2.La maniabilité	7
I.3.2.Le pouvoir de rétention d'eau	7
I.3.3.La résistance mécanique d'un mortier	8
I.4.Composition d'un mortier	8
I.4.1.Ciment.....	8
I.4.1.1.Constituants principaux	9
I.4.1.2.Constituants secondaires	13
I.4.1.3.Principe de fabrication des ciments courants.....	14
I.4.2. Différents types de ciment courants.....	20
I.4.3.Les caractéristiques physique du ciment Portland	23
I.4.3.1.Le comportement physico-chimique de la pâte.....	23
I.4.3.2. Caractéristiques chimiques du ciment.....	30
I.4.3.3. Caractéristiques mécaniques des ciments courants	31

I.4.2.Sable	32
I.4.3.L'eau.....	32
I.4.4.Les adjuvants	33
a.Adjuvant fonction réducteur d'eau.....	33
b.Adjuvant fonction accélérateur de prise	34
c.Adjuvant fonction retardateur de prise	35
d.Adjuvant fonction entraîneur d'air	36
e.Adjuvant fonction hydrofuge de masse	36
I.5.Les techniques particulières de mise en oeuvre	37

Chapitre II : LES GENERALITES SUR LES SABLES

II.1. Introduction.....	39
II.2. Granulats	39
II.2.1.Définition	39
II.2.2.Différents types de granulats	39
A. Granulats naturels courants	40
B. Granulats artificiels	41
II.2.3.Les sables.....	42
II.2.3.1 Classification des sables	42
II.2.3.1.1.Granulométrie	42
II.2.3.1.2.Propreté.....	43
II.2.3.1.3.Nature minéralogique	43
II.2.3.2.Les types des sables selon leur provenances	43
II.3.Les sables de dunes.....	44
II.3.1.Définition.....	44
II.3.2.Nature de sable de dune	44
II.3.2.1.Mécanismes de formation.....	44
II.3.2.2.Types de dunes	44
II.3.3.Physique des dunes	45
II.3.4.Diverses utilisations.....	46

II.3.5. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction	47
II.4. Caractéristiques principales des sables.....	48
A. Caractéristiques géométriques	48
B. Caractéristiques physiques	52

Partie II : Volet Expérimental

Chapitre III : Techniques Expérimentales

III.1. Introduction	58
III.2. Matériaux utilisés	59
III.2.1. Le ciment (C E M II /B –L 42 ,5N).....	59
III.2.2 Le Sable	60
III.2.2.1. Masse volumique absolue	61
III.2.2.2. Masse volumique apparente	61
III.2.2.3. Equivalent de sable.....	62
III.2.2.4. Analyse granulométrique par tamisage	66
III.2.3. Eau de gâchage.....	69
III.3. Formulation et conservation des éprouvettes	69
III.3.1 Formulation	69
III.3.2. Le malaxage	71
III.3.3. Procédure expérimentale	72
III.3.3.1 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais	72
III.3.3.2 Confection des éprouvettes	72
III.3.3.2.1. Malaxage du mortier	72
III.3.3.2.2. Remplissage et conservation des moules	73
III.3.3.3. Caractérisation des différentes compositions	75
III.3.3.3.1. Essai non destructif	75
III.3.3.3.2. Essais de caractérisation du BFUP à l'état durci	77
III.3.3.3.2.1. Résistance à la flexion	77

III.3.3.3.2.2. Résistance mécanique à la compression	79
III.4. Conclusion.....	81

Chapitre IV : Résultats et analyses

IV.1. Introduction	82
IV.2. Les propriétés physico-mécaniques	82
IV.2.1. Résultats des masses des bétons durcis	82
IV.2.2. Contrôle non destructif.....	85
IV.2.2.1 Résultats des essais d'auscultation sonore	85
IV.2.3. Essais à l'état durci	89
IV.2.3.1 Résultats des résistances à la compression à 60 jours	89
IV.2.3.2 Résistance à la flexion 3 Pts.....	92
IV.2.3.3. Résultats des essais de Flexion 4 point	98
Conclusion générale	102
Références bibliographiques.....	103
Annexes.....	106

Liste des figures

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I.1:Mortier	3
Figure I.2 : Mortier de ciment	5
Figure I.3 :Mortier de chaux	5
Figure I.4. Mortier de plâtre	5
Figure I.5 : Mortier mixte.....	5
Figures I.6 : (a) mortier acoustique, (b) mortier de finissage, (c) mortier de maçonnerie.....	7
Figure I.7 : Compostion d'un mortier	6
Figure I.8 : Poudre de ciment courant	9
Figure I.9 : Constituant du ciment.....	10
Figure I.10 : Microphotographie d'un clinker	11
Figure I-11 : Schéma de la fabrication du ciment	19
Figure I. 12 : Fabrication du ciment	20
Figure I.13 :Détermination du temps de début de prise	24
Figure I.14 :Détermination du temps de fin de prise.....	24
Figure I.15 : Evaluation du temps de prise en fonction de la température	25
Figure I.16:Influence de la température sur la prise des ciments	25
Figure I.17 :Le déelopement des résistances dans le temps des constituants purs du CP	27
Figure I.18: Résistance à la compression du mortier à base du ciment Portland.....	28
Figure I.19:Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers	30
Figure I.20 :Suspension d'eau et de grains de ciment sans et avec ajout d'adjuvant	34
Figure I.21 : Résistace à la compression avec et sans accélérateur.....	35
Figure I.22 : Résistance à la compression avec et sans retardateur.....	36
Figure I.23 :Effet de l'hydofuge de masse	36

Chapitre II : LES GENERALITES SUR LES SABLES

Figure II.1:Exemple des granulats alluvionnaires naturels	40
Figure II.2 :Exemple des granlats de carrière	41
Figure II.3 :La barkhane.....	45
Figure II.4 :Morphologie de la barkhane.....	46
Figure II.5 :Tamiseuse électrique	49
Figure II. 6:L'analyse granulométrique par tamisage	50
Figure II.7 :Exemple de courbe granulaire des granulats pour mortier.....	50
Figure II.8 :Principe de détermination de la masse volumique absolue	53
Figure II.9 : Essai d'équivalent de sable	54
Figure II.10 :Principe de détermination d'équivalent de sable	55

Chapitre III : Techniques Expérimentales

Figure III.1 :Ciment utilisé dans la confection de mortier	59
Figure III.2 :Lavage et séchage des granulats utilisés dans les différentes formulations du mortier	60
Figure III.3 :Essai de la détermination de la masse volumique absolue.....	61
Figure III.4 :Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable	62
Figure III.5 :Equivalent de sable pour les deux types de sables	63
Figure III.6:Tamiseuse électrique.....	66
Figure III.7 :Courbe d'analyse granulométrique par tamisage d'un sable de dune (0/2)	66
Figure III.8 :Courbe d'analyse granulométrique par tamisage d'un sable de rivière (0/4).....	67
Figure III.9 :Malaxeur électrique utilisé dans la fabrication du mortier	70
Figure III.10 :Les étapes de malaxage du Mortier normalisé.....	72
Figure III-11 :Remplissage et Conservation des éprouvettes du mortier normalisé	73
Figure III. 12 :Différents types de dispositions des transducteurs	74
Figure III.13 :Appareil à ultrasons	76
Figure III.14 :Dispositif pour l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points).....	77
Figure III.15 :Dispositif pour l'essai mécanique de rupture par flexion (4 points).....	78
Figure III.16 :Dispositif de l'essai mécanique de compression	79

Chapitre IV : Résultats et analyses

Figure IV.1:Prise de masses des éprouvettes prismatiques des mortiers normalisés à base du sable de dune avant et après conservaton dans l'eau	84
Figure IV.2 : Prise de masses des éprouvettes prismatiques des mortiers normalisés à base du sable de rivière avant et après la conservation dans l'eau	84
Figure IV.3 :Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de dune sans entaille	86
Figure IV.4: Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de dune avec entaille	87
Figures IV.5 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de dune avec/ sans entaille	87
Figure IV. 6 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de rivière sans entaille	88
Figure IV.7 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de rivière avec entaille	88
Figure IV.8 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de dune avec/ sans entaille	89
Figures IV.9 :Corps d'éprouvette ayant subi l'essai de compression	90
Figure IV.10 :La résistance en compression des mortiers à base de sable de dune	92
Figure IV.11 : La résistance en compression des mortiers à base de sable de rivière	92
Figure IV. 12 :Dispositif de l'essai ainsi que l'état de l'éprouvette après l'essai de traction par flexion	94
Figure IV.13 :Variation de la résistance en flexion 3 points des éprouvettes en mortiers à base de sable de dune sans entaille	96
Figure IV.14 : Variation de la résistance en flexion 3 points des éprouvettes en mortiers à base de sable de dune avec entaille	96
Figure IV.15 : Variation de la résistance en flexion 3 points des éprouvettes en mortiers à base de sable de dune avec et sans entaille	97

Figure IV.16: Variation de la résistance en flexion 3 points des éprouvettes en mortiers à base de sable de rivière sans entaille	97
Figure IV.17 : Variation de la résistance en flexion 3 points des éprouvettes en mortiers à base de sable de rivière avec entaille.....	98
Figure IV.18 : Variation de la résistance en flexion 3 points des éprouvettes en mortiers à base de sable de rivière avec et sans entaille.....	98
Figure IV.19 : Etat de l'éprouvette après l'essai de flexion 4 points.....	100
Figure IV.20 :Evolution de la résistance en flexion 4 points des mortiers à base de sable de dune à 60 j sans entaille	101
Figure IV.21 :Evolution de la résistance en flexion 4 points des mortiers à base de sable de rivière à 60 j sans entaille	101

Liste des tableaux

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I.1 :Compositions des différents types de ciment en %	21
Tableau I.2 :Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition	22
Tableau I.3 :Spécification et valeurs caractéristiques en fonction de la classe	22
Tableau I.4 :Limite des classes et sous classes de résistances (nouvelles norme AFNOR)	23
Tableau I.5 :Le comportement et le dégagement de chaleur de constituants du clinker	26
Tableau I.6 :Caractéristique chimique du ciment courant	31
Tableau I.7 :Caractéristique mécanique des ciments courants	32
Tableau I.8 :Les différents types d' adjuvant et leurs fonctions	37

Chapitre II : LES GENERALITES SUR LES SABLES

Tableau II.1 :Série de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable	51
Tableau II.2 :Nature et qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable	56

Chapitre III : Techniques Expérimentales

Tableau III.1 :Composition chimique et minéralogique de Mâtine.....	60
Tableau III.2 :Caractéristiques physique de sable de rivière (0/3)	63
Tableau III.3 :Caractéristiques physique de sable de dune (0/2)	64
Tableau III.4 :Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G.DREUX.....	64
Tableau III.5 :Masses volumiques des diamètres utilisés.....	65
Tableau III.6 :Formulation d'un mortier normalisé	68
Tableau III.7 :Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques	69
Tableau III.8 :Formulation et séquence de malaxage	70
Tableau III.9 :La vitesse de propagation des ondes et la qualité du béton	75

Chapitre IV : Résultats et analyses

Tableau IV.1 :Récapitulatif des pesées des masses éprouvettes avant et après la conservation dans l'eau	83
Tableau IV.2 :Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier sable de dune sans entaille	85
Tableau IV.3 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier sable de dune avec entaille	85
Tableau IV.4 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier sable de rivière sans entaille	86
Tableau IV.5 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier sable de rivière avec entaille	86
Tableau IV.6 :Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 60 j	91

Tableau IV.7 : Valeurs de la résistance en traction des différentes formulations 95
Tableau IV.8 : Valeurs de la résistance en flexion 4 points des différentes formulations 100-101

Abréviations

Rc : l'activité du ciment en Pa.

C/E : le rapport ciment-eau.

MF : module de finesse

M : Masse (kg).

ρ_a : Masse volumique apparente

ρ : Masse volumique absolue

ES : équivalent de sable au piston

h : hauteur (m)

ESV : équivalent de sable visuel

SD : sable de dune

SR : sable de rivière

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison et la solidarisation et qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage...etc, afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage et combler les interstices entre les blocs de construction. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant (chaux ou ciment) toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement d'additions pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

De multiples compositions de mortiers sont présentes dans tous les secteurs du BTP, elles sont obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. En France, leur utilisation n'a fait qu'augmenter depuis 1970 pour arriver à une production proche de 4 millions de tonnes en 2011[SNMI 2013]. De plus, la complexité des mortiers entraîne une augmentation constante des mortiers préformulés, dits « industriels » ou « prêts à l'emploi », face au mortier réalisés sur chantier.

Les mortiers, de part nature est constitué d'un élément interne essentiel qu'est le sable en phase granulaire de diamètre très fin. En Algérie de grande quantités de sable roulé siliceux alluvionnaire sont utilisées pour la confection des bétons et mortiers. Mais les extractions excessives de ces sables ont fortement contribué à l'épuisement des ressources et ont provoqué des retombées néfastes sur l'environnement. De nombreuses régions du monde vivent cette situation et doivent aujourd'hui chercher des matériaux de substitution pour faire face à la demande croissante en granulats à béton et mortier. Un autre type de sable, disponible en quantité importante localement et ne présentant pas de problématiques environnementales notables existe, il s'agit du sable de dune, qui malgré son abondance, reste assez méconnu dans le bâtiment. Sa quantité se chiffre en milliards de m³, est disponible dans près de 60% du territoire et certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction ce qui permettra d'atteindre un équilibre entre les contraintes de protection de l'environnement et les considérations économiques et sociales.

Introduction Générale

Objectif de l'étude :

En partant de ces bases, le but principal de ce travail est de mettre en évidence la possibilité d'utiliser le sable de dune disponible en quantité en phase granulaire unique et de diamètre précis en le comparant au sable alluvionnaire afin de déterminer son influence sur les propriétés mécaniques à l'état frais et durcies des mortiers normalisés.

Ainsi, ce manuscrit présente :

Un premier chapitre : présente une recherche bibliographique sur les mortiers, leurs formulations, propriétés, avantages et domaines d'application.

Un deuxième chapitre : traite une synthèse bibliographique sur les généralités sur les sables en particulier les sables de dune.

Un troisième chapitre : aborde les techniques expérimentales utilisées : la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation des mortiers et la présentation des essais confectionnés au niveau du laboratoire béton-UMMTO et écrasés au niveau du laboratoire UR-MPE/FSI-Boumerdes.

Un quatrième chapitre : consacré aux résultats expérimentaux avec la discussion des résultats.

Enfin, ce mémoire se clôture par une conclusion générale

Chapitre I :

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau — et éventuellement un adjuvant — pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Les mortiers sont des mélanges à l'état durci ou frais constitués de sable, de liant et d'eau, avec ou sans adjuvant et additifs. On trouve différents types de mortiers selon leurs nature et pourcentage de constituants, malaxage, mise en œuvre et cure. [1]

En général, on distingue trois types de mortiers :

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

Les mortiers sont utilisés par les professionnels du bâtiment qui sont le maçon, le couvreur, le carreleur Dans la plupart des travaux de scellement ou de coffrage, leur but est de lier les briques les unes aux autres et de répartir les charges. La fabrication des mortiers est facile sauf qu'il faut un certain savoir-faire et demande le bon dosage qui peut varier en fonction des besoins.

Un mortier n'est autre chose qu'un béton à grain fin, il est donc soumis aux mêmes lois que les bétons. [1]



Figure I-1 : Mortier

I.2 Classification et types des mortiers

a. **La nature** : D'après la nature du liant, on distingue :

- **Mortiers de ciments** : Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus, un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour un mètre cube de sable [02].
- **Mortiers de chaux** : Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique [02].
- **Mortiers bâtards** : Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée [02].



Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue. Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants selon la caractéristique recherchée : plastifiants, entraîneurs d'air, retardateurs de prise, hydrofuges. L'incorporation de fibres de métalliques ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables [02].

- **Mortiers de plâtre** préparé à base de liants gypseux, à savoir les plâtres et les liants d'anhydrite
- **Mortiers mixtes** : obtenus en utilisant les liants de ciment à la chaux et ciment à l'argile. Le choix du type de liant est fait suivant la destination du mortier, les exigences requises, les conditions de températures et d'humidité pendant le durcissement et les conditions d'exploitation du bâtiment.



Figure I-2 : Mortier de ciment



Figure I-3 : Mortier de chaux



Figure I-4 : Mortier de plâtre



Figure I-5 : Mortier mixte

b. En fonction de leur masse volumique : à l'état sec les mortiers sont divisés en : [3]

- **Mortiers lourds** à masse volumique de 1500 kg/m^3 et plus ; pour la préparation de ces mortiers, on utilise des sables lourds quartzeux et autres ;
- **Mortiers légers** à masse volumique inférieure à 1500 kg/m^3 dont les agrégats sont des sables poreux et légers de pierre ponce, de tuf, laitiers, céramiques et autres fins agrégats légers.
- **Le mortier (léger) isolant :** La norme NBN-EN 998-2 définit un mortier de maçonnerie allégé comme étant un mortier de maçonnerie dont le poids volumique sec après durcissement est inférieur à 1300 kg/m^3 . Certains adjuvants rendent ces mortiers de maçonnerie plus légers et donc plus isolants son rôle est l'amélioration de la résistance thermique de la maçonnerie.

À titre d'exemple de comparaison en termes de masses volumique :

- Le mortier de ciment : 1900 kg/m^3
- Le mortier bâtard : 1600 kg/m^3

c. **Suivant leur emploi** : les mortiers se subdivisent en :

- **Mortiers de maçonnerie** : pour la pose des murs en pierres ou de gros éléments.
- **Mortiers de finissage** : pour les enduits, pour la confection des éléments d'architecture, pour porter les couches décoratives sur les blocs et panneaux de murs.
- **Mortiers spéciaux** : possédant quelques propriétés particulières (acoustique, de tamponnage, de protection contre les rayons X, etc.); ils ne sont que rarement employés.
- **Le mortier de maçonnerie industriel ou mortier préparé en usine** : On utilise les mortiers préparés en usine car ils offrent l'avantage d'une qualité certifiée, qui maintient la stabilité du rapport entre les composants du mortier, ce qui est un peu délicat à avoir avec une bétonnière classique.
- **Les mortiers de maçonnerie normalisés**

En ce qui concerne les mortiers de maçonnerie normalisés, la norme NBN-EN 998-2 précise les types suivants :

- Le type de mortier selon le projet (art. 3.2 de la NBN-EN 998-2) : mortier livré pour des prestations et des exigences d'utilisation spécifique
- Le type de mortier selon l'usage (art. 3.3 de la NBN-EN 998-2) : mortier pour usage ordinaire(G), mortier-colle (T) et mortier de ciment léger (L).
- Le type de mortier selon la méthode de fabrication (art. 3.4 de la NBN-EN 998-2) : mortier humide industriel, mortier sec industriel et mortier partiellement préparé en usine.

L'ancienne norme belge NBN B 14-001 (retirée) distinguait les mortiers de maçonnerie normalisés en mortiers de ciment et mortiers bâtards, selon leur résistance moyenne à la compression après 28 jours.



Figure I-6 : (a) mortier acoustique, (b) mortier de finissage, (c) mortier de maçonnerie

I.3 Propriétés de mortiers : Les propriétés principales d'une pâte d'un mortier sont : [3]

I.3.1 La fluidité

Une pâte de mortier peut avoir, suivant les composants des consistances différents, depuis sèche jusqu'à fluide. Les mortiers de maçonnerie, de travaux de finissage des bâtiments et autres se font suffisamment fluides. On exprime la fluidité d'une pâte d'un mortier par la profondeur d'enfoncement dans la pâte d'un cône métallique pesant 300 g et ayant un angle au sommet de 30°.

I.3.2 La maniabilité

Elle est déterminée par la fluidité c'est-à-dire : le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie, sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérent à la surface de base. Une composition préparée par exemple avec peu de pâte de ciment est sèche et peu maniable. Dans ce cas, on se sert des adjuvants plastifiants minéraux ou organiques superficiellement actifs.

I.3.3 Le pouvoir de rétention d'eau

Cette caractéristique est caractérisée par la propriété de la pâte de ne pas se stratifier pendant le transport et de conserver assez d'eau. Une pâte de mortier à hydrophilie basse se stratifie au court de transport et lorsqu'on la pose sur une surface poreuse (brique d'argile, béton, bois), elle lui restitue rapidement l'eau. La dessiccation du mortier peut être si importante qu'il n'y aura plus suffisamment d'eau pour le durcissement du mortier qui ne pourra pas atteindre la résistance requise. Le pouvoir de retenir de l'eau peut être augmenté par l'introduction des plastifiants minéraux et organiques.

I.3.4 La résistance mécanique d'un mortier

Après durcissement, la résistance mécanique du mortier dépend de l'activité du liant et du rapport ciment-eau. La formule empirique suivante proposée par le professeur N. Popov [4] exprime la résistance des mortiers à ciments Portland :

$$R_m = 0,25 R_c(C/E - 0,5)$$

Avec :

R_c : l'activité du ciment en Pa.

C/E : le rapport ciment-eau.

Cette formule est valable pour les mortiers posés sur une base compacte ; si la base est poreuse, elle aspire l'eau du mortier en le rendant compact. La résistance mécanique des mortiers dépend aussi de la consommation du ciment et de la qualité de sable.

I.4 Composition d'un mortier

Les mortiers sont en fait des micros - bétons et leurs principes de compositions sont les mêmes. [4]

Ils sont composés de ciment, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants. On peut l'illustrer par la figure ci-contre :

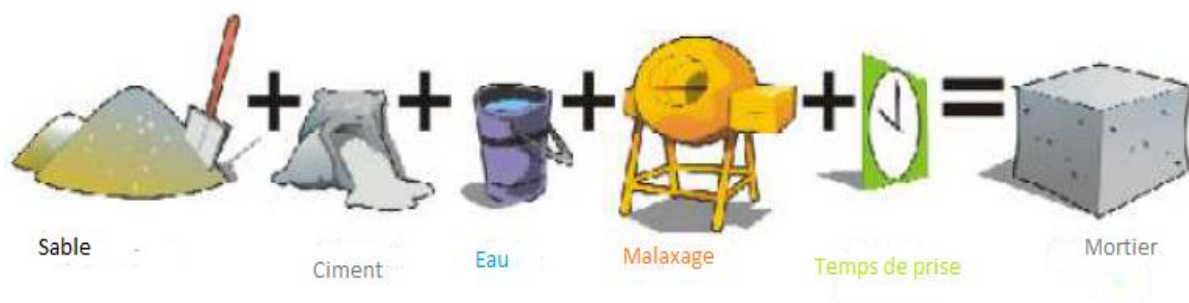


Figure I-7 : Composition d'un mortier

I.4.1 Ciment

Le ciment est un **liant** hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment. [05]



Figure I-8 : Poudre de ciment courant.

I-4-1-1 Constituants principaux

Les ciments courants ont pour constituant le clinker et le gypse, auquel il peut être ajouté suivant leur type :

- du calcaire
- du laitier de haut fourneau
- des cendres volantes
- des fins calcaires,
- de la pouzzolane naturelle
- des schistes calcinés
- des fumées de silice

Ils ont pour but de modifier certaines de leurs propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques particulières qu'il est nécessaire d'obtenir. [05]



Figure I-9 : Constituant du ciment. [6]

A. Clinker portland (k)

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous la forme de petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

- Alite : silicate tricalcique également dénommé [C3S], dont la formule est $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$
- Bélite : silicate bicalcique [C2S], de formule $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$
- Cérite : aluminat tricalcique [C3A], de formule $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$
- Alumino-ferrite tétracalcique [C4AF], de formule $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$

Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases sont en moyennes de :

50 à 70% pour le C3S

5 à 25% pour le C2S

2 à 12% pour le C3A

0 à 15 % pour le C4AF

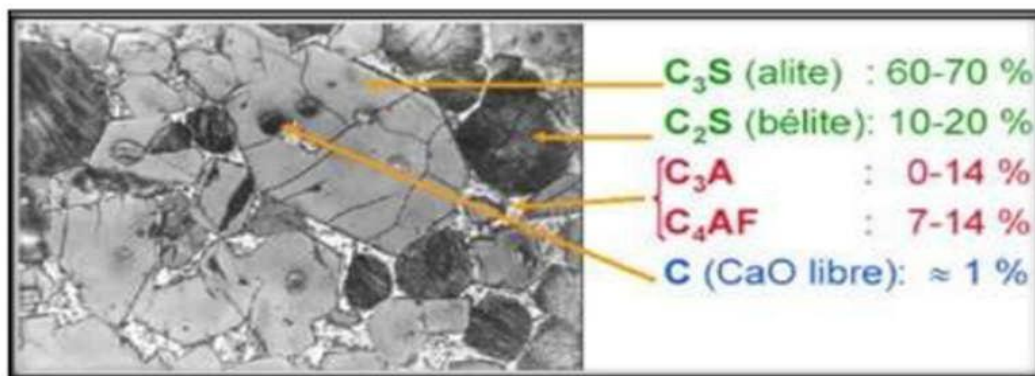


Figure I-10 : Microphotographie d'un clinker.

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases, c'est ainsi que :

Le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le C_2S , donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances jeune âge.

Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme ; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée, et le phénomène de prise est plus faible.

L'aluminate tricalcique C_3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait, elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale. Elle est par ailleurs facilement attaquée par les sulfates.

L'alumino-ferrite tétracalcique C_4AF , qui forme une solution solide de C_2A et C_2F , réagit moins vite que C_3A ; son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

De la chaux libre dont le pourcentage ne doit pas excéder 2 % dans le clinker pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau.

De l'oxyde de magnésium MgO , encore appelé périclase, qui, non combiné, peut être à l'origine d'une expansion par réaction avec l'eau.

De ce qui précède, il ressort qu'un ciment contenant par exemple 60 % de C_3S ainsi qu'un pourcentage en C_3A supérieur à 10 %, présentera de fortes résistances initiales et pourra

être avantageusement utilisé par temps froid, alors qu'un ciment dont le pourcentage en C3S est supérieur à 40 % et celui en C3A n'excède pas 5 %, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé par temps chaud. [05]

B. Laitier granulé de haut-fourneau (S)

Le laitier, sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 % ainsi que de la magnésite et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre, il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. [05]

C. Cendres volantes (V et W)

Les cendres volantes, produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques et peuvent être :

- Siliceuse (V), auquel cas elles présentent des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire qu'elles sont capables de fixer la chaux à température ambiante, faisant prise et durcissant par hydratation ;
- Ou calciques (W), auquel cas, outre leurs propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes siliceuses (v) sont constituées de silice réactive, entre 40 et 55 %, proportion qui ne doit jamais être inférieure à 25 %, et d'alumine entre 20 et 30 % environ, la proportion de chaux réactive devant être inférieure à 5 %. Les cendres calciques (W), moins souvent utilisées, doivent contenir, quant à elles, une proportion de chaux réactive supérieure à 5 %. [05]

D. Pouzzolanes naturelles (Z)

Les pouzzolanes naturelles sont des produits généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont

essentiellement composées de silice réactive «dans des proportions supérieures à 25 % », d'alumine et d'oxyde de fer. [05]

E. Schistes calcinés (T)

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de 800 °C, présentent, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés. Actuellement, les ciments fabriqués en France ne comportent pas de schistes calcinés. [01]

F. Calcaires (L)

Les calcaires utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, c'est-à-dire lorsqu'ils représentent plus de 5 % de la masse totale du ciment, doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75 % en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit au plus de 1,20 g pour 100 g et une teneur en matières organiques (TOC) aux plus égales à 0,5 %. [05]

G. Fumées de silice (D)

Les fumées de silice, constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe.

En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie des ciments. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Elles doivent contenir au moins 85 % de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolanes naturelles ou des cendres volantes. [05]

I-4-1-2. Constituants secondaires

Les constituants secondaires peuvent être :

Soit l'un des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion ≤ 5 %, exception faite du clinker ;

Soit des fillers (F), leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3 %.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines généralement inertes, mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment, ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton. [05]

A. Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium a pour effet de réguler la prise du ciment. Le sulfate de calcium qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hémihydrate, doit être ajouté en faible quantité, c'est-à-dire de l'ordre de 3 à 5 % maximum. [05].

B. Additifs

Les additifs ne doivent présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments, mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

Il peut s'agir d'agents de mouture, fréquemment employés, qui sont des sels organiques solubles utilisés à des doses extrêmement faibles. Ils agissent comme défloculant, empêchant ainsi les phénomènes de réagglomération des grains en cours de broyage.

Il peut s'agir également de sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, bétons ou coulis qui, dans ce cas, agissent sur une caractéristique précise, mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée en vue d'éviter d'éventuelles incompatibilités avec d'autres produits.

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne devant pas dépasser 0,5 % de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agents de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CHF-CEM III/A ou B et des CLK-CEM III/C, pour lesquels la proportion de sels chlorés (NaCl) est autorisée jusqu'à 1 %. [05]

I-4-1-3 Principe de fabrication des ciments courants

Sans entrer dans le détail de la fabrication des ciments, il est nécessaire d'en connaître les principes généraux et les différentes phases.

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans des proportions respectivement proches de 80 et 20 %.

Le calcaire apporte le calcium ; l'argile apporte la silice SiO_2 , l'alumine Al_2O_3 et l'oxyde ferrique Fe_2O_3 , nécessaires au processus de formation du clinker.

Ces matières premières contiennent par ailleurs d'autres éléments que ces oxydes fondamentaux, tels de la magnésite MgO , des sulfates, des sulfures, des alcalins K_2O et Na_2O ..., dont les pourcentages doivent être contenus en deçà de limites précises. [05]

La fabrication du ciment comporte les étapes suivantes :

I-4-1-3-1 Extraction

L'extraction consiste en général pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargés ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploitée au moyen d'excavateurs ou de roues pelles avant d'être transportées par camions. [05]

I-4-1-3-2 Concassage

Les matériaux extraits des carrières présentant des granulométries grossières allant jusqu'à m^3 , le concassage effectué le plus souvent sur les lieux mêmes de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50, voire 100 mm au maximum. Les matériels utilisés à cette fin peuvent être mobiles, ou fixes. [05]

I-4-1-3-3 Préparation du cru

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proches du rapport 80 de calcaire pour 20 d'argile, peut se faire suivant différents procédés. Le résultat final devant permettre l'obtention d'un clinker dont la teneur moyenne des différents oxydes constitutifs est de l'ordre de :

- 65 % de CaO fourchette de 60 à 69 %,
- 21 % de SiO_2 fourchette de 18 à 24 %,
- 6 % de Al_2O_3 fourchette de 4 à 8 %,

- 3 % de Fe_2O_3 fourchette de 1 à 8 %,
- 2% de MgO fourchette de 0 à 5 % maximum,
- 1 % d'alcalis fourchette de 0 à 2 % maximum,
- 1 % de SO_3 fourchette de 0 à 3 % maximum

Ces proportions permettant de prévoir certaines des qualités ultérieures du ciment.

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

- La voie sèche, la plus généralement utilisée dont nous résumons les phases aux paragraphes 2.3.1 à 2.3.4
- La voie humide, pratiquement abandonnée parce que grande consommatrice d'énergie et qui consiste à préparer une pâte dans des délayeurs, pâte qui est ensuite homogénéisée et stockée. Cette voie s'impose lorsque les matériaux extraits présentent un taux d'humidité élevé.
- La voie semi-sèche qui consiste à humidifier la poudre obtenue après broyage et séchage pour l'agglomérer sous forme de granules qui sont ensuite cuits sur une grille mobile
- La voie semi-humide qui consiste à filtrer la pâte réalisée de façon analogue à la voie humide, mais après filtration, à en faire des boudins qui sont ensuite cuits sur une grille.

La fabrication par voie sèche, comporte les phases suivantes :

I-4-1-3-4 Pré homogénéisation

Cette phase qui a pour but de réaliser un mélange préliminaire consiste à déposer les matériaux constitutifs du cru en couches successives, de faible épaisseur, formant le « tas de pré homogénéisation ». [05]

I-4-1-3-5 Broyage-séchage

Repris à l'aide de roues pelles ou de gratteurs, le mélange précédent est envoyé à la station de broyage afin d'être réduit en une poudre de grain inférieure à 160 microns. [05]

I-4-1-3-6 Séparation

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à renvoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les fines contenues dans les gaz. [05]

I-4-1-3-7 Homogénéisation

C'est au cours de cette phase que grâce à un brassage pneumatique ou mécanique vigoureux, peut être obtenu un produit parfaitement homogène, de caractéristiques chimiques uniformes, apte à être cuit. [05]

I-4-1-3-8 Cuisson

Réalisée dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans le procédé par voie sèche (de 150 m dans le procédé par voie humide) à une température comprise entre 1400 et 1500 °C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle du traitement comportant les phases suivantes :

Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur situé à l'amont du four,

Le gaz chaud provenant du four y brassant la farine à contre-courant

La décomposition des argiles s'effectue au-dessus de 500 °C

La décarbonatation des calcaires s'effectue à 950 °C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises entre 550 et 1000 °C

La formation du clinker ou clinkérisation se produit à 1450 °C, et s'effectue en partie avale du four près du brûleur.

I-4-1-3-9 Refroidissement

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450 °C à la sortie du four à environ 50/250 °C suivant les types de refroidisseurs. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent pouvant amener la libération de chaux libre et la transformation du C3S en C2S qui entraîne une baisse de résistances. [05]

I-4-1-3-10 Broyage

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granules de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (laitier, cendres...), ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés. [05]

I-4-1-3-11 Stockage, ensachage, et expédition

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché, soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30 % de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure. La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches. [05]

Les étapes de fabrication du ciment sont résumées dans le schéma suivant :

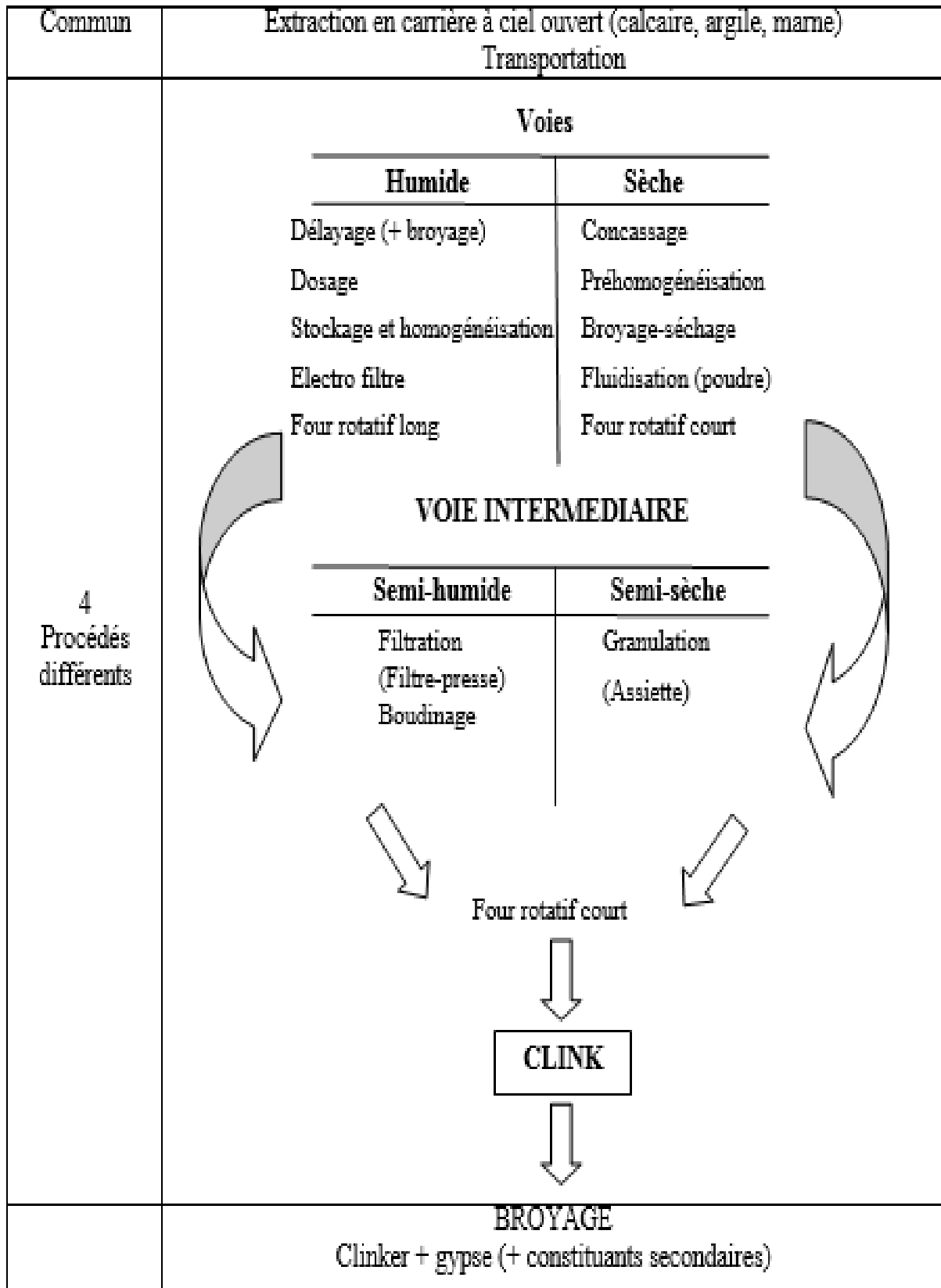


Figure I-11 : Schéma de la fabrication du ciment [07]

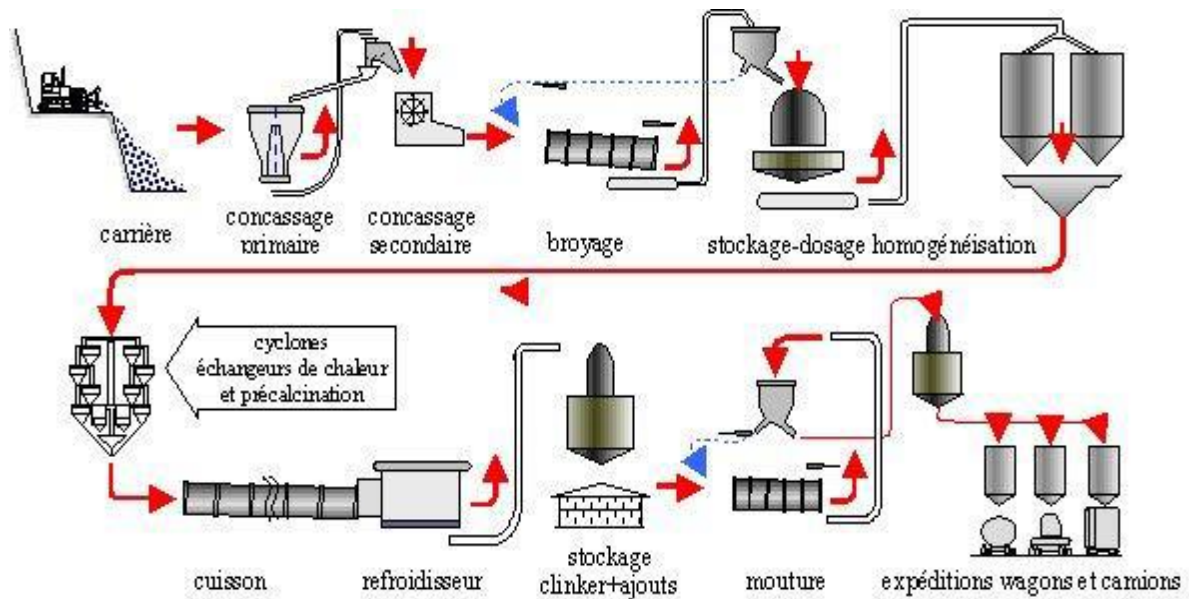


Figure I-12 : Fabrication du ciment

I-4-2 Différents types de ciments courants

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

- **CEM I : Ciment Portland Ordinaire (CPO) ou CPA en Algérie** : ils sont composés de 95 % de clinker et 5 % de constituants secondaires. Ils sont utilisés pour la confection de béton armé ou précontraint.
- **CEM II : Ciment Portland composé (CPJ)** : ils sont composés de 65 % de clinker et de 35% de constituants secondaires ; Ils sont utilisés pour les travaux courants en béton armé.
- **CEM III : Ciment de Haut fourneau (CHF)** : ils sont composés de 5 à 64 % de clinker et de 36 à 80 % de laitier.Ils sont utilisés pour les fondations ; les travaux souterrains ou milieux agressifs

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- **CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ) :** ils sont composés de 45 à 89 % de clinker et de 10 à 55 % de pouzzolane, cendres volantes et fumée de silice. Ils sont utilisés pour le béton armé dans les travaux maritimes.
- **CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC) :** ils sont composés de 20 à 64 % de clinker, 18 à 50 % de laitier et 18 à 50 % de cendres volantes. Ils sont utilisés pour le béton en milieu agressif.

Tableau.I.1: Compositions des différents types de ciments en % [06]

	clinker	laitier	pouzzolanes ou cendres	calcaire ou silice ou schiste	constituants secondaires (*)
CEM I	> 95				< 5
CEM II	> 65	← 6 à 35 →			< 5
CEM III	5 à 64	36 à 95			< 5
CEM IV	45 à 89		11 à 55		< 5
CEM V	20 à 64	18 à 50	18 à 50		< 5

- **Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours ; des sous-classes « R » sont associées à ces 3 classes principales pour désignent des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées ; Classe 32.5, Classe 42 .5, Classe 52 .5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau I.3. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau. I.2 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

	Cim. Port-Land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CHF-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	95%	90% ≤94%	65% ≤79%	35% ≤64%	20% ≤34%	6% ≤19%	65% ≤90%	45% ≤64%	40% ≤64%	20% ≤39%
Laitier (S)	*	6%≤ total ≤20% (fumée de silice ≤10%)	21%≤ total ≤35% (fumée de silice ≤10%)	36% ≤65%	66% ≤80%	81% ≤95%	*	*	18% ≤30%	31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*			*	*	*	10%≤ total	36%≤ Total	18%≤ total	18%≤ total
Cendres siliceuses (V)	*			≤35%	*	*	≤35% (fumée ≤10%)	≤55% (fumée ≤10%)	≤30%	≤30%
Fumée de silice (D)	*			*	*	*	*	*	*	*
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

Tableau. I.3: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe. [07]

Classe	Résistance à la compression (MPa) En 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	Au jeune âge		A 28 jours				
	2 jours	7 jours	Mini.	Maxi.	(µm/m)	(min)	(min)
32.5		(17.5)	/32,5 (30)	≤52,5	≤800	/90	≤10
32.5 R	/13.5 (12)	/	/32,5 (30)	≤52,5	≤1000	/90	≤10
42.5	/12.5 (10)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1000	/60	≤10
42.5 R	/20 (18)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1000	/60	≤10
52.5	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤10
52.5 R	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤10

Tableau. I. 4 : Limite des classes et sous classes de résistances (nouvelles norme AFNOR)

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours minimales	à 28 jours maximales
350	-	-	250	450
450	R (rapide)	150	350	550
550	R (rapide)	225	450	650
THR Très hautes performances	-	300	550	-

I-4-3 Les caractéristiques physique du ciment Portland

I-4-3-1 Comportement physico –chimique de la pâte

Le ciment est essentiellement constitué de :

- Silicate tricalcique : C3S
- Silicate bicalcique : C2S
- Aluminate tricalcique : C3A
- Alumino-ferrite-tétracalcique : C4AF

Une fois la poudre de ciment mélangée à l'eau, les réactions d'hydratation se développent, il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

Cette réaction chimique s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important selon les ciments et la rapidité de prise.

1. **Prise :**

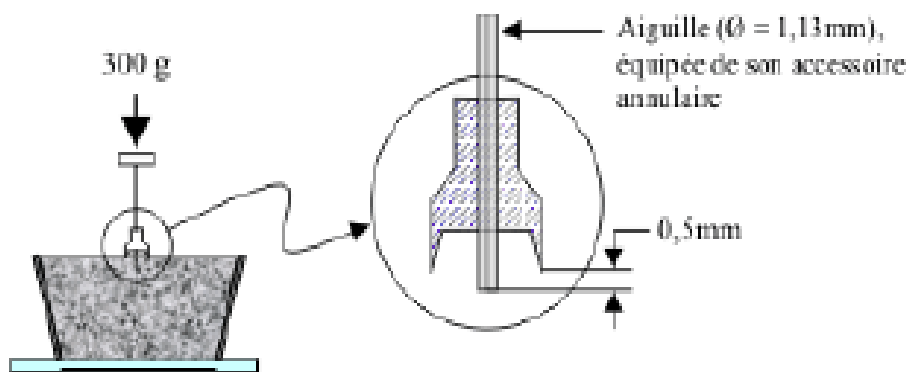
La prise du ciment c'est-à-dire le passage de la pâte de ciment (ciment + eau) d'une consistance fluide à un état solide est une phase essentielle dans la fabrication du béton ou mortier puisqu'elle donne sa cohésion au matériau.



FigureI-13 : Détermination du temps de début de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité ; ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique ; se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplis de pâte pure de ciment.

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.



FigureI-14 : Détermination du temps de fin de prise

La norme spécifie, suivant les ciments, un temps de prise minimal de :

- 1h30 pour les ciments des classes 32,5 et 32.5R.
- 1h pour les ciments des classes 42,5-42,5R et 52,5-52,5R.

D'une façon générale, les temps de prise sont supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h 30 pour la grande majorité des ciments, ces valeurs s'entendent pour une température ambiante de 20 °C

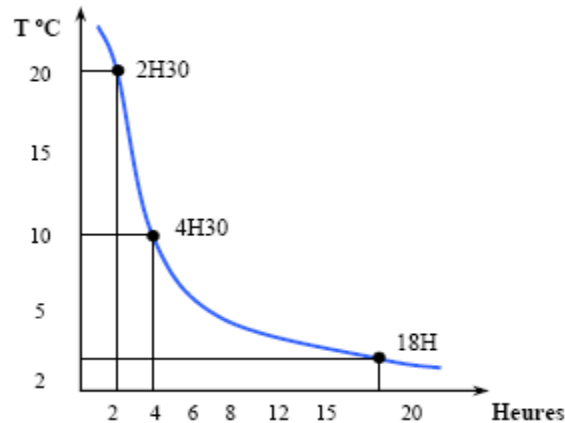


Figure I-15 : Evaluation du temps de prise en fonction de la température

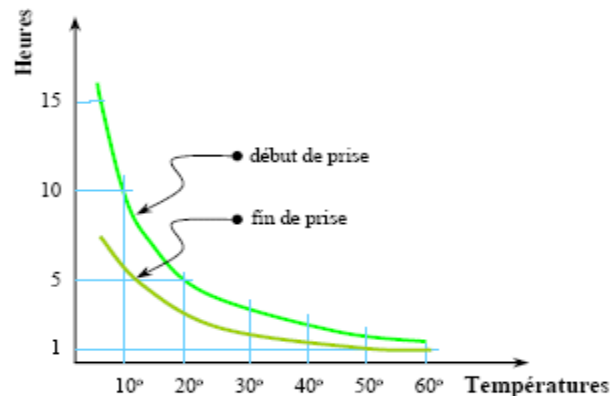


Figure I-16 : Influence de la température sur la prise des ciments.

2. Durcissement

Une fois la prise amorcée, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement rapide qui se poursuit pendant des mois voire des années au cours desquelles les résistances mécaniques continuent de croître.

Lorsqu'on désire un durcissement rapide, on choisit des ciments de classe élevée et de préférence de classe « R », c'est-à-dire ayant la caractéristique complémentaire. « Rapide ». Il est également possible d'utiliser du ciment alumineux fondu CA, qui après quelques jours a atteint la quasi-totalité de sa résistance. [02]

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au bout de quelques heures.

3. Prise et durcissement des constituants du clinker

Pour mieux comprendre les propriétés des ciments Portland, il est intéressant d'étudier comment réagit en présence d'eau chacun des constituants anhydres du ciment pris isolément

Tableau. I.5: Le comportement et le dégagement de chaleur des constituants du clinker

N°	CONSTITUANTS	COMPORTEMENT DES CONSTITUANTS PURS	CHALEUR DÉGAGÉE
1	C ₃ S	<ul style="list-style-type: none">▪ Fait prise et durcit rapidement.▪ Haute résistance atteinte à <i>court terme</i>	120 cal / gr
2	C ₂ S	<ul style="list-style-type: none">▪ Réagit lentement▪ Haute résistance atteinte à <i>long terme</i>	62 cal / gr
3	C ₃ A	<ul style="list-style-type: none">▪ Prise de façon très désordonnée et rapide▪ Faible résistance <p><i>(Pour régulariser la prise du C₃A, il faut ajouter du gypse)</i></p>	207 cal / gr
4	C ₄ AF	<ul style="list-style-type: none">▪ Faible résistance	100 cal / gr

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment Portland

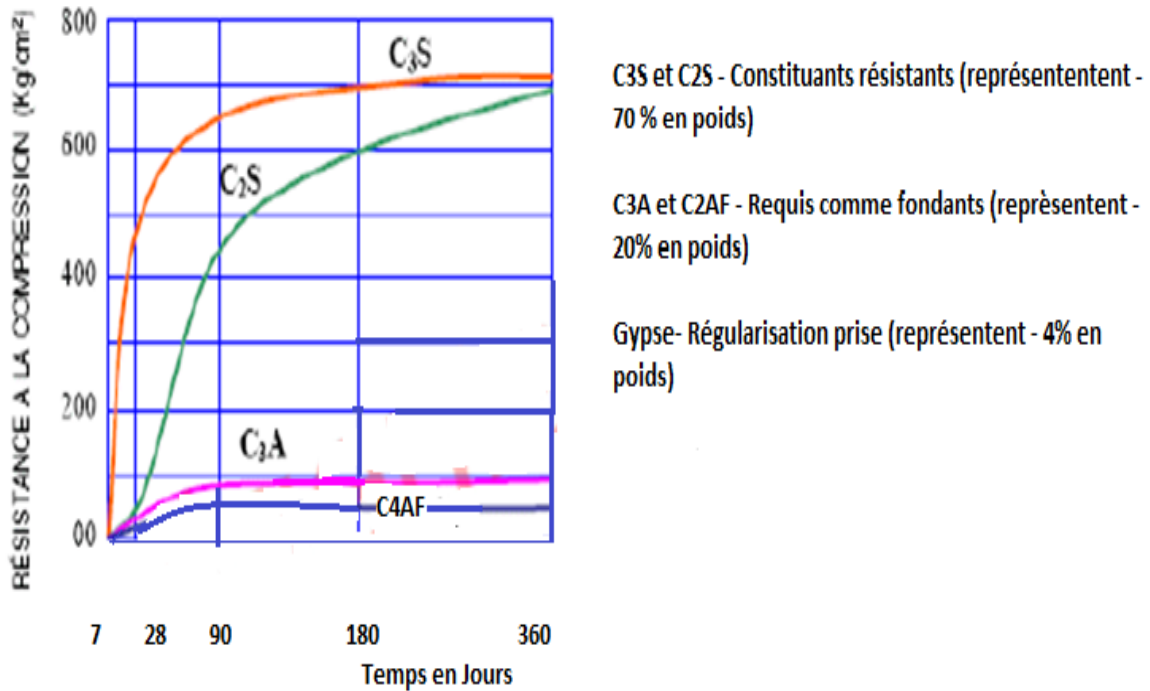


Figure I-17 : Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP

- Le C₃S agit principalement sur les résistances aux jeunes âges : plus le taux sera élevé, plus les résistances aux jeunes âges seront importantes
- Le C₂S agit principalement sur les résistances à long terme.

La figure I-18 présente les courbes de résistance à la compression en fonction du temps de conservation pour les mortiers à base de deux compositions de ciment Portland pur :

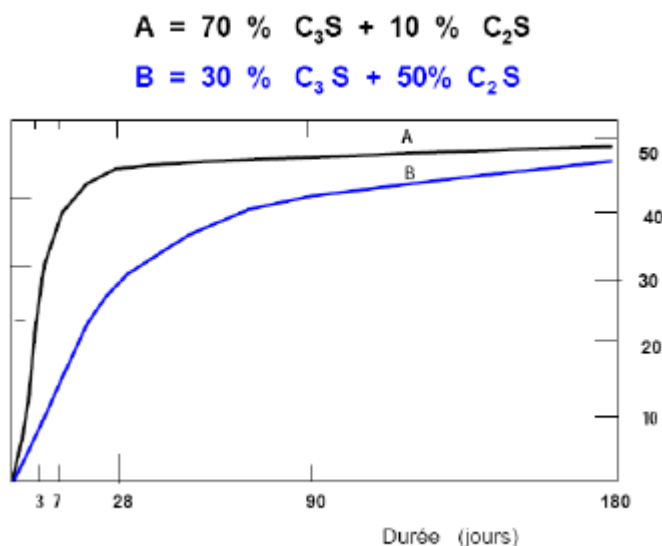


Figure I-18 : Résistance à la compression du mortier à base du ciment Portland

4. Chaleur d'hydratation

La dissolution des différents constituants est exothermique et, selon leurs pourcentages relatifs, le dégagement de chaleur est donc plus ou moins important, c'est le cas par exemple des ciments riches en C3A. Suivant les ciments, cette chaleur est dégagée en 12 heures, approximativement, entre 65 j/g par exemple pour certains CHF-CEM III/B et 300 j/g pour certains CPA-CEM I.

5. Finesse de mouture

La finesse de mouture, également appelée finesse Blaine, exprimée en cm^2/g , représente la surface spécifique ou surface développée d'une masse de 1 kg de ciment. Elle est, d'une façon générale, comprise entre 3000 et 3500 cm^2/g , certains ciments prompts naturels « CNP » ont un Blaine supérieur à 4500 cm^2/g . [02]

Plus la finesse est grande, plus les résistances sont précoces et élevées, mais par contre, plus les risques de retrait et par conséquent de fissuration ainsi que d'évènement du Ciment sont accrus.

6. Retrait

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent ; c'est le retrait.

On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section droite de 4× 4cm, conservées dans l'air à une température de 20 °C et une hygrométrie de 50 %. [02]

La norme impose les valeurs limites, à 28 jours, de :

- 800µm/m pour les ciments Portlands CPA-CEM 1 ET CPJ-CEMII de classe 32,5 R.
- 1000µm/m pour des types de ciment identique mais des classes 32,5 R -42,5 et 42,5R.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

La nature du ciment ;

La finesse de mouture ;

Le dosage en ciment, dans le béton ;

Le dosage en eau ;

La propreté et nature des granulats ;

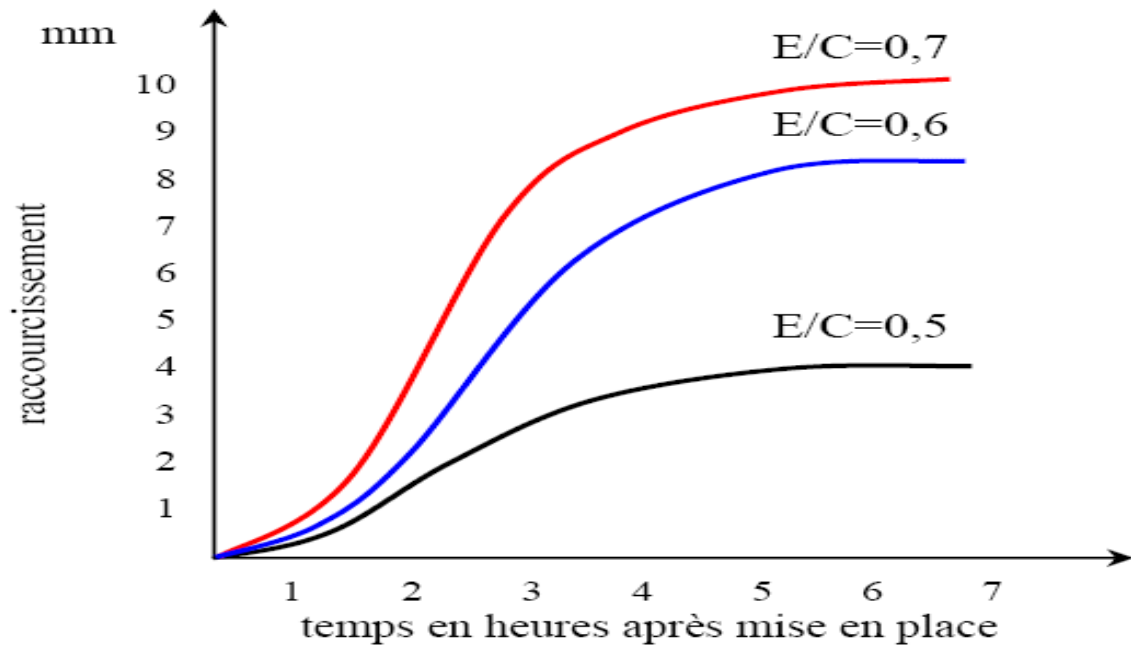


Figure I-19 : Influence du E/C sur le retrait plastique des mortiers

7. Gonflement

Si l'élément se trouve dans une atmosphère à humidité relative supérieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier augmentent ; c'est le gonflement. Ce qui entraîne l'apparition des tensions internes.

I-4-3-2 Caractéristiques chimiques du ciment

D'une façon générale, les ciments doivent respecter un certain nombre d'exigences, résumées dans le tableau .ci-après, quant à leur composition chimique.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau. I.6 : Caractéristique chimique de ciment courant. [02]

Propriétés	Type de ciment	Classe de résistance	Valeur maximale en % de la masse
Perte au feu	CPA-CEM I CHF-CEM II CLK-CEM III	Toutes classes	≤5
Oxyde de magnésium MgO	CPA-CEM I	Toutes classes	≤5
Résidu insoluble CPA-	CEM I CHF-CEM III CLK-CEM III	Toutes classes	≤5
Sulfates SO ₃ Limite supérieure	CPA-CEM I et CPJ-CEM II	32,5 32,5 R 42,5	≤3,5
	CPZ-CEM IV et CLC-CEM V CHF-CEM III	42,5 52,5 52,5 R Toutes classes	≤4 ≤4
Chlorures	Tous types de ciment	52,5 R Toutes les autres classes	≤0,05 ≤0,10

I-4-3-3 caractéristiques mécaniques des ciments courants

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, la norme spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes :

Tableau. I.7 : Caractéristique mécanique des ciments courants. [06]

Désignation de la classe	à 2 jours	à 28 jours	
	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite supérieure
32,5 32,5 R	- ≥13,5	≥32,5	≤52,5
42,5 42,5 R	≥12,5 ≥20	≥42,5	≤62,5
52,5 52,5 R	≥20 ≥30	≥52,5	

Classes « R », rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et leur intérêt particulièrement dans certaines circonstances telles que bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication.

I-4-2 Sable

Le sable, est une roche sédimentaire meuble, constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 et 5 mm

Ils proviennent de sources :

- ❖ **Naturels et roulés** : Mer, Oued, Sahara de nature siliceuse ou silico-calcaire

. Ce cas représente la quasi-totalité des constructions.

- ❖ **Spéciaux** (lourds, réfractaires, légers) : Sable de laitier, Sable d'oxydes de fer.

- ❖ **Industrielle** : issu du concassage des granulats de carrière, et plus rarement du recyclage des déchets de construction

I-4-3 L'eau

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques.

L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité

I-4-4 Les adjuvants [06]

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés à très faible dose (< 5 % de la masse de ciment), pendant le malaxage ou avant la mise en œuvre du béton afin d'améliorer certaines de ses propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans le béton.

Selon l'effet recherché ; on peut distinguer, trois grandes familles d'adjuvant :

– Action sur la plasticité et la compacité :

- Les plastifiants réducteurs d'eau
- Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau

— Action sur les délais de prise et de durcissement :

- Les accélérateurs de prise
- Les accélérateurs de durcissement
- Les retardateurs

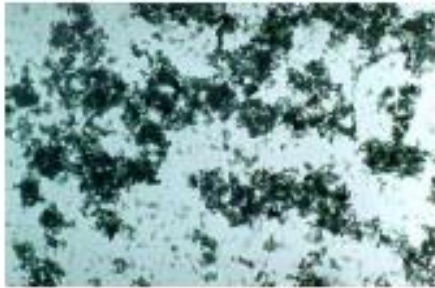
— Action sur la résistance aux agents extérieurs :

- Les entraîneurs d'air
- Les hydrofuges de masse (utilisés pour rendre les bétons et mortiers étanches)

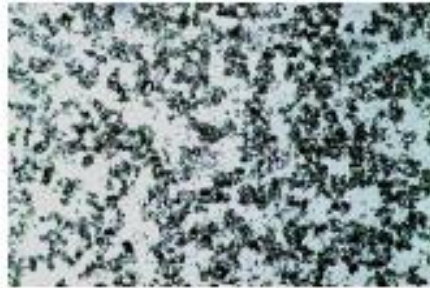
a. Adjuvant fonction « Réducteur d'eau »

- Réduire la teneur en eau du béton sans modifier la consistance
- Augmenter l'affaissement (Effondrement)/l'étalement sans modifier la teneur en eau
- Produire les deux effets à la fois

- L'effet est plus au moins fort selon le niveau de réduction d'eau recherchée
 - Plastifiant réducteur d'eau 5 % à 10 %
 - Superplastifiant, Haut réducteur d'eau :10 à 30 %



Suspension d'eau et de grains de ciment



Même suspension après ajout de 1% d'adjuvant

Figure I-20 : Suspension d'eau et de grains de ciment sans et avec ajout d'adjuvant.

b. Adjuvant fonction « Accélérateurs de prise »

- L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de la prise du ciment dans le béton ou le mortier
- Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les travaux sous l'eau...
- Effet sur le béton :
 - Accélération de la prise
 - Augmentation des résistances à court terme
 - Augmentation de la chaleur d'hydratation

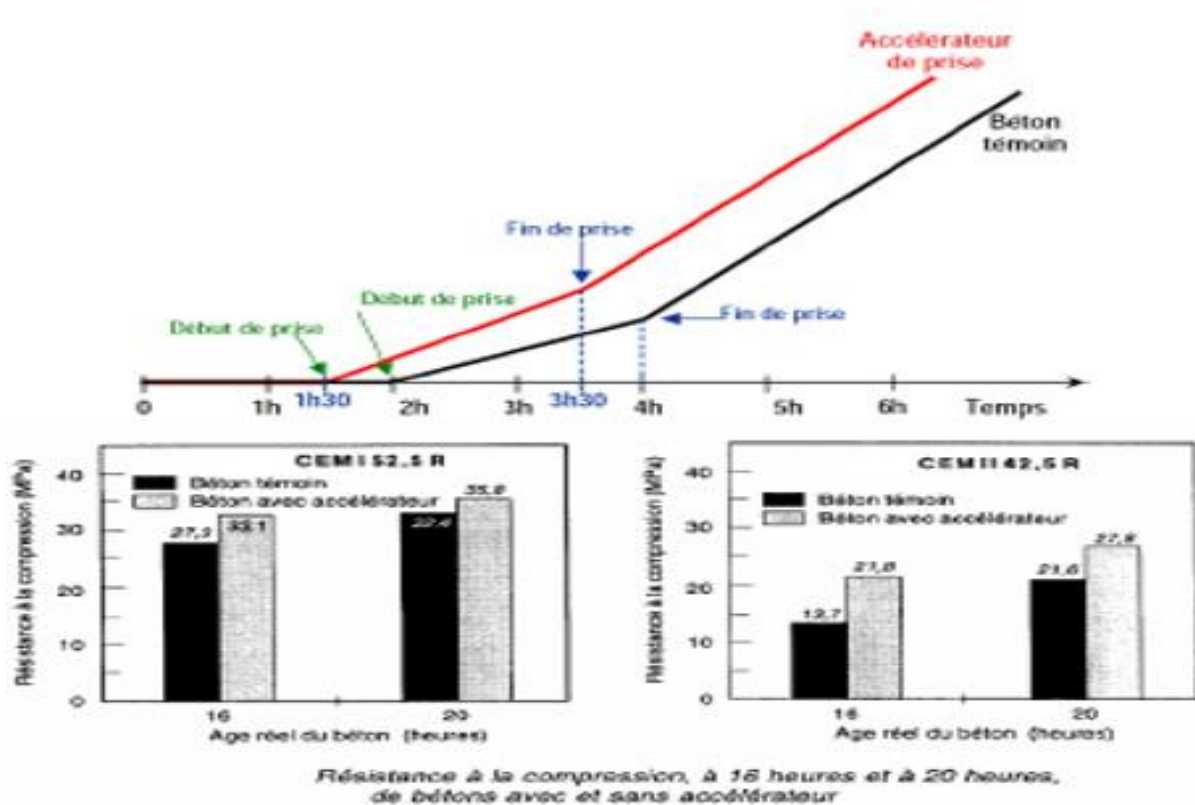


Figure I-21 : Résistance à la compression avec et sans accélérateur

c. Adjuvant fonction « Retardateur de prise »

- Introduction dans l'eau de gâchage, ils ont pour fonction principale d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise du ciment dans le béton ou le mortier
- Ils sont recommandés pour les bétonnages par temps chaud, pour le béton prêt à l'emploi, les bétonnages en grande masse
- Effet sur le béton :
 - « Régule » la chaleur d'hydratation
 - Décale le temps de prise
 - Diminue les résistances initiales
 - Améliore les longues ouvrabilités

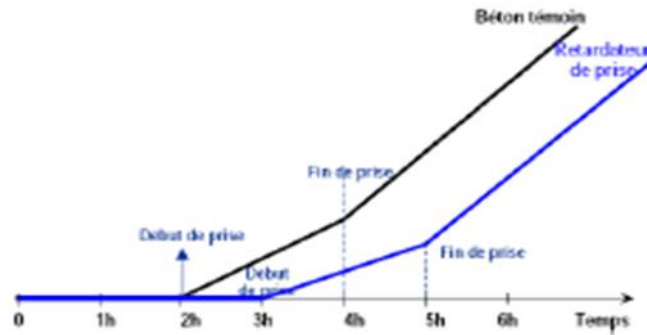


Figure I-22 : Résistance à la compression avec et sans retardateur.

d. Adjuvants fonction « Entraîneurs d'air »

Ils ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton et le mortier, de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse

- Effet sur le béton frais :
 - Les bulles stabilisent les grains (correcteur granulaire)
 - Amélioration de la cohésion
 - Amélioration de l'ouvrabilité (effet de réduction d'eau)
 - Amélioration de l'aspect de décoffrage

e. Adjuvant : fonction « Hydrofuge de masse »

- Bloque la pénétration des liquides dans le béton

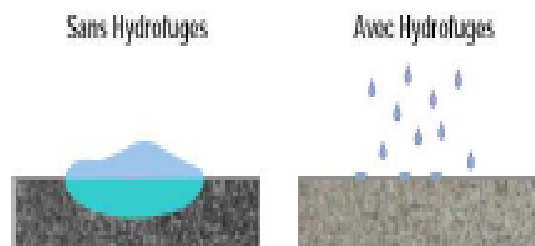


Figure I-23 : l'effet de l'hydrofuge de masse

- Domaine d'application :
 - Béton de réservoir
 - Béton en contact avec les eaux
 - Béton préfabriqué : pavés ; éléments décoratifs

Tableau. I.8: Les différents types d'adjuvant et leurs fonctions.

Adjuvant	Plastifiants	Réducteurs d'eau-plastifiants	Superplastifiants
Rôle	Ils déflocculent les grains de ciment et diminuent le frottement interne. La pâte est lubrifiée, la plasticité s'améliore, la mise en œuvre est facilitée	Ils permettent de réduire la teneur en eau et d'obtenir en conséquence une meilleure résistance mécanique	Réduction d'eau Augmente l'ouvrabilité des ouvrages
Dosage	< 0.5%	< 0.5%	0.5 % à 3 %
Introduction	Dans l'eau de gâchage	Dans l'eau de gâchage	Dans le béton avant de sa mise en œuvre
Effets sur la mise en œuvre du béton	A rapport eau/ciment constant, amélioration de la maniabilité	A maniabilité constante, réduction d'eau > 6.5 %	A rapport eau/ciment constant, grande fluidification du béton
Effets secondaires favorables	Possibilité d'accélération du durcissement	Augmentation de compacité, diminution de la perméabilité	On réalise des bétons à hautes performances en utilisant de faibles rapport eau/ciment
Autres effets	Possibilité d'une légère augmentation du retrait		

I-5 Les techniques particulières de mise en œuvre

D'après les auteurs [09], les mortiers peuvent être mis en place par deux méthodes :

❖ La projection

Fabriqués sur chantier ou plus généralement pré-dosés, les mortiers projetés comportent, outre le liant et le sable habituels, des adjuvants spécifiques améliorant l'adhérence, des charges (silice, carbonate,) et parfois des fibres (verres, polypropylènes, acier). Projeté à l'aide de machines, le plus souvent à air comprimé, le mortier est plus compact, adhère mieux au support et se prête bien lors de son application sur des parties d'ouvrages difficiles d'accès et de forme irrégulière. La suppression de la manipulation délicate et pénible, ainsi que les gains de productivité, expliquent le succès du mortier projeté dans de nombreuses applications (enduits monocouches, enduits isolants, revêtement de voûtes, en galeries, consolidation de talus, travaux de réparation, etc.).

❖ L'injection

L'injection de mortier n'intéresse que certains types de travaux où les cavités à remplir sont suffisamment larges. Il est nécessaire que le diamètre maximum des grains de sable les plus gros ne dépasse pas le 1/5 des vides les plus fins à remplir. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait utiliser des coulis d'injection. Comme dans le cas de coulis de ciment, le mortier d'injection doit être constitué de façon à être le plus injectable possible : grande fluidité pour un ressuage modéré (et, partant, une bonne stabilité, peu de ségrégation). Les applications de l'injection sont essentiellement le remplissage des cavités, gaines, enveloppes diverses, ou plus généralement les vides d'accès difficile. L'injection est généralement pratiquée pour certains travaux sous l'eau, avec des formules de mortiers étudiés pour éviter le délavage.

Chapitre II:

LES GENERALITES SUR LES SABLES

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons donner une présentation générale sur les propriétés des différents types de sables utilisés dans le domaine de génie civil. Notamment leurs mécanismes de formation, classifications et les critères de sélection pour leurs emplois en construction. Nous allons également donner un aperçu sur les mortiers. Nous nous sommes surtout basés sur leurs applications dans la construction, leurs différents types et leurs principales caractéristiques.

A la fin de ce chapitre nous allons donner une synthèse sur les travaux de recherche qui ont été fait sur la valorisation de sable de dune pour la confection des mélanges cimentaires appliqués dans le domaine de la construction en génie civil.

II.2 Granulats

II.2.1. Définition

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme [10]. Un granulats est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, issus des matériaux pierreux, ils sont de petites dimensions et produits par l'érosion ou broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier.

Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts à utiliser des granulats dans le béton :

Le 1er économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition) ;

Le 2eme technique : Limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigides que la pâte de ciment) [11].

II.2.2. Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle :

- **Naturels :** lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- **Artificiels :** lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais.

A. Granulats naturels courants

Ils n'ont subi que des opérations de transformation de type mécanique : concassage, criblage, lavage...

On les distingue selon leur origine :

A.1. Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

A.2. Origine « d'extraction »

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories :

Les granulats alluvionnaires, dits roulés : dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silicocalcaires [11].

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de rivière (d'oued).
- Les granulats de mer.
- Les granulats de dunes.



Figure II.1 : Exemple des granulats alluvionnaires naturels [11].

A.1. 3Les granulats concassés (de carrière) : sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donnent des formes angulaires Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent

d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage [12].



Figure II .2 : Exemple des granulats de carrière

Ce type de granulats présente une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [13].

B. Les granulats artificiels

On distingue :

B.1. Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau. La masse volumique apparente est supérieure à 1250 kg/m^3 pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m^3 pour le granulé [14].

B.2. Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels, ou granulats réfractaires [14].

B.3. Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats, très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les Etats- Unis, n'ont pas eu en Europe le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance,

d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³[14].

B.4. Les granulats très légers

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 kg/m³), ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants [15].

II.2.3. Les sables

On entend par sable la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,080 mm et 5 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% [16].

2.3.1 Classification des sables

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

2. 3.1.1 Granulométrie

Elle permet de séparer les sables en trois catégories :

- **Sables fins** : plus de 75% des éléments supérieurs à 80µm, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.
- **Sables moyens** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,2 et 2mm.
- **Sables grossiers** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80µm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves [17].

2.3.1.2 Propreté

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante par l'essai d'équivalent de sable. Afin de donner des limites pour chaque type de sable.

2.3.1.3. Nature minéralogique

En général, les sables peuvent être classés comme suit [18] :

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

2.3.2. Les types des sables selon leurs provenances

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

- **Sable de rivière** : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- **Sable de mer** : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- **Sable de carrière** : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.
- **Sable artificiel** : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.
- **Sable de dune** : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne.

Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara [19].

II .3. Les sables de dunes

3.1. Définition

Le sable des dunes est le résultant d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluviatile et parfois éolienne. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Il est caractérisé par une granulométrie fin et très serrée [20].

Le sable de dune s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente. Il constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir [21].

3.2. Nature de sable de dune

3.2.1. 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 opposé [21].

3.2.2. Types des dunes

3.2.2.a. Les avant-dunes (fore dune en Anglais), qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemples), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est à dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire. À ne pas confondre avec une ancienne arrière dune en cours d'érosion, ou avec une dune formée par du sable venant de terre sur un secteur ou 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 psammophiles [21].

3.2.2.b. Les falaises dunaires (dune Cliff en Anglais) ne sont pas une vraie dune mais 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 [21].

3.2.2.c. Les dunes perchées (Cliff-top dune en Anglais), qui apparaissent au sommet d'une falaise vive ; alimentée 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 [21].

3.2.2. d. Les cordons dunaires artificiels

Qui sont construits de main d'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 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) [21].

3.3. 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 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 [21]



Figure. II.3. La barkhane

Une barkhane est une dune 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.

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 [21].

Les dunes les plus simples ont une forme de croissant et portent le nom arabe de barkhane (voir figure. II.3). 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 (voir figure. II.4) [21].

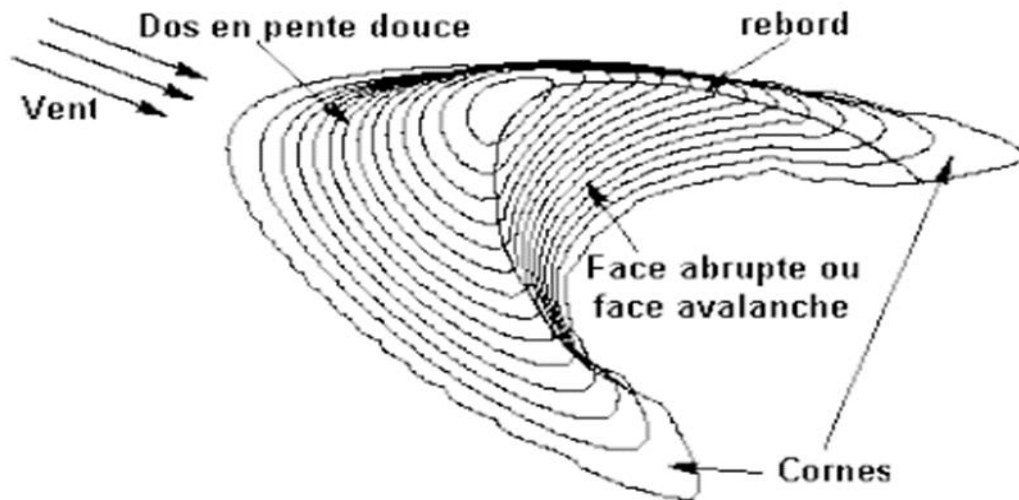


Figure II.4: Morphologie de la barkhane [21]

3 .4. 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.[22]

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

L'Algérie est un gros consommateur de granulat. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, est notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différents natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturelles et artificielles. La réflexion sur l'élaboration de nouveaux bétons tels que les bétons de sable ou de mortier est donc devenue nécessaire.

Ce type de sable pourrait bien constituer le squelette d'un béton pour peu que sa formulation soit judicieusement étudiée. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers [23].

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple, en génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental [23].

3.5.1. Intérêt de sable de dune

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

3.5.2. Les aspects économiques

Les aspects ont 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 quasi-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 [23].

3.5.3. 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 [23].

11.4. Caractéristiques principales des sables

Les granulats utilisés dans la construction doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication. Le prélèvement d'un échantillon pour les caractérisations des granulats doit se faire conformément aux normes [24] et [25] relatives au prélèvement par "échantillonneur" ou par "quartage".

A. Caractéristiques géométriques

A.1. Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres (mm) [05].

Le terme granulat d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments. La norme expérimentale [10] précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles.

La norme [10] distingue quatre familles de granulats : les fillers, les sablons, les sables et les gravillons, et également quatre catégories pour les granulats naturels A, B, C et D [05].

- ✓ Filler 0/D pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- ✓ Sablon 0/D pour $D < 1$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- ✓ Sable 0/D lorsque D est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6,33 \text{ mm}$;
- ✓ Graves 0/D lorsque $D > 6,3 \text{ mm}$;
- ✓ Gravillons d/D lorsque $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$;
- ✓ Ballast d/D lorsque $d \geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$

CHAPITRE II : LES GENERALITES SUR LES SABLES

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en (mm) : [05]

0.063 ; 0.08 ; 0.100 ; 0.125 ; 0.160 ; 0.200 ; 0.250 ; 0.315 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.63 ; 0.80 ; 1.00 ; 1.25 ; 1.60 ; 2.00 ; 2.50 ; 3.15 ; 4.00 ; 5.00 ; 6.30 ; 8.00 ; 10.00 ; 12.50 ; 16.00 ; 20.00 ; 25.00 ; 31.50 ; 40.00 ; 50.00 ; 63.00 ; 80.00 ; 100.00 ; 125.00.

A.2. Granulométrie :

L'analyse granulométrique est régie par les normes [10]et[26]. Les granulats sont désignés par d et D , ou d et D représentent la plus petite et la plus grande des dimensions demandées [27]. L'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en différentes coupures au moyen de tamis [28]. Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique) [27]. Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un mortier maniable [26].



Figure II.5 : Tamiseuse électrique.

- ✓ Le tamisage est l'opération qui consiste à séparer un matériau en différentes fractions au moyen d'une série de tamis de caractéristique connues.
- ✓ En appelle tamisât la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et refus la partie qui est restée sur le tamis [26].



Figure II.6: L'analyse granulométrique par tamisage.

- ✓ La courbe granulométrique donne les pourcentages cumulés en masse, de grains passant dans les tamis successifs.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comptant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont une progression géométrique de raison [05].

La figure suivante montre des exemples de fuseaux granulaires à l'intérieur desquels doivent se trouver les fuseaux de fabrication de granulats.

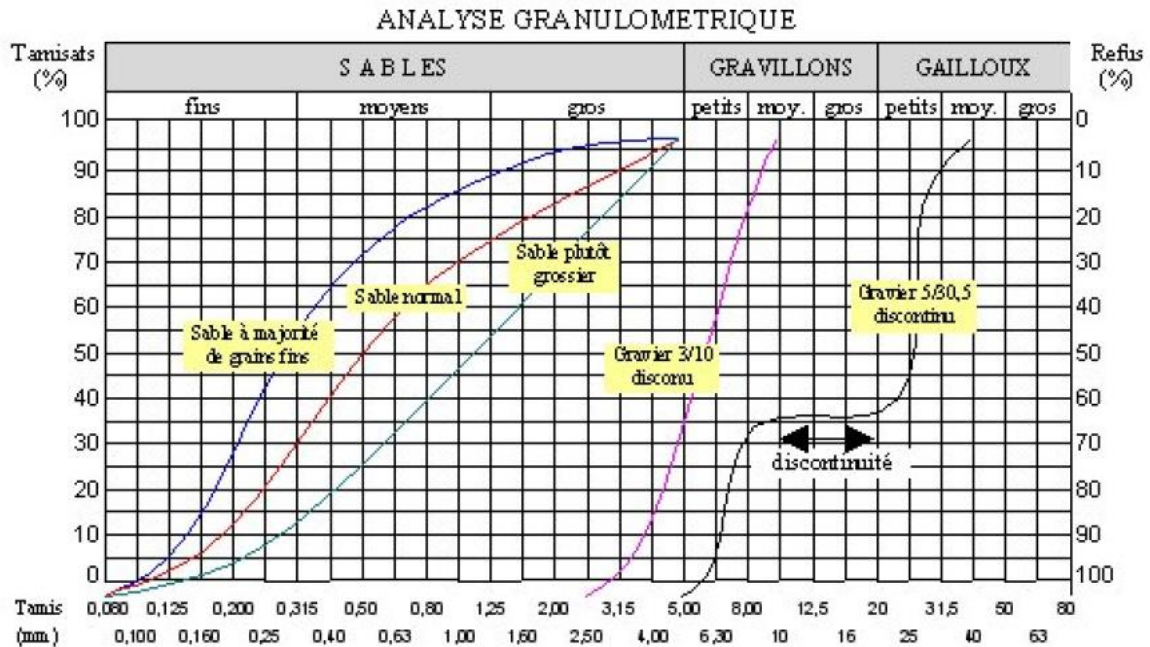


Figure II.7 : Exemple de courbe granulaire des granulats pour mortier [05].

A.3. Module de finesse d'un sable (Mf) :

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 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis [10]. Le Tableau II.1 présente la série des tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme prise en compte [05] et [27].

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

$$MF = \frac{\sum \text{Refus cumulés en \% des tamis}}{100}$$

Tableau II.1 : Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.

01 Tamis	0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm
02 Tamis	0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 et 4 mm

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles.

- La partie centrale A ($2.2 < MF < 2.8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limité.
- La partie centrale B ($1.8 < MF < 2.2$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- La partie centrale C ($2.8 < MF < 3.2$) correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 ; au-dessus, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessous, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité [05]

B. Caractéristiques physiques

B.1. La Masse Volumique Apparente

Cet essai est régi par la norme NFP 18-554, elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient [DUPAIN. R et al.]

On détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{\text{Masse des granulats secs}}{\text{Volume du récipient}} = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

Avec :

ρ : Masse volumique absolue

M: Masse des grains solides

V_1 : Volume de l'eau ;

V_2 : Volume total (grains solide + eau).

L'essai de La Masse Volumique Apparente doit être réalisé selon la norme [30].

a. Principe de la méthode :

- ✓ Déterminer le volume du récipient =V
- ✓ Noter la masse du récipient propre et vide =M0
- ✓ Placer le récipient dans le bac en plastique
- ✓ Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel à 10 cm environ au-dessus de niveau de récipient
- ✓ On laisse tomber ce sable, ni trop vite, ni trop lentement. Verser ainsi le corps, ce matériau doit s'effectuer au centre de ce récipient, jusqu'il déborde tout autour en formant un cône.
- ✓ Araser à l'aide de la règle métallique, à laquelle on imprime un mouvement horizontal de va et vient, le récipient étant attaqué le long d'une diagonale horizontale
- ✓ Noter la masse du récipient rempli= M1
- ✓ Vider le granulat dans un bac en plastique et jeter son contenu dans la benne extérieure

Renouveler l'opération 2 fois

B.2 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 les grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. L'essai de La Masse Volumique absolue doit être réalisé selon la norme [31].

Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/m^3 , ou en g/cm^3 .

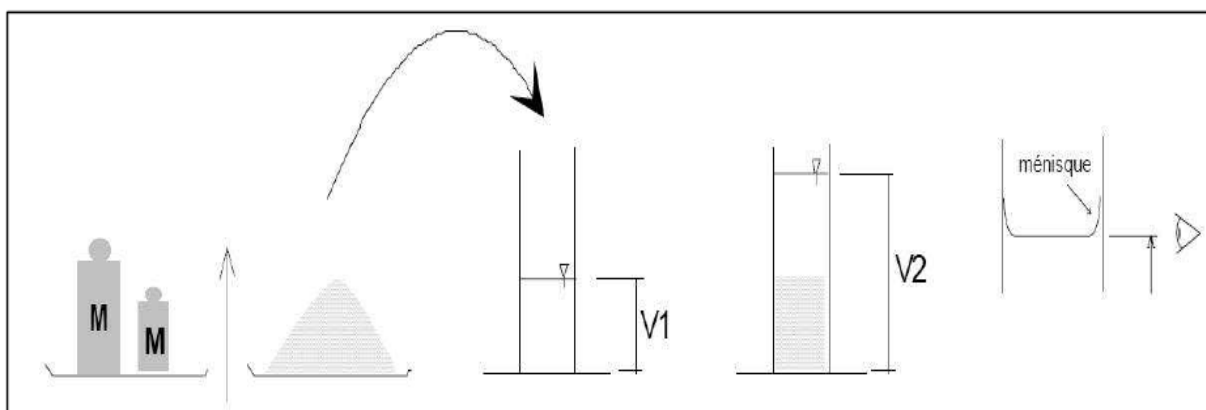
a-But de l'essai :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une compression de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaire malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

b-Conduite de l'essai :

- ✓ Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- ✓ Peser un échantillon sec M_s sable (environ 300g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- ✓ Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .

(Voir la figure suivante)



FigureII.8 : Principe de détermination de la masse volumique absolue

La masse volumique absolue est alors :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Avec :

ρ : Masse volumique absolue

M:Masse des grains solides

V1 : Volume de l'eau ;

V2 : Volume total (grains solide + eau).

B.3. Equivalent de sable :

Cet essai permet de mesurer la propreté du sable, il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. Il est défini par la norme [32].

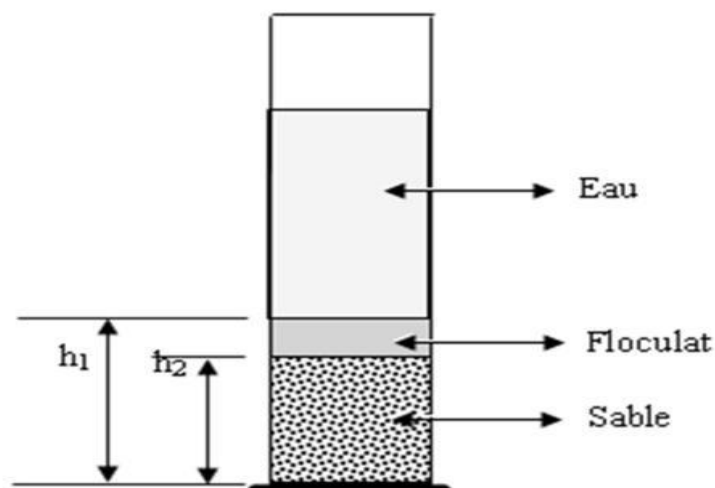


Figure II.9: Essai d'équivalent de sable

a-But de l'essai :

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol

des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de détermination un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

b-Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fins. On agite une quantité de sable dans une solution lavante (eau) dans un récipient tubulaire gradué, selon un processus normalisé, puis on laisse reposer le tout. Au bout de 20minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h1 : sable propre +élément fins,
- Hauteur h2 : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable qui, par convention :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100.$$

Avec :

ES : équivalent de sable ;

h1 : hauteur du sable propre et élément fins ;

h2 : hauteur du sable propre seulement.

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) et ES (équivalent de sable au piston)

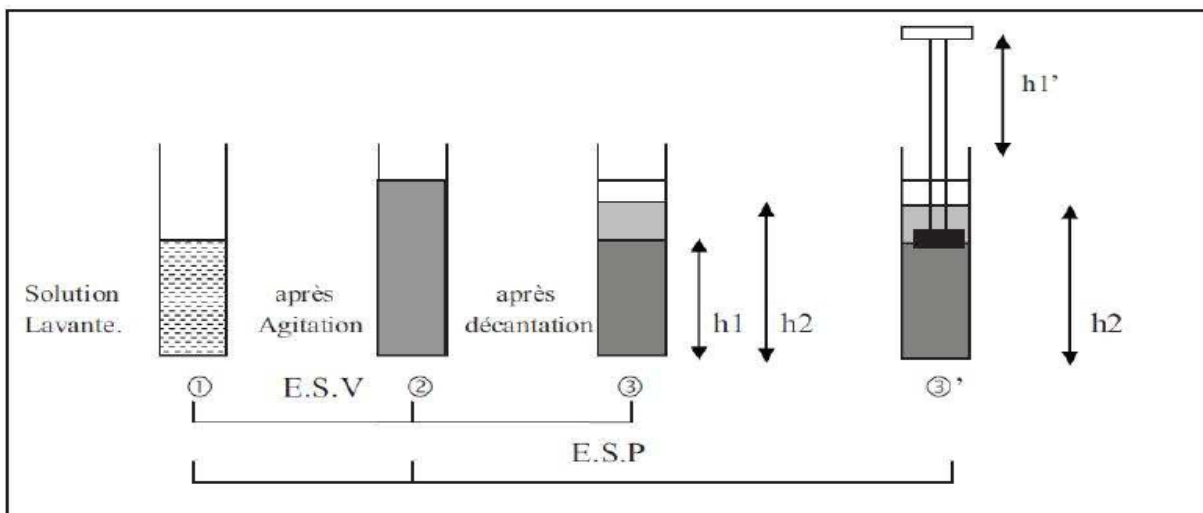


Figure II.10: Principe de détermination d'équivalent de sable

CHAPITRE II : LES GENERALITES SUR LES SABLES

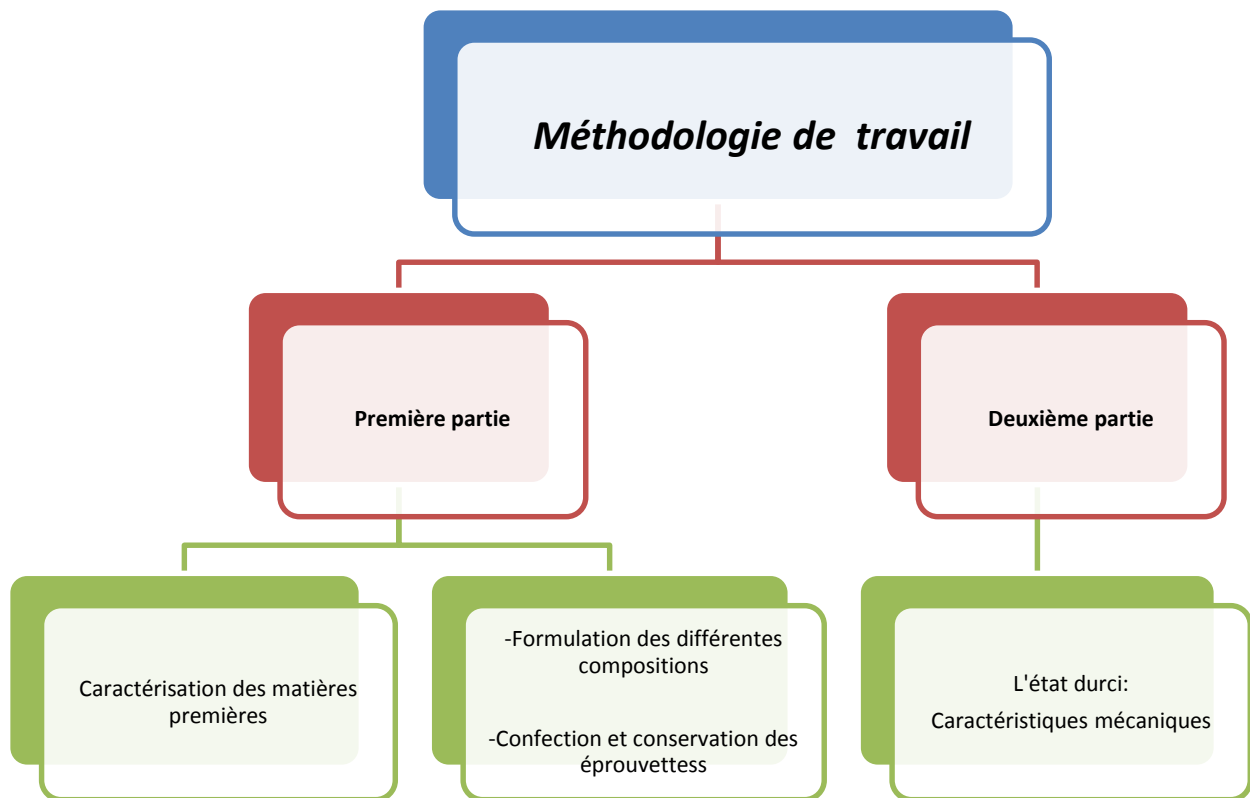
A partir de l'essai équivalent sable ES, il est possible selon le résultat obtenu, de catégoriser le sable selon état de propreté (sa qualité) et donc d'en définir les possibles applications telles que montrées dans le tableau II.2

Tableau II.2. Nature et qualité du sable selon les valeurs d'équivalent de sable [33]

E.S à vue	E.S	Nature et qualité du sable
$E.S.V < 65$	$E.S < 60$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement, problème d'adhérence, à rejeter pour les bétons de qualité.
$65 \leq E.S.V < 75$	$60 \leq E.S < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand on ne craint particulièrement pas le retrait.
$75 \leq E.S.V < 85$	$70 \leq E.S < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de haute qualité (valeur optimale $E.S = 75$, $E.S.V = 80$).
$E.S.V \geq 85$	$E.S \geq 80$	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Chapitre III:

Techniques Expérimentales



Plan de travail

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques des matériaux utilisés au cours du travail pratique effectué au niveau de laboratoire, de Génie Civil [UMMTO] pour la confection d'un mortier normalisé. Il sera aussi présenté, le travail de sélection des constituants ainsi que leur utilisation, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats en matière de résistance. Il sera étudié par ailleurs, l'effet du mélange et de variation des diamètres de sable sur les caractéristiques du mortier.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le comportement mécanique des diverses formulations.

- Évaluer le comportement mécanique (Résistance) des différentes formulations.
- Évaluer l'influence de la variation de l'un des paramètres constitutifs du mortier (Variation de la nature et de diamètre de sable) sur le comportement et la performance des éprouvettes.
- Faire une étude comparative du comportement mécanique de compression des différentes formulations.

Dans ce chapitre deux parties successives seront présentées :

Première Partie : Elaboration des corps d'épreuve

Le ciment (C E M II /B –LL 42 ,5N).

Le sable :

- Le sable de Rivière (0/4).
- Le sable de Dune de Touggourt (0/2).

L'eau de gâchage.

A partir de ces constituants, seront formulés 6 compositions du mortier

Deuxième Partie

Dans cette partie, seront aussi définies, les caractéristiques mécaniques à l'état durci du mortier

Partie I : Elaboration des corps d'épreuve

Dans cette partie, nous allons procéder à l'élaboration de notre mortier en caractérisant chaque matériau utilisé dans les différentes compositions.

III.2. Matériaux utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux, ciment, sable, plastifiant et eau.

III 2.1. Le ciment (C E M II /B –L 42 ,5N)

Le ciment utilisé dans le cadre de ce travail est désigné sous le nom de MATINE. Ce dernier est un ciment portland composé, de classe 42.5 et de sous classe B provenant de la cimenterie LAFRAGE d'Alger. Il contient donc environ un tiers d'additions minérales autres que le clinker. (Fig.III.1). Ce ciment a été entreposé au laboratoire à température ambiante et recouverts d'un sac en plastique pour éviter toute pré-hydratation éventuelle.



Figure.III.1 : Ciment utilisé dans la confection du mortier normalisé

III.2.1.1. Composition chimique et minéralogique du Ciment [34]

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3).

La composition chimique et minéralogique caractéristique d'un CEM II/B-L42,5N est résumée à titre illustratif dans le Tableau.III.1 suivant :

Tableau.III.1 : Composition chimique et minéralogique de Mâtine
(Voir la Fiche technique de MATINE en ANNEXE 1) [35]

Analyse chimique						
Désignation	Perte au feu %	Résidus insolubles %	Teneur en sulfates SO ₃ %	Teneur en oxyde de magnésium MgO %	Teneur en chlorures %	Teneur équivalent en alcalis %
%	7.50 – 12	0.7 – 2	2 – 2.7	1 – 2.2	0.01 – 0.05	0.3 – 0.75
Désignation	Composition hypothétique du clinker					
%	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	C ₄ AF %		
	58 – 64	12 – 18	6 – 8	10 – 12		

III.2.2 Le Sable

Conformément aux normes NF EN 12620 [AFNOR NF EN 12620, 2003] et NF XP P18-545 [AFNOR XP P18-545, 2004], le sable est défini comme étant un granulat naturel 0/D avec D (diamètre du plus gros granulat) limité à 4 mm. Il peut s'agir soit d'un sable nature alluvionnaire (ou de ballastière), soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. Il est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, le dégagement de chaleur et le prix de revient (coût) des bétons. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments chimiques nocifs.

Nous avons utilisé dans cette étude deux types de sable de différents diamètres. Un sable local de Rivière (SR) provenant de OUED-AISSI, roulé de classe 0/3, et un sable fin siliceux de Dune (SD) de la région de Touggourt de classe 0/2. Avant utilisation, ces sables ont été lavés afin de réduire les impuretés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24 heures puis tamisé avec des tamis de différents diamètres.



Figure III.2 : Lavage et séchage des granulats utilisés dans les différentes formulations du mortier.

Une série d'analyses a été menée afin de déterminer les propriétés physiques et granulométriques des sables.

III.2.2.1. Masse volumique absolue : selon la Norme [NFP 18-301]

Cet essai est défini comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.



Figure III.3 : Essai de la détermination de la masse volumique absolue du sable.

La masse volumique absolue se détermine par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Avec :

ρ : Masse volumique absolue

M: Masse des grains solides

V_1 : Volume de l'eau ;

V_2 : Volume total (grains solide + eau).

Nota : Plus de détails sur les essais de caractérisation (Mode Opérateur- Principe.....) Voir chapitre II (B.2 Masse volumique absolue P 53)

III.2.2.2. Masse volumique apparente : Selon la Norme [NFP 18-554]

La masse volumique apparente est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient



Figure III-4 : Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable

On détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{\text{Masse des granulats secs}}{\text{Volume du récipient}} = \frac{M1 - M0}{V}$$

Avec :

V : Volume du récipient

M0 : Masse du récipient propre et vide

M1 : Masse du récipient rempli

Nota : Plus de détails sur les essais de caractérisation (Mode Opérateur- Principe.....) Voir chapitre II (B.1 Masse volumique apparente P 52)

III.2.2.3. Equivalent de sable : Selon la Norme [NFP 18-598]

Cet essai permet de mesurer la propreté du sable. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport multiple par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée sur la hauteur totale du flocculat.



Figures III.5: Principe de l'essai d'équivalent de sable

La formule qui permet la détermination de l'équivalent de sable est :

$$ES = \frac{h1}{h2} 100\%$$

Avec :

Hauteur h1 : sable propre + éléments fins,

Hauteur h2 : sable propre seulement.

Nota : Plus de détails sur les essais de caractérisation (Mode Opérateur- Principe.....) Voir chapitre II (B.3 Equivalent de sable P 54)

Les caractéristiques physiques des sables à l'issue des tests sont représentées dans les tableaux suivants :

Sable de rivière (0/3) :

Tableau III.2 : Caractéristiques physiques de sable de rivière (0/3)

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse Volumique apparente	1.61	[gr/cm3]
Masse Volumique absolue	2.55	[gr/cm3]
Equivalent de Sable(NF EN 933-8)	72.41	[%]

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Sable de Touggourt (0/2) :

Tableau III.3 : Caractéristiques physiques du sable de dune (0/2)

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse Volumique apparente	1.56	[gr/cm ³]
Masse Volumique absolue	2.50	[gr/cm ³]
Equivalent de Sable(NF EN 933-8)	91.22	[%]

Interprétation :

La masse volumique absolue théorique varie dans l'intervalle de [2.5 -2.65] (gr /cm³)
 Notre cas, pour les deux sables (2.50 gr/cm³- 2 .65 gr/ cm³) fait partis de l'intervalle théorique des masses volumiques absolue des sables.

Tableau III.4 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable [36]

E.S à vue	E.S	Nature et qualité du sable
E.S.V < 65	E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement, problème d'adhérence, à rejeter pour les bétons de qualité.
65 ≤ E.S.V < 75	60 ≤ E.S < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand on ne craint particulièrement pas le retrait.
75 ≤ E.S.V < 85	70 ≤ E.S < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant Parfaitement pour des bétons de haute qualité (valeur optimale E.S = 75, E.S.V = 80).
E.S.V ≥ 85	E.S ≥ 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Nous pouvons classier :

Sable de rivière : dont $70 \leq ES < 80$ \longrightarrow **En Sable Propre** à faible Pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons et les mortiers

Sable de dune : dont $ES > 80$ \longrightarrow de **Sable très Propre** avec une absence presque totale de fines argileuses risquant d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau ou en utilisant un super plastifiant en importante quantité.

Remarques

Dans cette étude nous avons utilisé des sables lavés pour réduire les impuretés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24heurs.

Après l'essai de l'équivalent de sable, nous avons constaté qu'il s'agissait bien des sables propres donc ils conviennent très bien pour la composition de nos mortiers.

Masse volumique absolue des diamètres utilisés : (Voir le tableau ci-dessous)

Tableau III.5: Masse volumique des diamètres utilisés

Diamètres [mm]	Masse Volumique absolue [gr/cm3]
Sable de rivière 0.315-0.5	2.37
Sable de rivière 1-1.25	2.35
Sable de rivière 3.15-4	2.85
Sable de dune 0.2-0.315	2.66
Sable de dune 0.315-0.5	2.44
Sable de dune 0.5-0.63	2.35

III.2.2.4. Analyse granulométrique par tamisage NF EN933-1

La granulométrie s'exprime par un graphique dans lequel la courbe granulométrique indique les pourcentages en masse passant par les tamis successifs dont les mailles sont de plus en plus petites (voir la figure III.7).



Figure III.6: Tamiseuse électrique.

L'analyse granulométrique du sable de dune (Touggourt 0/2) est présentée dans la figure suivante :

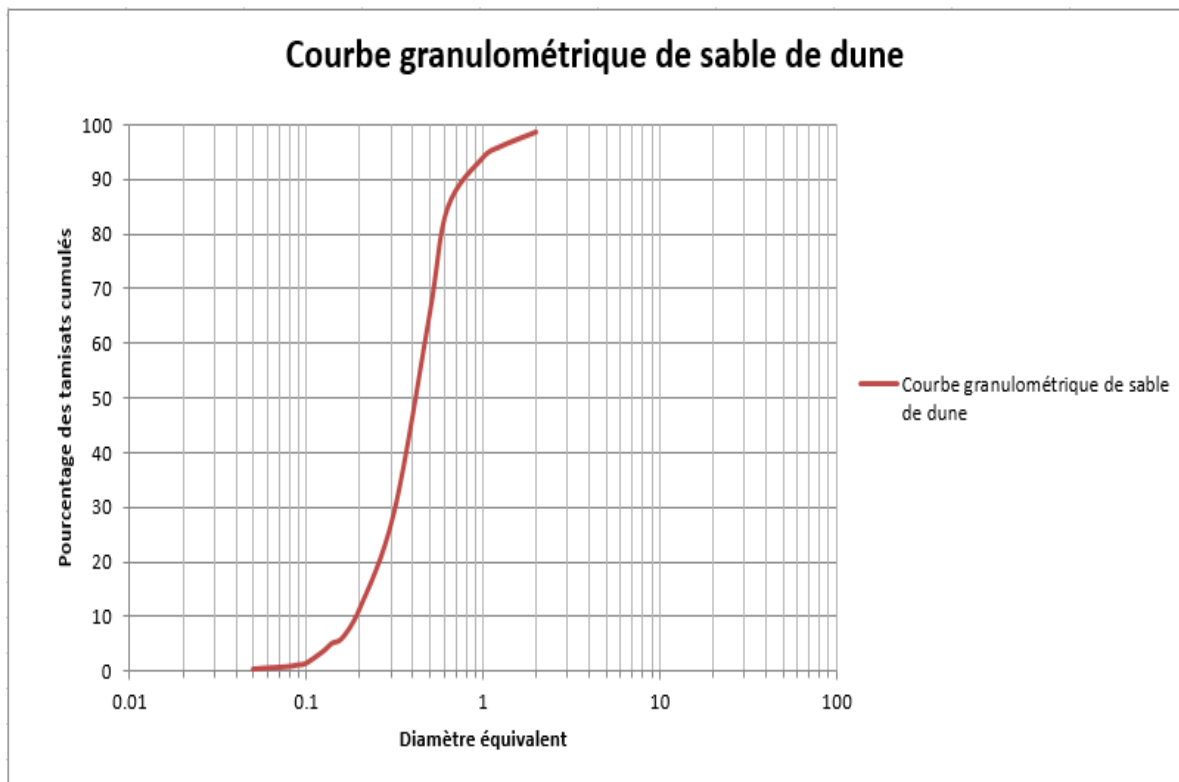


Figure III.7: Courbe d'analyse granulométrique par tamisage d'un sable de dune (0 /2)

Le module de finesse est calculé par la relation suivante :

$$MF = \frac{\sum \text{Resfus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 4}{100}$$

$$MF = \frac{91,7+69,6+15,3+4+0+0}{100} = 1,80$$

Mf =1.80

L'analyse granulométrique du sable de Rivière (Oued-Aissi 0/3) est présentée dans la figure suivante :

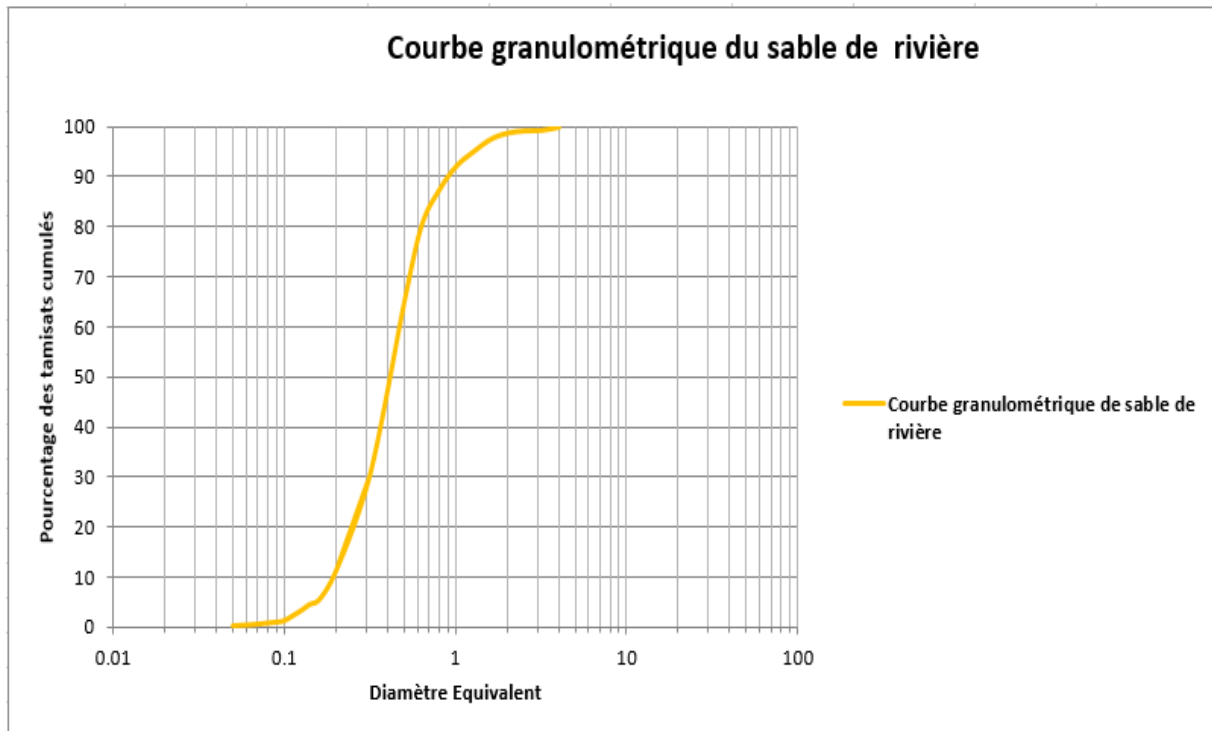


Figure III .8 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage d'un sable de rivière (0 / 4)

Module de finesse étant calculé comme précédemment mentionné la relation :

$$MF = \frac{\sum \text{Resfus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 4}{100}$$

$$MF = \frac{94,42+69,631+19,82+5,17+0,87+0,12}{100} = 1,9$$

Mf= 1.90

III.2. 3 L'eau de gâchage :

Lors du gâchage de nos mortiers, nous avons utilisé l'eau de robinet, qui est une eau potable du réseau de la ville de Tizi-Ouzou. Aucune analyse chimique n'a été réalisée sur cette eau.

III.3 Formulation et conservation des éprouvettes :

III.3.1 Formulation :

La formulation des mortiers normalisés pour 3 éprouvettes confectionnés est représenté dans les tableaux suivants :

Tableau III.6: Formulation d'un mortier normalisé

Composant	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable (g)
M₀	450	225	1350

Les tableaux suivants montrent les quantités correspondant aux constituants entrant dans la confection du mortier normalisé de toutes les variantes pour un moule de (40×40×160) ×3

Tableau III.7: Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques

	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable (g)
Sable de dune 0.2-0.315	412.78	206.39	1238.34
Sable de dune 0.315-0.5	450	225	1350
Sable de dune 0.5-0.63	467.23	233.61	1401.7
Sable de rivière 0.315-0.5	463.29	231.64	1389.87
Sable de rivière 1-1.25	467.23	233.61	2523.06
Sable de rivière 3.15-4	385.26	192.63	1155.78

III.3.2. Le malaxage :

L'évolution du matériau avec le malaxage est très importante, le malaxage consiste en un mélange des différents constituants des bétons dans le but d'obtenir un matériau homogène.

Le mode de malaxage :

Le malaxage joue un rôle précieux dans la fabrication des mortiers, d'où la nécessité de maîtriser et respecter son mode et son temps, comme le montre le tableau suivant :

Tableau III.8 : Formulation et séquence de malaxage

Matériaux	Séquence de malaxage
Ciment + l'eau	Mélange de matériaux 30s (Vitesse Lente)
Sable(SR-SD)	Ajout du sable pendant 30 s (Vitesse lente) et 30s (Vitesse rapide) Arrêter le malaxeur pendant 30s Reprendre le malaxage pendant 1 min (Vitesse rapide)
E/ C= 0.5	

Le malaxage de nos mortiers a été réalisé avec un malaxeur de laboratoire pour mortier à axe vertical, constitué d'une cuve et d'une palette centrale tournante à deux vitesses lente et rapide, de capacité de 5 litres.



Figure III.9 : Malaxeur électrique utilisée dans la fabrication du mortier [Labo Béton – UMMTO]

III.3.3 Procédure expérimentale :

III 3.3.1. Préparations des éprouvettes et déroulement des essais :

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions (4×4×16) cm³, à raison de trois éprouvettes par essai dont des essais sans entailles et d'autres avec entailles de dimensions (0.5x1x4) placés au milieu de l'éprouvette soit à 8 cm.

Dans tous les essais le rapport E/C a été fixé sur [0.5] pour tous les mortiers normalisés. La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF P 18-400. Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur dont la durée de malaxage totale est de 3 minutes.

La vibration a été réalisée sur une table vibrante à durée de vibration réglable. La durée de vibration est de 2 fois 5s, $(5 \times 2) = 10$ secondes.

Les moules ont été couverts de film plastique et stockés dans le laboratoire dans les premières 24h.

Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans l'eau à une température ambiante jusqu'à l'âge de l'essai (60j). A 60 J, les tests de résistances mécaniques des mortiers ont été effectués selon la norme NF 15 403 et NF EN196-1.

Dans notre étude, les éprouvettes prismatiques ont été confectionnées avec des mortiers normalisés, six types de formulation sont été utilisées (Avec Sable de Dune [SD] 0.2-0.315/0.315-0.5/0.5-0.63) et (Avec Sable de Rivière [SR] 0.315-0.5/1-1.25/3.15-4).

III.3.3.2 Confection des éprouvettes :

La confection des éprouvettes est faite conformément à la norme [NF P 18- 404_Décembre 1981]. Les opérations sont effectuées dans l'ordre suivant :

III.3.3.2.1. Malaxage du mortier : (Suivant le mode de malaxage choisi-Voir le tableau III.8)

Le malaxage des mortiers normalisés a été réalisé comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur, pour limiter l'absorption de l'eau de gâchage.
- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s. (Voir la Figure.III.10).



Figure III.10: Les étapes de malaxage du Mortier normalisé

III.3.3.2.2. Remplissage et conservation des moules :

Le remplissage et conservation des moules s'est effectué comme suit :

- Après gâchage, on procède au remplissage à raison de deux couches, dans des moules métalliques qui ont été enduits d'huile à l'avance.
- On procède au vibrage à la table vibrante pour les deux couches ; la durée totale de vibration 10 s (5 s pour la première couche et 5 s pour la dernière)
- Araser et lisser la surface du béton avec une truelle.

La conservation des moules contenant les éprouvettes, se fait dans le laboratoire, et afin d'éviter toute dessiccation initiale, on protège les moules par du film plastique.

- Après 24 h les éprouvettes sont démoulées, notées et immergées dans un bassin d'eau jusqu'à l'âge de 60 jours. (Voir Figure III.11) :



Figure III.11 : Remplissage et Conservation des épreuves du mortier normalisé [Photos prises au laboratoire de béton Génie Civil- UMMTO]

Nous avons conservé les éprouvettes dans un bassin de conservation rempli d'eau, juste après le démoulage pour y subir une cure d'hydratation jusqu'au mûrissement du béton à 60 jours, dans le but d'avoir un béton n'ayant pas subi de dessiccation. Toutes les éprouvettes ont été testées après 60 jours de mûrissement afin de déterminer les propriétés mécaniques du mortier normalisé.

III.3.3.3. Caractérisation des différentes compositions :

III.3.3.3.1. Essais non destructifs :

Contrôle par ultrasons: [37]

C'est un essai non destructif très important qui permet d'évaluer plusieurs caractéristiques du béton durci telles que : le degré de compacité, de fissuration, l'uniformité de coulage

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les résultats obtenus et donc leur interprétation dépendent du type de procédé de mesure appliqué et notamment la position des transducteurs de l'appareil à ultrasons

Disposition des transducteurs :

Trois types de dispositions des transducteurs sont communément utilisés :

- Mesure par la transmission directe.
- Mesure par la transmission semi directe
- Mesure par la transmission indirecte ou de surface.

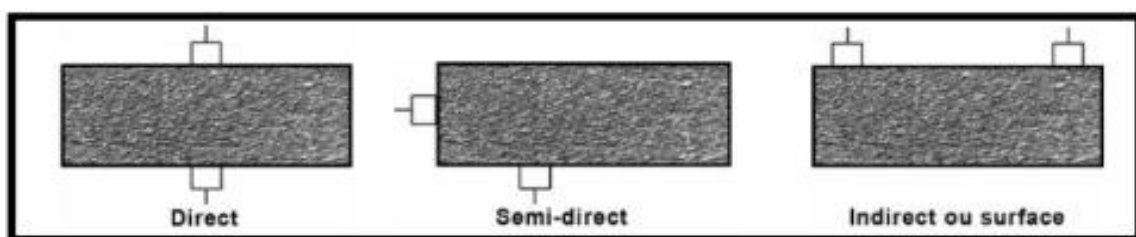


Figure III. 12 : Différents types de dispositions des transducteurs [37]

Chaque fois que cela est possible, il est recommandé d'utiliser la disposition directe, c'est la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur deux faces de l'éprouvette, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission maximale du signal entre les transducteurs.

La disposition semi-directe est moins sensible que la disposition directe mais plus sensible que la disposition indirecte.

La méthode indirecte est particulièrement utile pour la détermination de la profondeur des fissures, de la qualité de la surface ou dans le cas où une seule surface est accessible. Des

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

données de base sont communes à chaque méthode de mesure. La distance (longueur de trajet) entre les transducteurs doit être mesurée aussi précisément que possible. Il est très important d'assurer un couplage acoustique des transducteurs approprié avec la surface à tester, ainsi une fine couche de couplant doit être appliquée sur le transducteur et sur la surface à tester, et dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de préparer la surface en elle-même en la grattant, la lissant, et nettoyant correctement.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microseconde.

La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante [37] :

$$V = d/t$$

Avec :

V: vitesse de propagation en [m/s]

d: distance entre les têtes en [m].

t: temps en microseconde

Des travaux effectués montrent qu'il y a une relation directe entre la vitesse de propagation des ondes dans un béton et sa qualité. Le tableau III.9 donne un classement.

Tableau III. 9 : La vitesse de propagation des ondes et la qualité du béton [05]

Vitesse de propagation (m/s)	La qualité de Béton
Supérieure à 4575	Excellente
3660 à 4575	Bonne
3050 à 3660	Douteuse
2135 à 3050	Mauvaise
Inférieure à 2135	Très mauvaise

Pour déterminer la vitesse longitudinale, nous avons utilisé l'appareil de PUNDIT de marque « proceq » (Figure. III.13). Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes l'appareil à ultrasons doit être étalonné avec l'étalon montré ci-dessous.



Étalonnage de l'appareil

Appareil de contrôle à ultrasons.

Figure III.13 : Appareil à ultrasons [Laboratoire de Béton-Génie Civil-UMMTO]

III.3.3.3.2 Essais de caractérisation du mortier normalisé à l'état durci :

Ces essais ont été effectués au niveau de laboratoire : Composite et Mécanique des Matériaux-Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement-Faculté : Sciences et Ingénierie- Université M'HAMED BOUGARA-Boumerdes

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression et à la traction par Flexion du Mortier normalisé.

III.3.3.3.2.1 Résistance à la flexion : Selon la norme (NFP18-407)

Cet essai est effectué sous charge concentrée exécuté par un bâti de flexion de type Toni Technique piloté par ordinateur équipé du logiciel Test Expert V7.11, et doté d'un capteur de force de 100 KN.

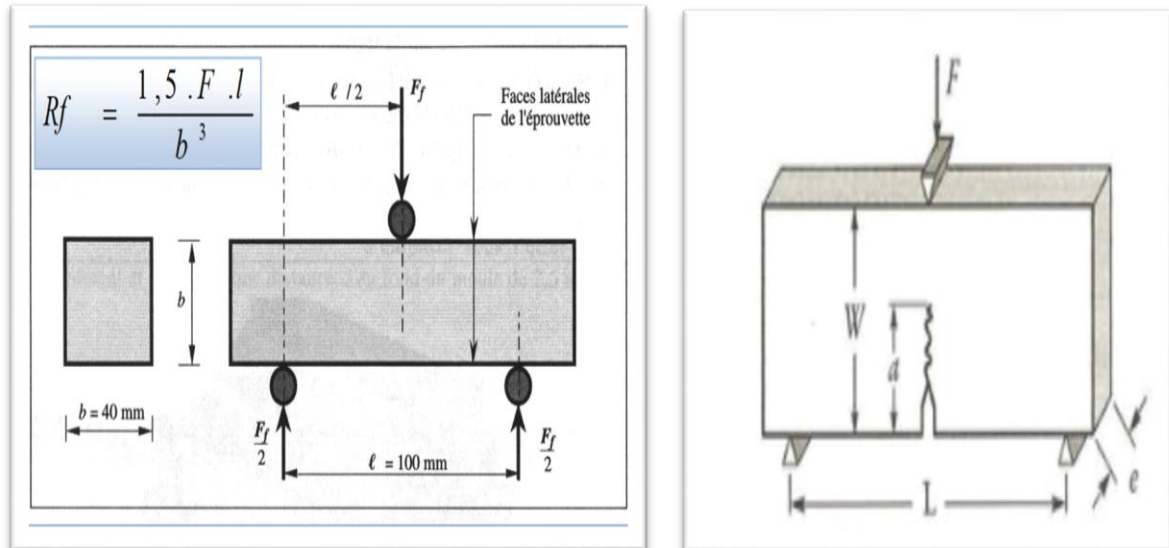
Cette machine est munie d'un dispositif à trois rouleaux, sur les éprouvettes en béton fibré ultra haute performance (4x4x16) [cm³] :

Dispositif de l'essai de flexion :

Flexion trois points :

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distant de 120mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge F. Afin transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement de leur centre dans le plans vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette. Le pas de chargement est de : 0.5[KN/ s]

La Figure III.14 montre une poutre sous chargement de flexion trois-points



a. Sans Entaille



b. Avec Entaille

Figure III.14 : Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion (3 points)
[Laboratoire UR-MPE/FSI-Boumerdes]

Flexion quatre points :

La Figure III.15 montre une structure sous chargement de flexion Quatre-points. Dans ce cas on utilise les mêmes appuis simples, mais on applique deux charges au lieu d'une seule charge concentrée.

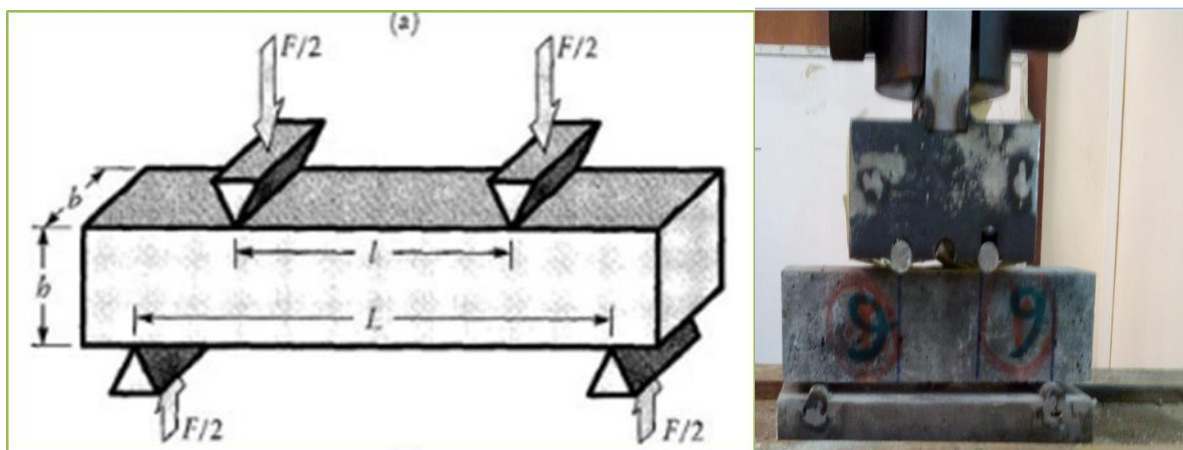


Figure III.15 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (4 points)

La résistance à la flexion (4 points) est calculée selon l'équation générale :

$$\sigma_f = \frac{Ff \cdot l}{2b \times h^2}$$

Dans notre cas $b = h$ d'où l'équation devient :

$$\sigma_f = \frac{Ff \cdot l}{2b^3}$$

Avec :

σ_f : Résistance à la flexion (4 pts) en [MPa] ;

Ff: Charge de rupture de l'éprouvette en flexion [KN] ;

l : Longueur qui sépare les deux appuis égale à 120mm ;

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

III.3.3.3.2.2. Résistance mécanique à la compression (NF P 15-471) :

L'essai de compression est effectué sur les demi-éprouvettes provenant de l'essai de flexion. Il est exécuté sur un bâti de compression de type Toni Technique piloté par ordinateur équipé du logiciel TestExpert V7.11, et doté d'un capteur de force de 300 KN. Celle-ci est reliée à une machine d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la force en fonction du temps. Le pas de chargement est de : 2.4[KN/ s]

Dispositif de l'essai

Chaque demi prisme est testé en compression sur ses faces de moulage, sous une section de 40×40 [mm²], entre deux plaques de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur, de 40 mm de largeur. Le demi-prisme est placé entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm

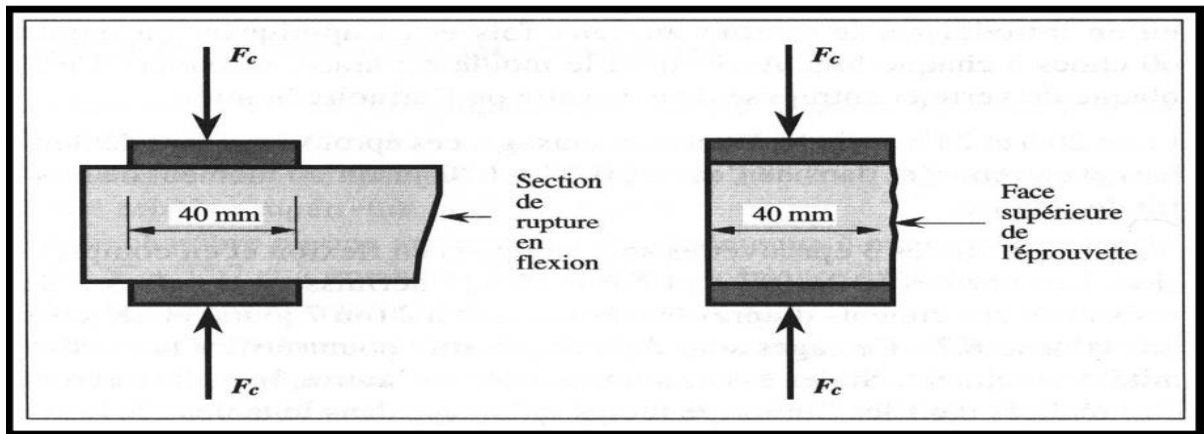


Figure III.16 : Dispositif de l'essai mécanique de Compression
[Laboratoire UR-MPE/FSI-Boumerdes]

La résistance à la compression est calculée selon l'équation suivante :

$$R_f = \frac{F_c}{b^2}$$

Avec :

R_f : Résistance à la compression en [MPa]

F_c : Charge de rupture en [N]

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40 [mm].

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par les caractérisations de différents constituants ; la formulation des bétons, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais mécaniques considérés dans ce travail. Les différents résultats obtenus à l'issue des tests effectués sont présentés et illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV :

Résultats et analyses

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats expérimentaux obtenus à partir des essais réalisés sur les mortiers normalisés avec et sans entailles à l'état durci.

On rappelle que durant l'étude, six compositions de mortier normalisé à base de différents diamètres et types de sables ont été réalisées ([0.2-0.315SD] -[0.315-0.5SD] -[0.5-0.63SD] - [0.315-0.5SR] -[1-1.25SR] -[3.15-4SR]) à raison de trois éprouvettes par essai.

IV.2 Les propriétés physico-mécaniques :

IV.2.1 Résultats des masses des mortiers durcis :

Pour chaque formulation de mortier normalisé, sont confectionnées trois éprouvettes de dimensions 4×4×16 cm³. Au 60ème jour, avant écrasement, les éprouvettes sont retirées de l'eau et systématiquement pesées (masse humide), puis soumises à l'essai non destructif de mesure d'Ultrasons, puis enfin aux essais destructifs de Flexion et de compression.

La moyenne des masses de différentes éprouvettes en mortier a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$M_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} m_i}{3}$$

Avec :

m_i : correspond à la masse d'éprouvette mesurée.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau IV.1 suivant

CHAPITRE VI : RESULTATS ET ANALYSES

Tableau IV.1 : Récapitulatif des pesées des masses des éprouvettes avant et après la conservation dans l'eau

Compositions	(Avec /Sans) Entaille	Résultats	
		Avant	Après
Composition I : 0.2-0.315 SD	Sans Entaille	512.21 g	537.86 g
	Avec Entaille	528.45 g	537.28 g
Composition II : 0.315-0.5 SD	Sans Entaille	537.68 g	544.9 g
	Avec Entaille	516.7 g	534.21 g
Composition III : 0.5-0.63 SD	Sans Entaille	544.25 g	552.08 g
	Avec Entaille	540.7 g	584.2 g
Composition IV : 0.315-0.5 SR	Sans Entaille	539.96 g	550.71 g
	Avec Entaille	538.51 g	548.85 g
Composition V : 1-1.25 SR	Sans Entaille	551.88 g	563.68 g
	Avec Entaille	544.6 g	556.46 g
Composition VI : 3.15-4 SR	Sans Entaille	590.01 g	600.43 g
	Avec Entaille	590.06 g	599.7 g

Afin de faciliter l'interprétation de ces résultats, nous avons représenté en histogramme les masses des éprouvettes prismatiques avant et après la conservation dans l'eau.

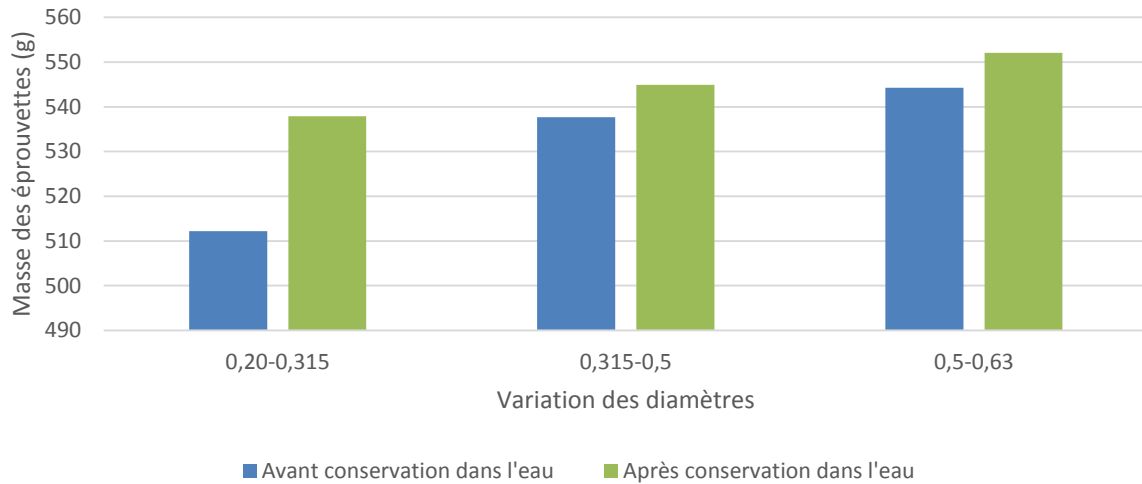


Figure IV.1 : Prise de masses des éprouvettes prismatiques des mortiers normalisés à base de sable de dune avant/après la conservation dans l'eau (Sans Entaille)

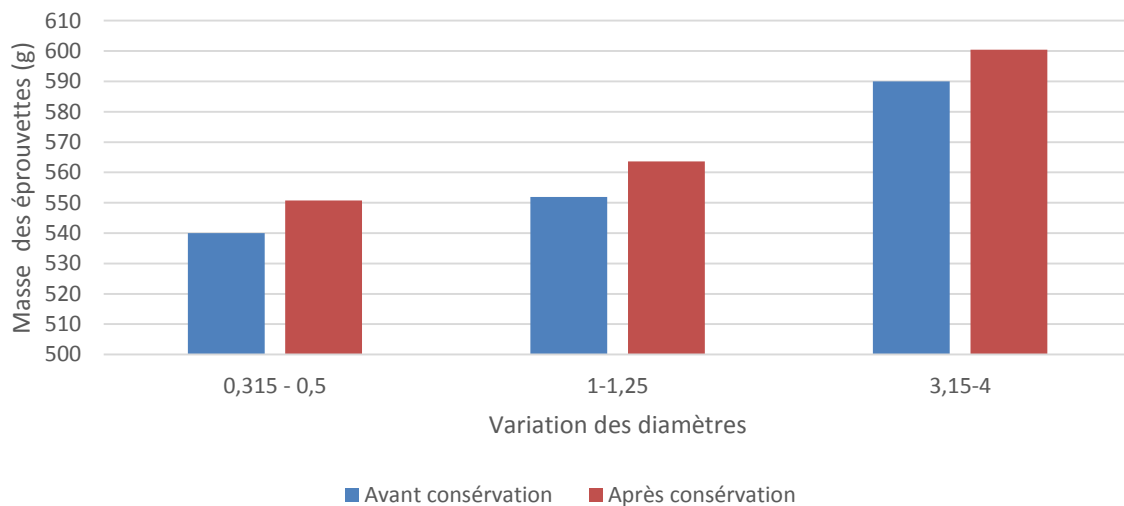


Figure IV.2 : Prise de masses des éprouvettes prismatiques des mortiers normalisés à base de sable de rivière avant/après la conservation dans l'eau (sans entaille)

Comme nous pouvons l'observer à partir des histogrammes de prise de masses des éprouvettes à base de sable de dune et de rivière, que plus le diamètre du sable utilisé est grossier plus le gain de masse est élevé. Effectivement, l'utilisation de granulats grossiers dans le mortier induit des vides intergranulaires de dimensions plus grandes. Ces vides intergranulaires étant de dimensions importantes, les pores créés à l'issue de l'hydratation du ciment le seront tout autant, d'où un volume plus important d'eau pouvant être potentiellement absorbé.

IV.2.2. Contrôle non destructif :

IV.2.2.1. Résultats des essais d'auscultation sonore (ultra-son) :

Au 60ème jour, après les pesées, les éprouvettes prismatiques ont été testées à l'ultrason. Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par mesure du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes pour chaque formulation de mortier utilisée. Les mesures des vitesses à l'ultrason ont été réalisées en mode de transmission directe.

Ce mode fournit le maximum d'énergie. Elles sont réalisées par un testeur ultrasonique EN 12504-4 Réf 10.0497 de marque Proceq aussi appelé appareil de PUNDIT, comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de réception calé à une fréquence de 150 kHz. Pour une meilleure précision, nous avons répété l'essai trois fois sur chaque éprouvette, et nous avons par la suite calculé la moyenne des trois mesures obtenues sur chaque éprouvette de mortier.

Ces résultats sont représentés dans les tableaux IV.2 et IV.3 et reportés sur un histogramme tel que schématisé sur la figure suivante :

Tableau IV. 2 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier (Sable de dune sans entaille)

Formulation	0.2-0.315	0.315-0.5	0.5-0.63
Vitesse (m/s)	4201	4278	4490

Tableau IV. 3 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier (Sable de dune avec entaille)

Formulation	0.2-0.315	0.315-0.5	0.5-0.63
Vitesse (m/s)	4239	4349	4449

Tableau IV. 4 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier (Sable de rivière sans entaille)

Formulation	0.35-0.5	1-1.25	3.15-4
Vitesse (m/s)	4000	4217	3236

Tableau IV. 5 : Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons dans le mortier (Sable de rivière avec entaille)

Formulation	0.35-0.5	1-1.25	3.15-4
Vitesse (m/s)	4073	4206	3247

Afin de faciliter l'interprétation de ces résultats, nous avons représenté en histogramme l'évolution de la vitesse d'onde des mortiers normalisé des différents natures de sable (avec et sans entaille).

1. Sable de dune

1.1 Sans entaille

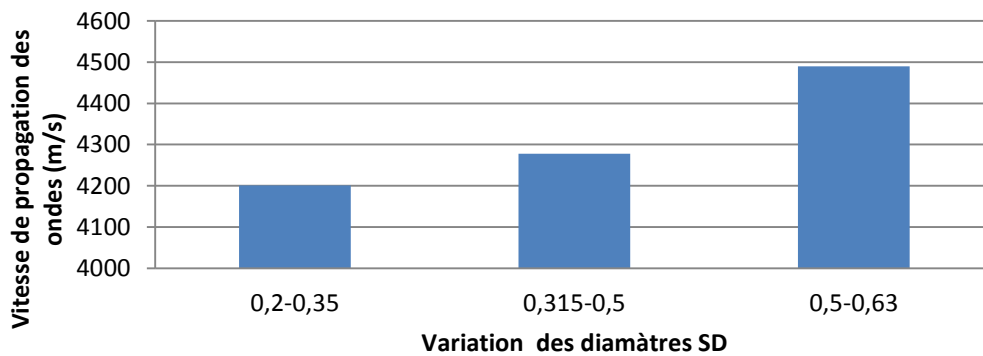


Figure IV.3 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de dune sans entaille.

1.2 Avec entaille

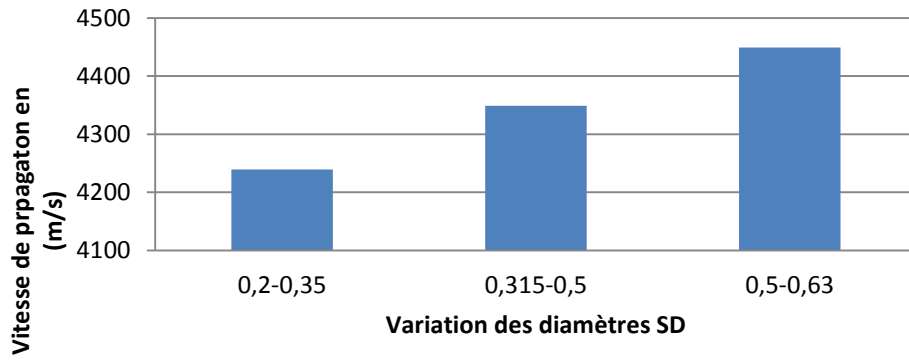


Figure IV.4 : Evolution de la vitesse d’onde des mortiers de sable de dune avec entaille.

1.3 Ultrason sans et avec entaille

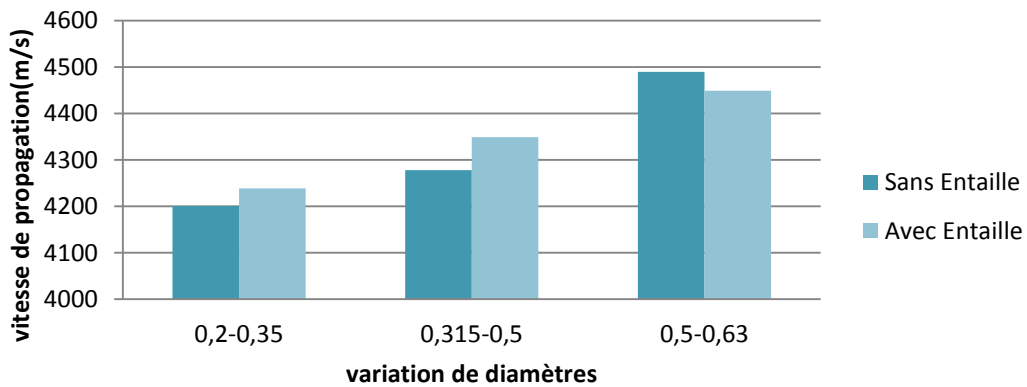


Figure IV.5 : Evolution de la vitesse d’onde des mortiers de sable de dune avec/sans entaille.

2. Sable de rivière

2.1 Sans entaille

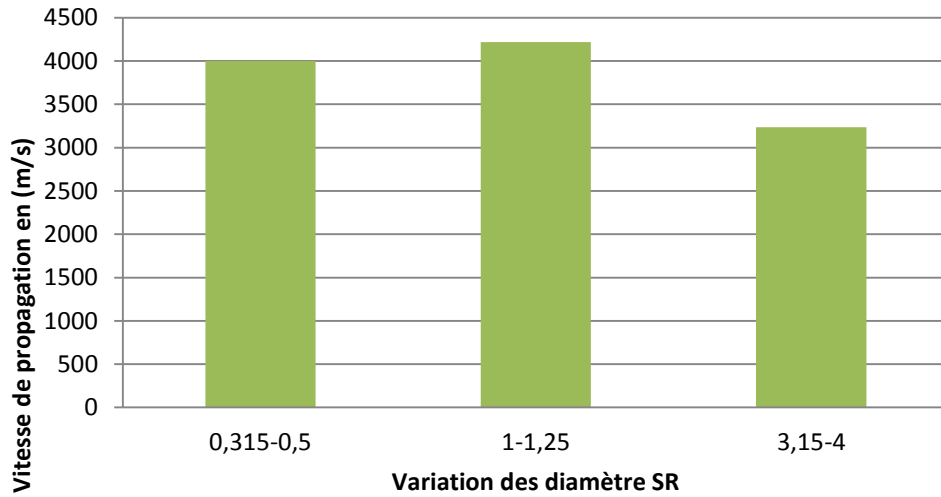


Figure IV.6 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers de sable de rivière sans entaille.

2.2 Avec entaille

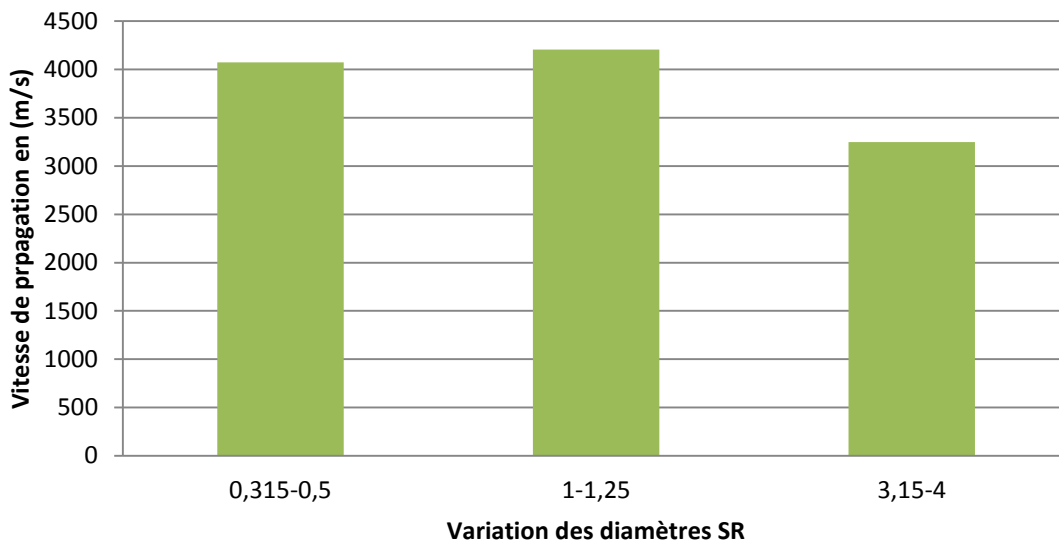


Figure IV.7 : Evolution de la vitesse d'onde des mortiers du sable de rivière avec entaille.

2.3 Ultrason sans et avec entaille

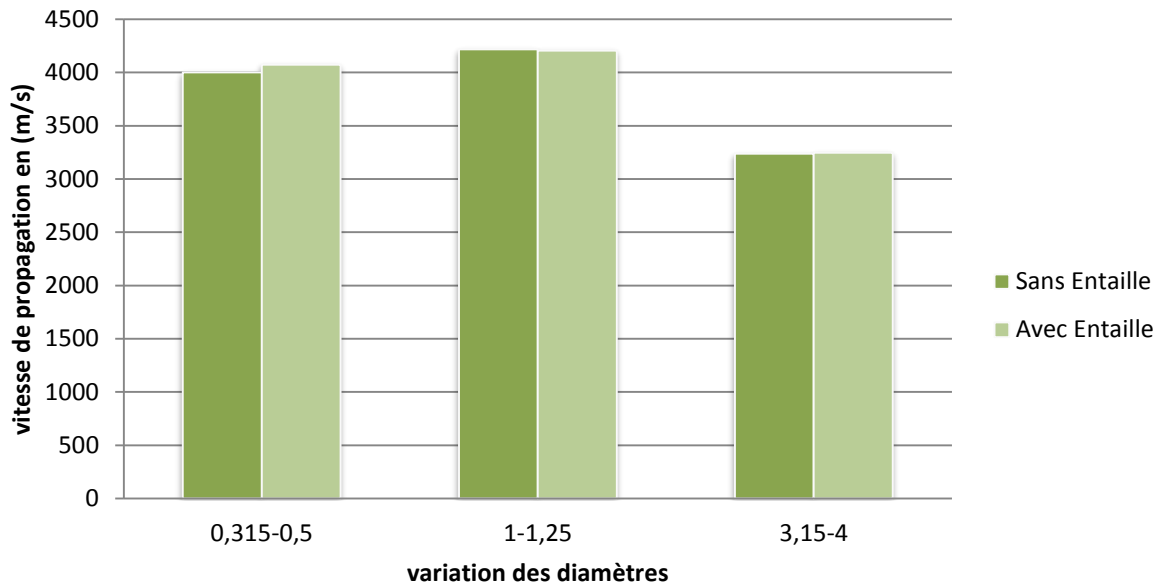


Figure IV.8: Evolution de la vitesse d’onde des mortiers de sable de rivière avec/sans entaille.

Discussion et interprétation des résultats :

Les histogrammes des vitesses ultrasonores sur les mortiers des sables de dunes, montrent une augmentation de la vitesse de propagation de la vitesse avec l’augmentation du diamètre du granulats utilisé mais surtout avec l’augmentation de la masse de l’éprouvette principalement dû à l’augmentation de la masse du ciment. Effectivement, lorsque la quantité de ciment augmente, la matrice cimentaire devient plus dense et donc la vitesse de propagation plus importante. Dans le cas sable de dune, nous remarquons aussi le même phénomène, effectivement, concernant les deux premiers diamètres, nous remarquons des valeurs de vitesse ultrasonore quasi similaire, cependant dès lors que le diamètre augmente (3^{ème} diamètre), une chute de vitesse est observée, cela est due à la quantité importante de granulats mais aussi à la relative faible quantité de ciment utilisée par rapport aux autres éprouvettes.

IV.2.3. Essais à l'état durci :

IV.2.3.1. Résultats des résistances à la compression à 60 jours (NF P 18-406) :

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle d'un béton ou d'un mortier ; elle correspond à la charge de rupture (charge maximale) enregistrée au cours de

CHAPITRE VI : RESULTATS ET ANALYSES

l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette. (Voir la figure IV.9)

Nous avons procédé à trois mesures (essais), pour chaque formulation, et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau (IV.6).



Figure IV.9: Corps d'éprouvettes ayant subi l'essai de compression

La moyenne des résistances mécaniques obtenues à 60 jours sur les trois éprouvettes testées, pour les différentes formules de mortier normalisés sont récapitulés dans le tableau IV.6. Celle-ci est calculée en utilisant la formule suivante :

$$R_{cmoyenne} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} R_{ci}}{3}$$

R_{ci} : Résistance mesurée sur l'éprouvette i .

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau IV.6 suivant :

Tableau IV.6 : Résistances moyennes à la compression des mortiers étudiés à 60j

Compositions	Type d'essai	Résultat
Composition I : 0.2-0.315 SD	Compression	19.635 [MPa]
Composition II : 0.315-0.5 SD	Compression	30.77[MPa]
Composition III : 0.5-0.63 SD	Compression	34.42[MPa]
Composition IV : 0.315-0.5 SR	Compression	27.115[MPa]
Composition V : 1-1.25 SR	Compression	28.075[MPa]
Composition VI : 3.15 - 4 SR	Compression	37.03[MPa]

Les résultats du tableau IV.6 sont présentés dans les figures suivantes

1. Sable de dune

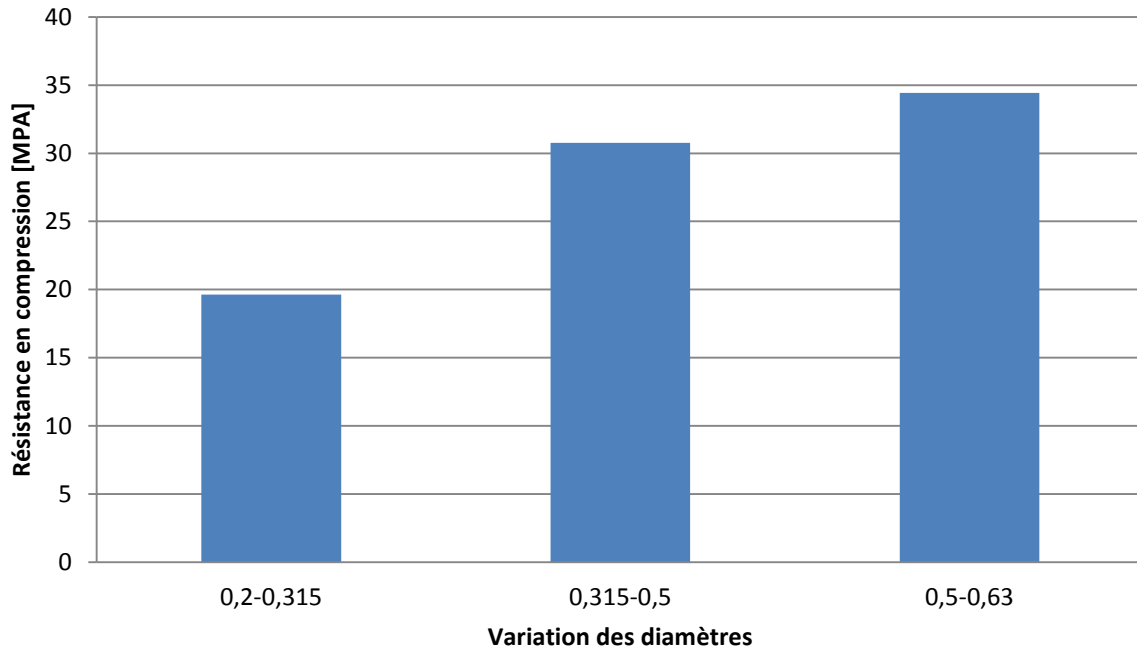


Figure IV.10 : La résistance en compression des mortiers à base de sable de dune.

2. Sable de rivière

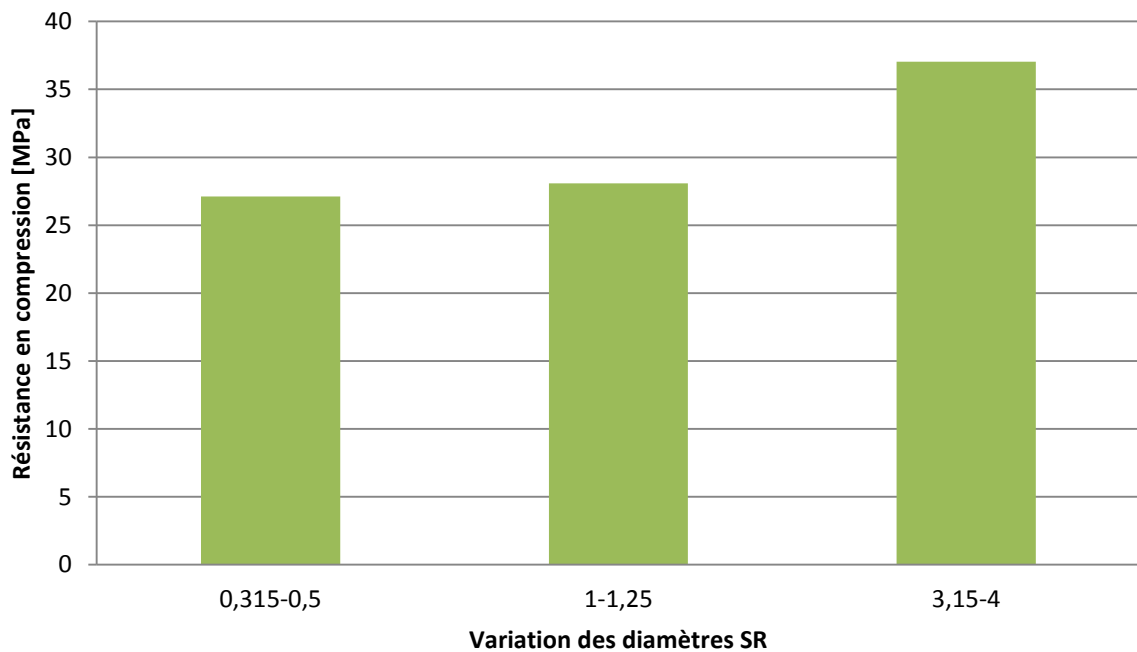


Figure IV.11 : La résistance en compression des mortiers à base de sable de rivière

Discussion et interprétation des résultats :

Comme nous pouvons le constater à partir des résultats de compressions des éprouvettes de sables de dunes, plus le diamètre du sable est élevé plus la résistance mécanique est élevée. Plus le grain de sable est petit, plus sa surface spécifique est grande. Etant donné que la surface du granulat dans la matrice cimentaire est le lieu à la précipitation de grains de portlandite qui ont de faibles propriétés mécaniques et sachant aussi que cette zone nommée interface pâte-granulat est réputée être plus poreuse que le reste du ciment, son nombre élevé induit autant de zones de microfissurations préférentielles lors de la rupture. Le même constat peut aussi être émis concernant le sable de rivière, où les résistances aussi augmentent en fonction de l'augmentation des diamètres des grains bien que cette augmentation soit plus marquée pour le diamètre le plus élevée (3,15-4mm). Effectivement, lorsqu'on soumet les éprouvettes à de la compression, un gradient de déformation se produit entre la pâte de ciment et les granulats, la pâte de ciment étant plus déformable. Sous l'effet de ce gradient de déformations, de la fissuration microscopique se produit en de multiples points préférentiellement à l'interface pâte-granulat, les granulats étant rapprochés les uns des autres, les microfissures ont la possibilité de se rejoindre plus facilement et ainsi augmenter en taille tout aussi facilement. La rupture adviendra ainsi plus rapidement comparativement admettons dans le cas de plus gros granulats, à l'apparition d'une grande fissure qui devra parcourir de plus grandes distances dans la pâte de ciment rigide afin d'attendre la surface du granulat et la traverser. En comparant les deux natures de sables, nous remarquons que l'utilisation de sable de dune dans le mortier permet d'atteindre des résistances mécaniques tout à fait comparables aux sables de rivières, effectivement, la meilleure résistance à la compression atteinte pour le sable de dune est de 34.42MPa tandis que celle du sable de rivière est de 37.03MPa soit 7% de différence seulement.

IV.2.3.2 Résistance à la flexion 3 Pts (Norme NF EN 12390-5)

Lors d'un essai de flexion trois points, l'éprouvette du mortier est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Etant donné que la résistance du mortier à la traction est très faible par rapport à celle en compression, l'éprouvette va se rompre dès que celui-ci aura atteint sa limite en traction. La contrainte R_t correspond à la rupture résultant d'un calcul classique de résistance des matériaux en élasticité (contrainte de traction par flexion).

CHAPITRE VI : RESULTATS ET ANALYSES

Nous rappelons que les essais de traction par flexion sont effectués sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16$ [cm³] sur la machine TONY TECHNIQUE 100KN pilotée par ordinateur.

La rupture de chaque éprouvette en flexion a été effectuée conformément au dispositif décrit sur la Figure III.14 (Voir Chapitre III)

Pour chaque mélange, nous avons testé la résistance à la traction après 60 jours de conservation à l'eau. La photo de la Figure IV.12 représente le dispositif utilisé pour la réalisation de l'essai ainsi que l'état de l'éprouvette après l'essai de traction par flexion.



a. Dispositif de l'essai

b. Flexion 3pts Avec Entaille

Figure IV.12: Dispositif de l'essai ainsi que l'état de l'éprouvette après l'essai de traction par flexion.

Les valeurs moyennées de la résistance en traction par flexion (3 Pts) pour chaque mélange sont regroupées dans le tableau. IV.7.

CHAPITRE VI : RESULTATS ET ANALYSES

Tableau. IV.7: Valeurs de la résistance en traction des différentes formulations

Compositions	Type d'essai	(Avec/ Sans) Entaille	Résultats
Composition I : 0.2-0.315 SD	Flexion 3 Pts	Sans Entaille	8.34[MPa]
		Avec Entaille	3.06[MPa]
Composition II : 0.315-0.5 SD	Flexion 3 Pts	Sans Entaille	6.56[MPa]
		Avec Entaille	6.68[MPa]
Composition III : 0.5-0.63 SD	Flexion 3 Pts	Sans Entaille	5.65[MPa]
		Avec Entaille	3.38 [MPa]
Composition IV : 0.315-0.5 SR	Flexion 3 Pts	Sans Entaille	5.83[MPa]
		Avec Entaille	3.54[MPa]
Composition V : 1-1.25 SR	Flexion 3 Pts	Sans Entaille	7.80 [MPa]
		Avec Entaille	3.30 [MPa]
Composition VI : 3.15-4 SR	Flexion 3 Pts	Sans Entaille	7.99 [MPa]
		Avec Entaille	4.55[MPa]

1. Sable de dune

1.1 Sans entaille

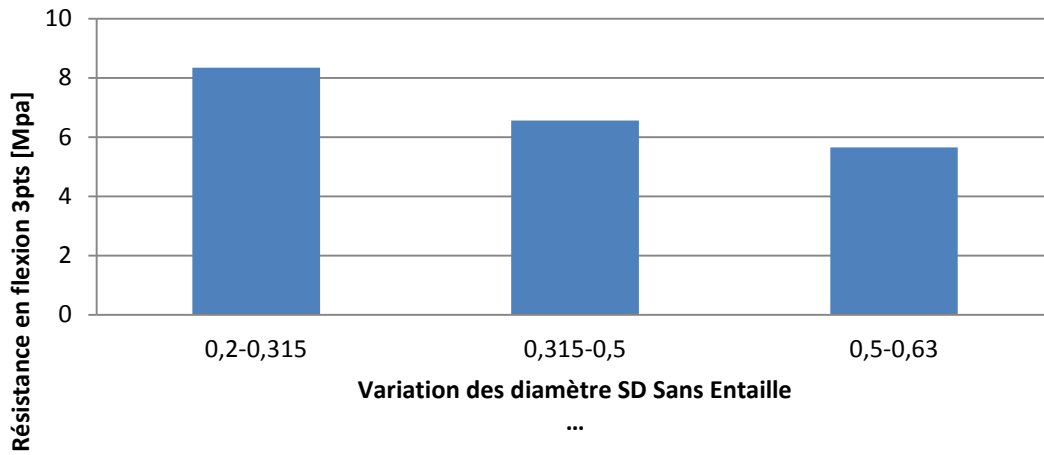


Figure IV.13 : Variation de la résistance en flexion 3 pts des éprouvettes en mortiers à base de sable de dune sans entaille

1.2 Avec entaille

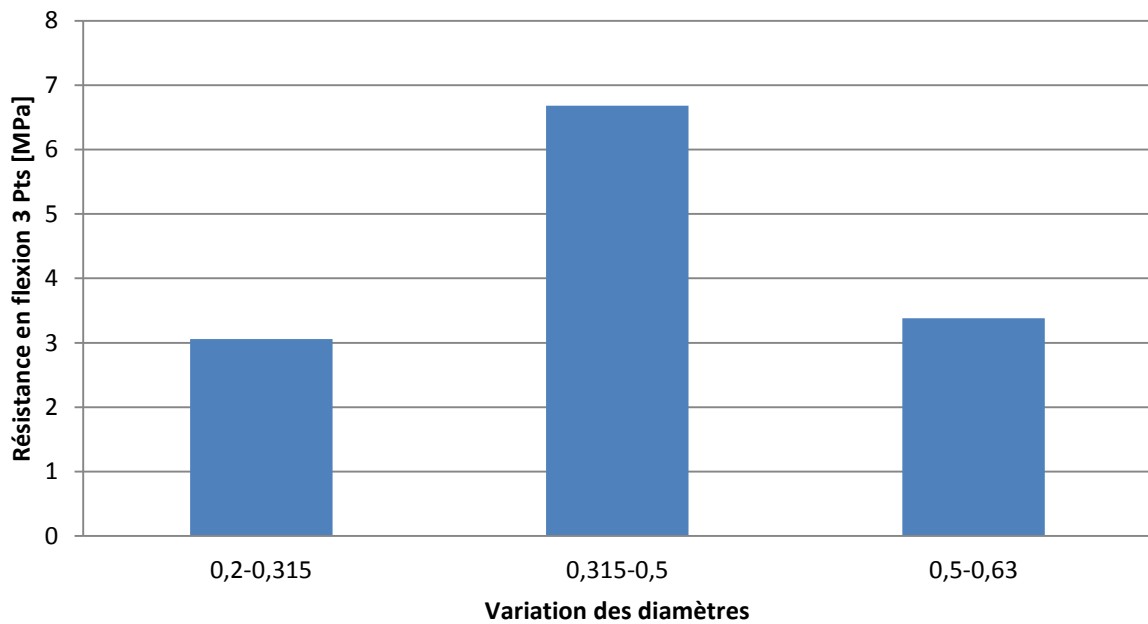


Figure IV.14 : Variation de la résistance en flexion 3 pts des éprouvettes en mortiers normalisés à base de sable de dune avec entaille

1.3 flexion 3 points (Avec et Sans Entaille)

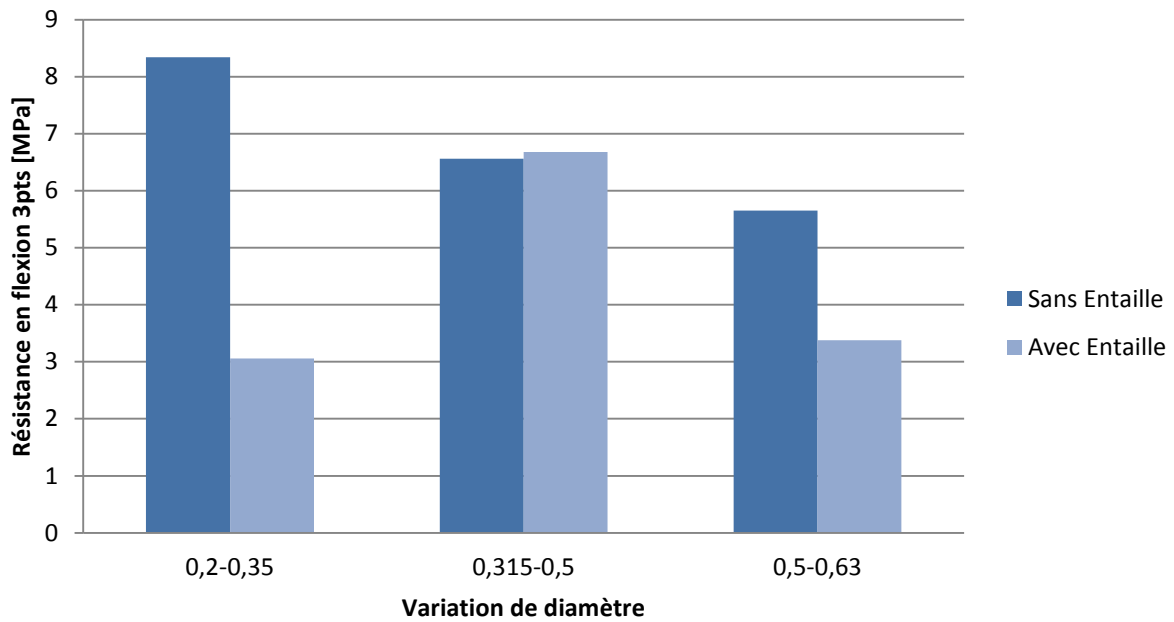


Figure IV.15: Variation de la résistance en flexion 3 pts des éprouvettes en mortiers normalisés à base de sable de dune avec et sans entaille

2. Sable de rivière

2.1 Sans entaille

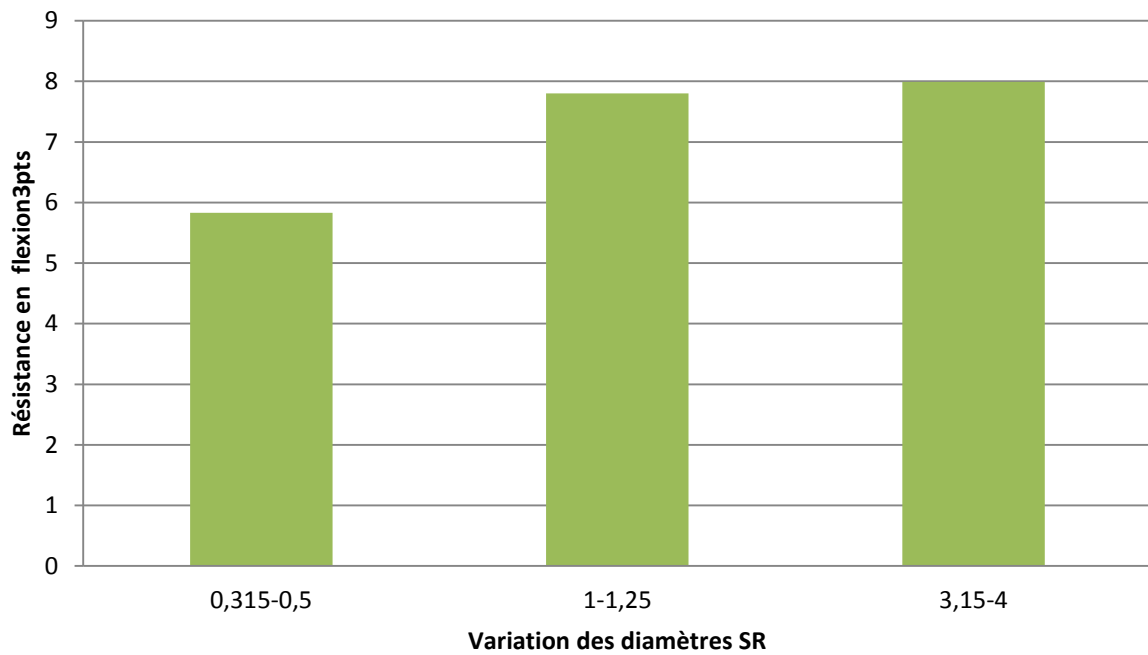


Figure IV.16 : Variation de la résistance en flexion 3 pts des éprouvettes en mortiers à base de sable de rivière sans entaille

2.2 Avec entaille

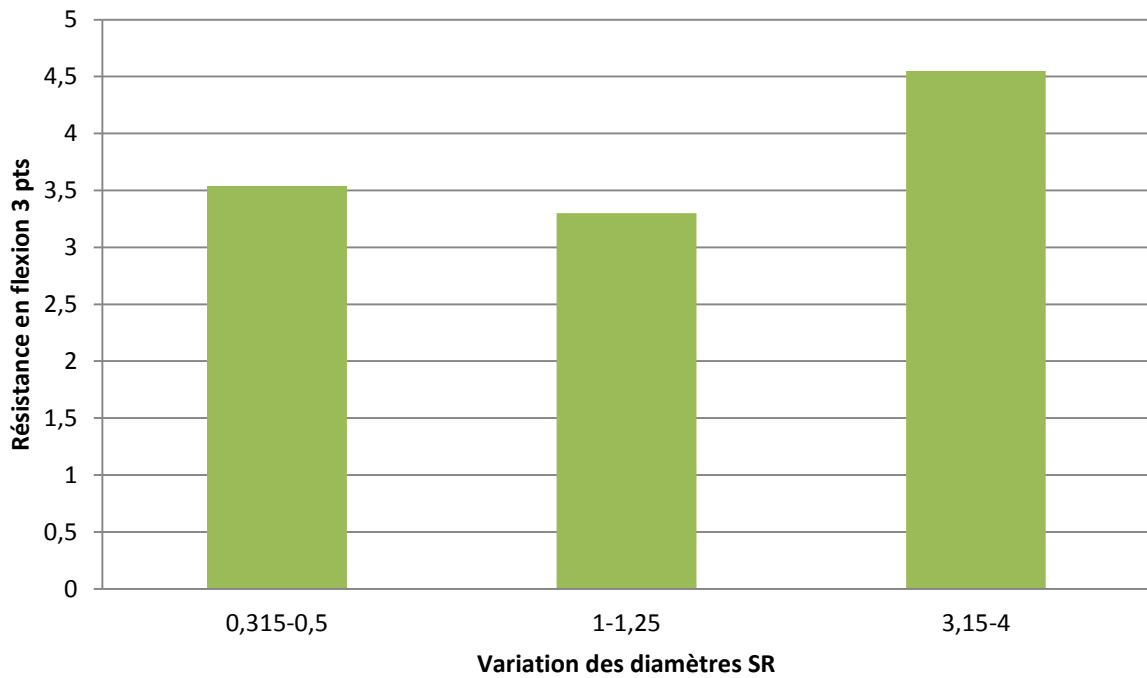


Figure IV.17 : Variation de la résistance en flexion 3 pts des éprouvettes en mortiers à base de sable de rivière avec entaille

2.3 Sans et avec entaille

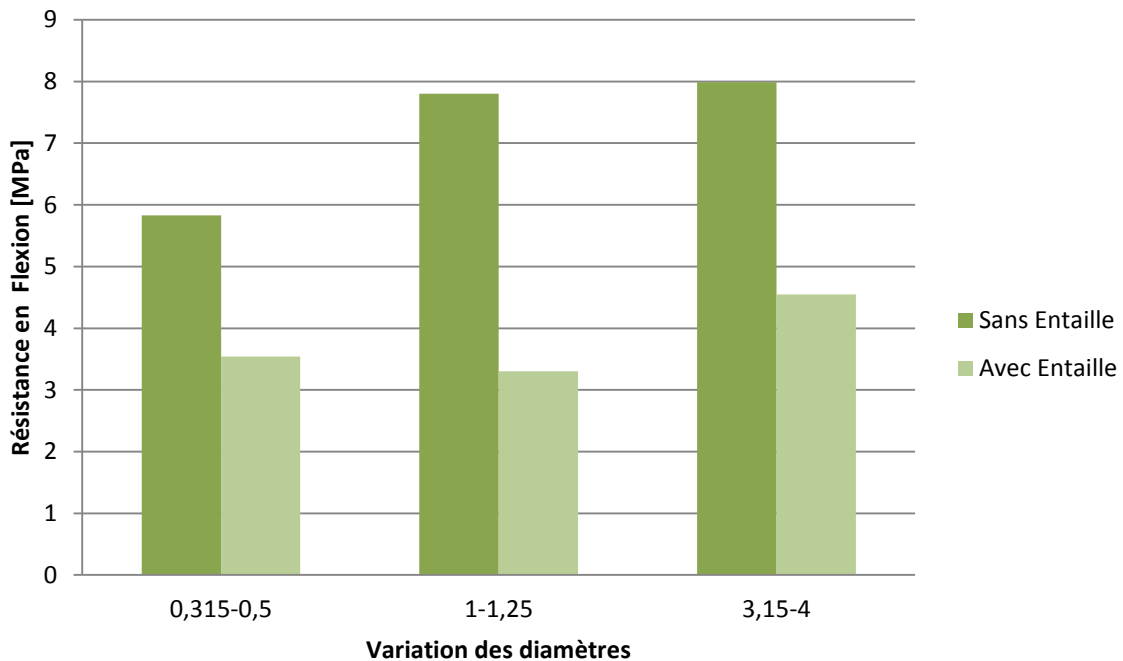


Figure IV.18 : Variation de la résistance en flexion 3 pts des éprouvettes en mortiers à base de sable de rivière avec et sans entaille

Discussion et interprétation des résultats :

Comme nous pouvons le constater à partir des résultats de traction des éprouvettes de sables de dunes, plus le diamètre du sable est élevé plus la résistance mécanique à la traction est faible. Une hypothèse serait que lorsque l'on soumet les éprouvettes à la traction, plus les granulats sont grossiers, plus la propagation de la fissure est facilitée. En effet, en supposant que lors de la rupture, une seule fissure principale se forme et se propage, si celle-ci rencontre un granulat de grande dimension, elle se propage plus facilement dans son interface pâte-granulats, étant donné que cette zone est très poreuse et dans ce cas de grosse dimension, elle pourra parcourir la largeur de l'éprouvette plus facilement étant donné que les zones de pâte de ciment sur son parcours seront moins nombreuses. En ce qui concerne le cas du sable de rivière, nous remarquons que plus le diamètre augmente, plus la résistance à la traction augmente aussi. Une hypothèse serait que plus le diamètre des granulats augmente, plus la forme du grain rencontrée est susceptible de changer comparativement aux grains plus fins. Effectivement, plus les grains sont fins, plus ils ont une forme plus ou moins sphérique, et plus ils sont gros, plus ils pourront des formes plus ou moins allongées ou aplaties. Par conséquent, lors du passage de la fissure, celle-ci devra contourner le granulat sur une distance plus élevée, et en dissipant plus d'énergie afin de traverser l'ensemble de l'éprouvette et atteindre la rupture.

En comparant l'utilisation du sable de dune à son homologue de rivière, nous observons des résistances à la traction maximale similaires, dans le cas du sable de dune, elles se situent vers 8,34MPa pour SD0.2-0.315mm tandis qu'elle est vers 7,99 MPa pour 3,15-4mm

IV.2.3.3. Résultats des essais de Flexion 4 points :

Le test de flexion quatre points, est différent à l'essai de flexion trois points mais présente l'avantage de ne pas positionner l'appui au niveau de la zone de rupture. Ceci est en effet une limitation du système à trois points où l'appui central peut endommager l'éprouvette (pré-fissuration de contact) et fausser ainsi les résultats en entraînant une rupture précoce de celle-ci. Aussi, contrairement au test de flexion 3 pts, le comportement de rupture principal de ce type de test est un cisaillement et non pas une rupture par traction.

La figure (IV.19) illustre l'état de l'éprouvette testée avant et après l'essai (post-rupture)



Figure IV.19 : Etat de l'éprouvette après l'essai de flexion 4 points

Dans cette partie, nous présentons les différents résultats expérimentaux obtenus lors d'essais de flexion 4 points

Tableau IV.8: Valeurs de la résistance en Flexion (4pts) des différentes formulations

Compositions	Type d'essai	(Avec/ Entaille Sans)	Résultats
Composition I : 0.2-0.315 SD	Flexion 4 Pts	Sans Entaille	2.16[MPa]
Composition II : 0.315-0.5 SD	Flexion 4 Pts	Sans Entaille	2.14[MPa]
Composition III : 0.5-0.63 SD	Flexion 4 Pts	Sans Entaille	2.85[MPa]
Composition IV : 0.315-0.5 SR	Flexion 4 Pts	Sans Entaille	2.77[MPa]

Composition V : 1-1.25 SR	Flexion 4 Pts	Sans Entaille	2.83[MPa]
Composition VI : 3.15-4 SR	Flexion 4 Pts	Sans Entaille	2.67[MPa]

Les résultats du tableau IV.8 sont repris dans les graphes IV.20 et IV.21 en fonction des pourcentages de sables.

I. Sans entaille

1. Sable de dune

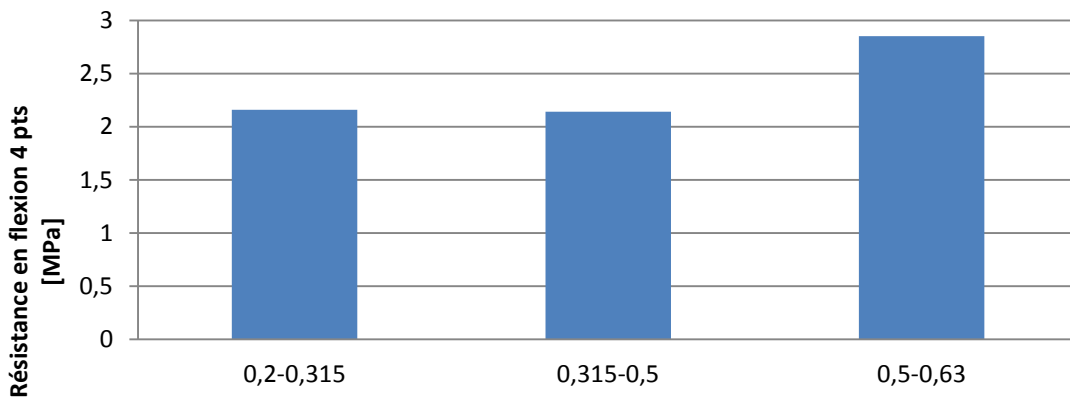


Figure IV.20: Evolution de la résistance en Flexion (4 Pts) des mortiers à base de sable de dune à 60 jours. (Sans Entaille)

2. Sable de rivière

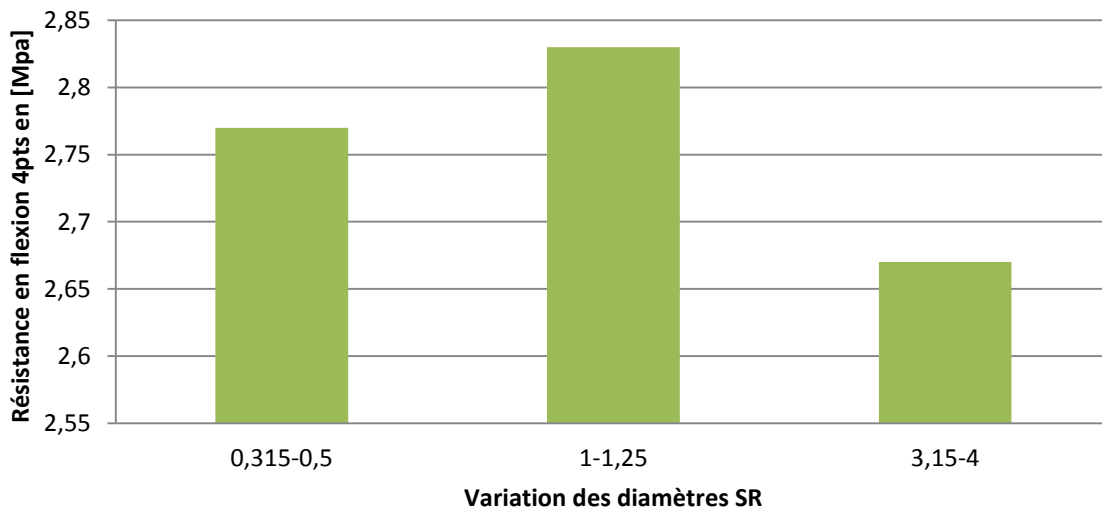


Figure IV.21: Evolution de la résistance en Flexion (4 Pts) des mortiers normalisés à base de sable de rivière à 60 jours. (Sans Entaille)

Discussion et interprétation des résultats :

Comme nous pouvons l'observer, dans le cas du mortier à base de sable de dune, la contrainte de cisaillement pour les deux premiers diamètres est quasi-similaire tandis qu'elle augmente pour le dernier diamètre qui est plus élevé. Pour le sable de rivière nous remarquons l'apparition d'un pic de résistance au cisaillement pour le diamètre 1-1.25 tandis que les diamètres 0.315-0.5mm et 3.15-4mm sont moins élevés. En comparant les deux natures de granulats, nous observons, que nous pouvons obtenir des résultats similaires en termes de résistances au cisaillement en utilisant le sable de dunes. Effectivement, la résistance au cisaillement atteinte le SD0.5-0.63 est de 2,85MPa tandis que le SR1-1.25 est de 2,83MPa.

CONCLUSION

GENERALE

conclusion

Le but visé par cette étude est la substitution de sable de rivière par un sable de dune afin de mettre en valeur ce dernier qui se trouve en abondance au sud du pays et l'intégrer dans la masse du mortier, tout en menant une recherche basée conjointement sur une synthèse bibliographique.

Cette recherche nous a permis de faire une étude comparative entre le mortier à base de sable de dune et celui à base de sable de rivière. Pour ce faire, des essais ont été effectués sur des éprouvettes de mortier de différents diamètres (Avec Sable de Dune [SD] 0.2-0.315/0.315-0.5/0.5-0.63) et (Avec Sable de Rivière [SR] 0.315-0.5/1-1.25/3.15-4). Afin de pouvoir déterminer les diamètres de sable tolérables pour les mortiers normalisés.

Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes

- Les mortiers des sables de dunes normalisés permettent d'avoir une bonne compacité et une meilleure résistance mécanique, cela passe notamment par l'augmentation du diamètre du granulat utilisé.
- L'utilisation de sable de dune dans le mortier permet d'atteindre des résistances comparables aux sables de rivières, atteignant 34.42MPa tandis que celle du sable de rivière est de 37.03MPa soit 7% de différence seulement.
- Effet positif de l'augmentation du diamètre de sable de dune et du sable de rivière sur les résistances à la compression.
- L'utilisation du sable de dune à son homologue de rivière nous permet d'avoir des résistances à la traction maximale similaire atteignant 8.34 MPa pour le cas de sable de dune (SD 0.2-0.315) mm, tandis qu'elle est de 7.99 MPa pour le sable de rivière (SR 3.15-4) mm
- Les meilleures résistances en traction par flexion des mortiers normalisés sont obtenus par la composition (SD 0.2- 0.315) à base de sable de dune.
- Enfin l'ajout de sable de dune ou la substitution du sable de rivière par le sable de dune présente le double avantage d'une part augmenter les performances mécaniques des mortiers normalisés, d'autres part remplacer un matériau tarissable et surexploité par un matériau abondant et sous-exploité.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1]- KEDDAM LYDIA " Caractérisation expérimentale des mortiers à base de poudre de marbre" mémoire master, Tizi-ouzou, université Mouloud Mammeri, 2016/2017.
- [2]- CIMBÉTON, « Collection technique Ciments et bétons, » Conception et réalisation : Am principe Paris, Édition 2005.
- [3]- A. KOMAR, " Matériaux et éléments de construction ", Quatrième édition, Editions MIR. MOSCU.
- [4]- MICHEL VENUAT, " La pratique des ciments mortiers et bétons ", Tome 1, Caractéristiques des liants et des bétons, Mise en oeuvre des coulis et mortiers, Editions du Moniteur.
- [05] - GEORGES DREUX, JEAN FESTA « Nouveau guide du béton et de ses constituants» huitième édition ,2002.
- [06] LARBI Walid cours du conservatoire National des arts et Métiers matériaux de construction Enseignant responsable
- [07] cours de matériaux de constructions génie civil ; PDF
- [08] AYADI Walid abdelghani, GUENOUNE Abdelmalek," Valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire", Mémoire Master en :Génie des Matériaux Option : Sciences des matériaux-pour la construction durable UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.
- [09] Nasser si sofién,"Etude expérimentale d'un mortier renforcé par des fibres végétales" Mémoire de Master Académique Option : Structure- Université Mouloud Mammeri –Tizi Ouzou,2019.
- [10] -Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540, 1997.
- [11] COURS DE MDC : « LES GRANULAT », Université De Setif, (www.univ-setif.dz).
- [12] : BERREDJEM Layachi : « le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et comportements physiques et mécaniques des bétons à base de ces recyclé ». Mémoire de magister, Annaba, p 7,2009.
- [13] : A. M. NEVILLE : « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 2000.
- [14] : Rappel sur les granulats : « Cours Géomatériaux », (alonet.yolasite.com).
- [15] : EN 13055-1 : Granulats légers — Partie 1 : Granulats légers pour bétons et mortiers,2002.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [16] CHAUVIN, J.J. Les sables : guide technique d'utilisation routière. ISTED, 76 p. France, 1987
- [17] GUENNOUN. R, « Etude et formulation d'un béton de sable de dune » Alger, juin 2003.
- [18] KHETAB. R, « valorisation du sable de dune » thèse de doctorat, Alger, année 2006.
- [19] REZIG. SALIMA, « Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux » mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, année 2012.
- [20] MEKHERMECHE. A, « Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes » mémoire de magister, université kasdi merbah Ouargla, année 2012.
- [21] Houssam BELKHIRI & Ahmed DERRAGUI," Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses" Mémoire de Fin d'Etudes, Université Ziane Achour de Djelfa, année 2016
- [22] AZZOUZ. Hocine, « Etude des bétons à base des sables de dune » mémoire de magister, université Mohamed kheider Biskra, année 2009.
- [23] GUERMITI. LAID, « contribution à l'amélioration certaines caractéristiques du béton de structure a base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques » mémoire de magister, université kasdi merbah Ouargla, année 2013.
- [24] Norme Française XP P 18-553 : Granulats -Préparation d'un échantillon pour essai, AFNOR 1990.
- [25] : Norme Française EN 932-1: Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage, AFNOR 1990.
- [26] : NF EN 933-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : Détermination de la granularité — Tamis, dimensions nominales des ouvertures,1996 Indice de classement : P 18-622-2, 1996.
- [27] : F. GABRYSIK : « Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2 », Académie de Nancy-Metz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/. P 7.
- [28] R. DUPAIN, R. LANCHAN & J.-C. SAINT-ARROMAN : « Granulats, Sols, Ciments et Bétons », Editions Casteilla, 2ème édition conforme aux normes européennes, 2000.
- [29] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement : P 15-540, 1997.
- [30] : EN 1097-3 : granulats, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire, indice de classement : P 18-650-3, version française,p 6, 1998.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [31] : EN 1097-6 : granulats Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 , indice de classement : P 18-650-6, 1998.
- [32] : Norme Française XP P 18-598 : Granulats- Equivalent de sable, AFNOR, 1991.
- [33] CHABIA, Raihana, 2016. Contribution à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques de béton se sable de dunes et l'influence de milieux de coacervation, mémoire mastère, Université Ouargla.
- [34] Mlle HADJADJA Taous « Influence des paramètres constitutifs d'un béton sous l'efficacité d'un confinement » Mémoire de Master Académique Option : Structure- Université Mouloud Mammeri –Tizi Ouzou,2018
- [35]Anh Vu Nguyen « Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. » Université Blaise Pascal – Clermont Ferrand II, 2015.
- [36]DELSOL Sébastien , « Evaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés des fibres métalliques » Maîtriseès sciences appliquées Génie Civil –Université de Montréal - 2012
- [37] Karina TALEB« *Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des Fines de Mortiers de Démolition sur les propriétés des Mortiers* » Mémoire de Master académique option Structure et Matériaux -Génie Civil-Université Mouloud MAMMERI, 2015

ANNEXE

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates trisodiques C ₃ S (%):	58 – 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 – 16
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	8,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 – 166
Fin de prise (min)	195 – 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SNG)

Alger, Algérie
Tél: +213 20 55 76 20
Fax: +213 20 55 76 30

Direction générale

20, boulevard René Cartier, Alger
Tél: +213 20 27 68 18 00
Fax: +213 20 27 68 10 77

Direction Service Algérie (SNG)

Alger, Algérie
BP 07, SOGIC, Algérie
Tél: +213 20 40 94 80 00
Fax: +213 20 40 94 80 00

