



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique

SOUTENANCE DE MEMOIRE DE MAGISTER

En Génie Civil

Option : MODELISATION DES MATERIAUX ET STRUCTURES

Présenté par

REZIG Salima

-Thème -

**Optimisation de la formulation du béton
de sable dans le cadre de valorisation
des matériaux locaux.**

Membres du jury

Pr. GUETTALA	Abdelhamid	Président
Dr. ZATAR	Abdellah	Rapporteur
Dr. BOUAZIZ	Ahmed	Examineur
Dr. MELLAS	Mekki	Examineur
Dr. MEZGHICHE	Bouzidi	Examineur

Soutenue le :/...../.....

Remerciements

Je remercie Monsieur ZATAR Abdallah, pour son aide et ses conseils tout au long de ce travail.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur GUETTALA Abdelhamid président de jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en président le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens surtout à remercier Mr BOUAZIZ Ahmed pour ses conseils et ses remarques de fond et d'avoir accepté aussi d'être membre du jury

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membres de jury et de bien vouloir juger ce travail.

Mrs MELLAS Mekki, MEZGHICHE Bouzidi et

Je rends hommage à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont apporté de l'aide pour l'élaboration de ce travail, en particulier Monsieur TAMAARAT Messoud responsable du laboratoire de génie civil, pour ses conseils et son aide .

J'exprime ma profonde gratitude envers Monsieur TAALAH Bachir et Mademoiselle EZAMOURENE Warda pour leur aide.

Je remercie très chaleureusement mes parents, mes sœurs, mes frères, et tous mes collègues.

RESUME

En raison des caractéristiques du béton de sable au béton ordinaire, on rappelle : l'ouvrabilité (facilité de mise en œuvre), la cohésion et l'absence de ségrégation, il faudra développer l'exploitation de ce type de béton et améliorer ses propriétés.

L'objectif principal de notre travail est d'apporter une contribution pour optimiser la formulation du béton de sable dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux (sable de dune), avec l'utilisation des ajouts, afin d'assurer une protection adéquate pour le béton. Et pour améliorer la résistance à la compression, à la traction, à la flexion, le retrait et la diminution des fissurations, nous avons proposé de formuler un béton de sable avec des fibres végétale (fibres du palmier dattier et fibres d'alfa).

Cette étude vise également à noter l'effet des fibres végétales sur le comportement rhéologiques et mécaniques du béton de sable.

Notre étude expérimentale est divisée en deux parties :

- Première partie : étude de la formulation du béton de sable, en utilisant un ciment (CPJ CEM II /42.5 A), de filler calcaire, de la fumée de silice, de superplastifiant (MEDAPLAST SP 40) et l'utilisation de cinq rapports d'eau / ciment (0,80-0,75-0,70-0,65-0,60).
- deuxième partie : étude de la formulation du béton de sable de fibres végétales, et pour étudier l'effet du type de cure sur ces fibres, on a soumis les éprouvettes à deux types de cure (air du laboratoire, eau) ; et puis l'étude de la résistance à la compression, à la traction et à la flexion de l'âge de 7,14 et 28 jours et le contrôle de retrait du béton pendant 28 jours.

Cette étude a démontré que l'utilisation des sables de dune, et l'utilisation de la fumée avec un superplastifiant ont un effet positif sur le comportement rhéologique et mécanique du béton de sable ; elle a démontré aussi que le béton de sable de fibres du palmier dattier donne des résultats meilleurs que le béton de sable de fibres d'alfa, et le béton qui a été traité dans l'air du laboratoire est mieux que le béton qui a été traité dans l'eau, cette différence dans les résultats est due à l'effet de l'eau sur la fibre végétale.

Mots clés : Béton de sable / Sable de dune / Formulation / Valorisation / Compacité / Maniabilité / Résistance mécanique / Fibres du palmier dattier / Fibres d'alfa / Retrait.

ABSTRACT

Because of the features that characterize the sand concrete in ordinary concrete, among these features is recall: the workability (ease of implementation), cohesion and the lack of segregation. Must develop the use of the concrete and improve their properties.

The main objective of our work in this thesis is to contribute effectively to optimize the formulation of sand concrete as part of the enhancement of local materials (sand dune), with the use of additions to ensure adequate protection for concrete. And to improve tensile strength, flexural strength, shrinkage and cracking of the decline, it was to formulate a sand concrete with plant fibers (fibers of date palm fibers and alfa).

This study also noted the effect of plant fibers on the rheological and mechanical behavior of sand concrete.

Our experimental study is divided into two parts:

- Part I: study of the formulation of sand concrete, using cement (CPJ CEM II/A42.5), limestone filler, silica fume, superplasticizer (MEDAPLAST SP40) and the use of five reports water/ cement (0.80-0.75-0.70-0.65-0.60) in the formation of sand concrete.
- Part II: study of the formulation of sand concrete plant fibers, and to study the effect of the type of treatment on these fibers, the specimens were subjected to two types of treatment (laboratory air, water) and then to the tensile strength, bending the age of 7.14 and 28 days control of shrinkage for 28 days.

This study demonstrated that the use of sand dune and the use of smoke with a superplasticizer have a positive effect on the rheological behavior and mechanical sand concrete and it also showed that the sand concrete fibers date palm gives better result than the sand concrete alfa fibers, and concrete that has been treated in the laboratory air more concrete that has been treated in the water, this difference in the result due to the effect of water on the plant fiber.

Keywords: concrete sand / sand dune / formulation / valuation / compact / handling / strength / date palm fibers / fibers alfa / withdrawal.

SOMMAIRE

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale	2
Historique	4

CHAPITRE II : BÉTON DE SABLE

II.1. Introduction	8
II.2. Définition.....	8
II.3. Les composants du béton de sable	8
II.3.1. Les sables	8
II.3.2. Les fines d'ajouts	9
II.3.3. Le filler calcaire	12
II.3.4. La fumée de silice	12
II.3.5. Les ciments	13
II.3.6. L'eau de gâchage	13
II.3.7. Les adjuvants	13
II.3.8. Autres ajouts.....	15
II.3.8.1. Définition	15
II.3.8.2. Les fibres	15
II.3.8.3. Les gravillons.....	15
II.3.8.4. Les colorants	16
II.4. Propriétés essentielles du béton de sable	16
II.4.1. Propriétés générales.....	16
II.4.1.1. Granulométrie et maniabilité	16
II.4.1.2. Granulométrie et résistance	18
II.4.2. Propriétés spécifiques	21
II.4.2.1. L'adhérence aux armatures	21
II.4.2.2. Durabilité des bétons de sable.....	23
II.4.2.3. Résistance au gel et au dégel	24
II.4.2.4. Phénomène de ségrégation des constituants	25
II.4.2.5. Retrait et Fluage.....	25

II.5. Domaines d'emploi des bétons de sable.....	31
II.5.1. Les bétons non vibrés.....	31
II.5.2. Les bétons projetés.....	31
II.5.3. Les travaux d'injection.....	32
II.5.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents.....	32
II.6. Intérêts et limites des bétons de sables.....	34
II.6.1. Intérêt des bétons de sable.....	34
II.6.2. Limites des bétons de sable.....	35
II.7. Les méthodes de formulation.....	36
II.7.1. Introduction.....	36
II.7.2. Approche théorique d'une formulation des bétons de sable.....	36
II.7.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable.....	37
II.7.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable.....	38
II.7.2.3. Dosage en sable.....	40
II.7.2.4. Estimation de la résistance en compression.....	40
II.7.3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable.....	44
II.7.3.1. Présentation générale de la méthode expérimentale.....	44
II.7.3.1.1. Les différentes étapes de la formulation.....	44
a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition.....	44
1. Dosage en ciment.....	44
2. Dosage en eau.....	44
b. Détermination du dosage en sable.....	45
c. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule.....	45
II.7.3.1.2. Détermination du dosage en fines d'addition.....	46
II.7.3.1.3. Evaluation de la résistance.....	47
II.7.4. Les méthodes de formulation.....	47
II.7.4.1. Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées.....	47
II.7.4.2. Étude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda.....	49
II.8. Comparaison entre le béton de sable (BS) et le béton ordinaire (BO).....	50

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : Caractérisation des matériaux utilisés « formulation des bétons de sable»

III.1. Introduction	56
III. 2. Matériaux utilisées	56
III.2.1. Sable	56
III.2.1.1. Caractéristiques physiques	56
a) L'analyse granulométrique	56
b) Propriétés physiques	57
III. 2.1. 1. a. Sable de dune.....	58
III. 2.1.1. b. Sable d'oued.....	60
III.2.1.2. Analyse chimique	61
III.2.2. Ciment	62
III.2.3. Eau de gâchage	63
III.2.4. L'adjuvant	63
III.2.5. Les ajouts	64
III.2.5. 1. Le filler calcaire.....	64
III.2.5. 2. La fumée de silice.....	65
III.3. La formulation du béton de sable	65
III.3.1. Confectionnement du béton	70
III.3.2. confection des éprouvettes et conditions de conservation	71
III.3.3. Essais réalisés	73
III.3.3.1. Essais sur béton de sable frais	73
III.3.3.1.1. Malaxage	73
III.3.3.1.2. Serrage des bétons de sable	73
III.3.3.1.3. Protection contre la dessiccation	74
III.3.3.1.4. La maniabilité	74
III.3.3.1.5. Essai de prise	74
III.3.3.1.6. Essai sur la masse volumique	75
III.3.3.2. Essais sur le béton de sable durci.....	75
a. Essais de compression	75
b. Essais de traction	76
c. Mesure de retrait	77

d. Capacité d'absorption d'eau	78
e. Calcul du Pourcentage de fines	78

CHAPITRE IV : présentation et discussion des résultats

IV.1.Introduction	80
IV.2. L'effet des différents paramètres sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton de sable	80
1^{er} étape : optimisation de la formulation du béton de sable	
IV.2.1. La maniabilité	80
1. L'effet du rapport SO/SD sur la maniabilité du béton de sable.....	80
2. L'effet du dosage de filler calcaire sur la maniabilité du béton de sable	81
3. L'effet du dosage de superplastifiant sur la maniabilité du béton de sable.....	82
4. L'effet du rapport E/C sur la maniabilité du béton de sable	83
5. L'effet de la fumée de silice sur la maniabilité du béton de sable.....	84
IV.2.2. la résistance à la compression R_C	85
1. L'effet du rapport SO/SD sur la résistance à la compression du béton de sable	85
2. L'effet du dosage de filler calcaire sur la résistance à la compression du béton de sable.....	86
3. L'effet du dosage de superplastifiant sur la résistance à la compression du béton de sable	87
4. L'effet de la diminution du rapport eau/ciment (E/C) sur la résistance à la compression du béton de sable	88
5. L'effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression du béton de sable.....	88
IV.2.3. La résistance à la traction R_t	89
1. L'effet du rapport SO/SD sur la résistance à la traction du béton de sable	89
2. L'effet du dosage de filler calcaire sur la résistance à la traction du béton de sable	90
3. L'effet du dosage de superplastifiant sur la résistance à la traction du béton de sable.....	91
4. l'effet de la diminution du rapport eau/ciment (E/C) sur la résistance à la traction du béton de sable	92
5. L'effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction du béton de sable.....	93
IV.2.4.Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations des bétons de sable.....	94
IV.2.5. Le retrait et la perte de masse des différentes formulations des bétons de sable	95
IV.2.5.1. Mesure des variations de longueur (retrait) NF P 15-433.....	95
IV.2.5.2. Mesure de variation des masses	97

IV.2.6. L'effet du pourcentage des fines sur la résistance à la compression et le retrait du béton de sable.....	99
2^{ème} étape : Formulation du béton de sable des fibres végétales dans le cadre de valorisation des matériaux locaux	
1. Généralités	101
1.1. Le rôle des fibres	101
1.2. Les caractéristiques et les propriétés des fibres	102
1.3. Les domaines d'application des bétons fibrés.....	102
2.1. Matériaux et méthodes d'essais	102
2.1.1. Présentation de la fibre	103
1 ^{er} cas : La fibre du palmier dattier	103
2 ^{ème} cas : La fibre d'Alfa	104
2.1.2. Résultats et interprétations.....	106
2.1.2.1. Résistances à la Compression Rc	107
2.1.2.2. Résistances à la Traction par Flexion	109
2.1.2.3 Effet de fibres végétales sur le retrait et la perte de masse du béton de sable.....	111
1. Mesure de variation des masses	111
2. Mesure des variations de longueur (retrait).....	112
IV.3. Conclusion.....	113
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	117
PERSPECTIVES.....	120
BIBLIOGRAPHIE.....	122
ANNEXE	128

Liste des figures

Figure1	Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire	Page 16
Figure 2	Maniabilité en fonction du module de finesse du sable	Page 17
Figure 3	Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)	Page 18
Figure 4	Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance	Page 19
Figure 5	Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance	Page 20
Figure 6	Effet de la granularité sur la résistance	Page 21
Figure 7	Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation	Page 22
Figure 8	Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures	Page 23
Figure 9	Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores	Page 24
Figure 10	Evolution du retrait dans le béton de sable	Page 28
Figure 11	Courbe idéale de fluage.	Page 29
Figure 12	Evolution du fluage du béton de sable	Page 30
Figure 13	Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable	Page 39
Figure 14	Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée.	Page 39
Figure 15	Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)	Page 41
Figure 16	Organigramme de la méthode théorique	Page 43
Figure 17	Courbe granulométrique du sable de dune	Page 59
Figure 18	Courbe granulométrique du sable d'oued	Page 60
Figure 19	Effet du rapport SO/SD sur l'affaissement	Page 81
Figure 20	Effet du dosage du FC sur l'affaissement	Page 81
Figure 21	Effet du dosage du superplastifiant sur l'affaissement	Page 83
Figure 22	Effet du rapport E/C sur l'affaissement du BS	Page 84
Figure 23	Effet du dosage de la fumée de silice sur l'affaissement	Page 85

Liste des figures

Figure 24	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du rapport SO/SD	Page 85
Figure 25	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du dosage en FC	Page 86
Figure 26	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du dosage en SP	Page 87
Figure 27	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du rapport E/C	Page 88
Figure 28	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de FS	Page 89
Figure 29	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction du rapport SO/SD	Page 90
Figure 30	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction du temps et du dosage en FC	Page 91
Figure 31	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction du temps et du dosage en SP	Page 92
Figure 32	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction du rapport E/C	Page 93
Figure 33	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction temps et du dosage du FS	Page 94
Figure 34	Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations du BS	Page 95
Figure 35	Déformation du retrait du béton de sable [F-E/C]	Page 96
Figure 36	Déformation du retrait du béton de sable [F-FS(%)]	Page 96
Figure 37	Effet du rapport E/C sur la Perte de masse du béton de sable	Page 98
Figure 38	Effet de la fumée sur la perte de masse du béton de sable	Page 98
Figure 39	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines pour la 2 ^{ème} série d'essais [F-FC]	Page 99
Figure 40	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines pour la 5 ^{ème} série d'essais [F-FS]	Page 99
Figure 41	L'évolution du retrait du BS en fonction du pourcentage de fines (Pour la 5 ^{ème} série d'essais [F-FS])	Page 101
Figure 42	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FP (conservation dans l'eau)	Page 107

Liste des figures

Figure 43	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FA (conservation dans l'eau)	Page 108
Figure 44	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FP (Conservation à l'air du laboratoire)	Page 108
Figure 45	L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FA (Conservation à l'air du laboratoire)	Page 109
Figure 46	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FP (conservation dans l'eau)	Page 110
Figure 47	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FA (conservation dans l'eau)	Page 110
Figure 48	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FP (Conservation à l'air du laboratoire)	Page 111
Figure 49	L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FA (Conservation à l'air du laboratoire)	Page 111
Figure 50	Effet du pourcentage de fibres de palmier dattier sur la perte de masse du béton de sable	Page 112
Figure 51	Effet du pourcentage de fibres d'alfa sur la perte de masse du béton de sable	Page 113
Figure 52	L'évolution du retrait du BS en fonction du pourcentage de fibres de palmier dattier	Page 113
Figure 53	l'évolution du retrait du BS en fonction du pourcentage de fibres d'alfa	Page 114

LISTE DES TABLEAU

Tableau 1	Relation entre le D_{max} et le dosage minimal en ciment	Page 10
Tableau 2	Les types d'adjuvants et leurs fonctions	Page 14
Tableau 3	Nature et qualité du sable	Page 58
Tableau 4	Analyse granulométrique du sable de dune	Page 58
Tableau 5	Propriétés physiques du sable de dune	Page 59
Tableau 6	Analyse granulométrique du sable d'oued	Page 60
Tableau 7	Propriétés physiques du sable d'oued	Page 61
Tableau 8	Analyse chimique : SD	Page 61
Tableau 9	Analyse chimique : SO	Page 62
Tableau 10	Contrôle de qualité de ciment vendu Février 2010	Page 63
Tableau 11	Analyse chimique des fillers	Page 64
Tableau 12	Caractéristiques physiques du filler calcaire	Page 65
Tableau 13	Caractéristiques physiques de fumée de silice	Page 65
Tableau 14	1 ^{ère} série d'essais de la formulation du BS	Page 67
Tableau 15	2 ^{ème} série d'essais de la formulation du BS	Page 67
Tableau 16	3 ^{ème} série d'essais de la formulation du BS	Page 68
Tableau 17	4 ^{ème} série d'essais de la formulation du BS	Page 68
Tableau 18	5 ^{ème} série d'essais de la formulation du BS	Page 69
Tableau 19	6 ^{ème} série d'essais de la formulation du BS	Page 69
Tableau 20	7 ^{ème} série d'essais de la formulation du BS	Page 70
Tableau 21	Compositions chimiques du végétal	Page 105
Tableau 22	Analyse minéralogique de fibres d'alfa	Page 106
Tableau 23	Composition optimale du béton de sable	Page 116
Tableau 24	les résultats du béton de sable de fibres végétales	Page 116

LISTE DES PHOTOS

Photo 1	Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré .Coignet (Egypte)	Page 4
Photo 2	Fines sphériques et fines anguleuses	Page 11
Photo 3	Eprouvettes non vibrées, non piquées	Page 25
Photo 4	Le béton de sable en projection (Projection sur surface ancienne - Vue de détail avec nouveau ferrailage)	Page 31
Photo 5	Tunnel d'accès au métro de Leningrad	Page 32
Photo 6	Réalisation d'une piscine	Page 32
Photo 7	Le béton de sable dans la Préfabrication	Page 33
Photo 8	Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface	Page 33
Photo 9	Déroulement d'un film polyane (cure)	Page 34
Photo 10	Les éprouvettes du BS après le démoulage	Page 72
Photo 11	Cure du béton de sable	Page 72
Photo 12	Essai de compression	Page 75
Photo 13	Essai de traction par flexion	Page 76
Photo 14	Préparation les éprouvettes pour mesure le retrait du BS	Page 77
Photo 15	Appareille pour la mesure du retrait	Page 77
Photo 16	Effet du dosage de superplastifiant	Page 82
Photo 17	Effet d'ajout du superplastifiant sur la dispersion des grains de ciment (amélioration du rendement cimentaire)	Page 83
Photo 18	Effet de rapport E/C	Page 84
Photo 19	Observation de la texture de la fibre du palmier par MEB	Page104
Photo 20	Coupe transversale de la fibre du Palmier sous MEB	Page104
Photo 21	Coupe longitudinale de la fibre dans la fibre du palmier par MEB.	Page104
Photo 22	Observation des pores du palmier sous MEB.	Page104

LISTE DES PHOTOS

Photo 23	Observation d'une vue tangentielle de la fibre du palmier par MEB	Page 104
Photo 24	Pâte cellulosique d'alfa après macération et défibrage	Page 106
Photo 25	Les fibres du palmier dattier	Page 107

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

CPJ-CEM II/A42.5 : Ciment Portland Composé

BS : Béton de sable

BO : Béton ordinaire

E/C : Rapport massique de l'eau sur ciment

G/S : Rapport massique de gravillon sur sable

SO/SD : Rapport volumique de sable d'oued sur sable de dune

C : Masse de ciment

E : Masse d'eau

FC : Filler Calcaire

SP : Superplastifiant

FS : Fumée de Silice

SO : Sable d'Oued

SD : Sable de Dune

FP : Fibre du palmier dattier

FA : Fibre d'alfa

ENPA : École Nationale Polytechnique (en Algérie)

CNERIB : Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment(en Algérie)

CEBTP : Centre Expérimentale de Recherches et d'Études

chapitre I

introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis de très nombreuses années et dans la plupart des pays, qu'ils soient industriels ou en voie de développement, de nombreuses actions tendant à une meilleure utilisation des matériaux locaux ont été entreprises. Dans ce cadre et dans un contexte d'épuisement progressif des gros granulats dans certaines régions, du coût élevé du transport et de l'abondance des sables, il était aisé d'entrevoir, dès l'origine, l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables locaux, peu ou pas exploités, pour la réalisation de béton dont les sables seraient le constituant principal. Il s'agit donc du béton de sable, qui a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 publiée en octobre 1987 par AFNOR [1]. Notons que parfois, les propriétés spécifiques de ce matériau lui permettent de remplacer le béton ordinaire et même de résoudre certains problèmes mal assurés par ce dernier.

Le béton de sable a fait l'objet de plusieurs études dont la plupart sont de nature technologique, ce qui est peut être normal vu sa jeunesse. En effet ces études ont donné la plus grande importance à la recherche d'une formulation adéquate aux différents usages de ce matériau et l'amélioration de ses performances mécaniques.

Aujourd'hui, avec la crise financière que traverse l'Algérie, le déficit en logements et la pénurie des gros granulats dans certaines régions, il est devenu impératif de construire au moindre coût en valorisant les matériaux locaux. C'est dans ce cadre que dans les années 80, l'ENPA et le CNERIB ont lancé des projets de recherche sur le béton de sable. Au début, ces recherches avaient comme but la détermination d'une composition optimale, puis elles se sont intéressées à la recherche d'une amélioration de la résistance grâce à l'utilisation des fillers et des adjuvants. Par la suite des études de retrait, de fluage et d'adhérence aux armatures ont été effectuées. Plusieurs résultats ont été obtenus, mais ces derniers restent toujours insuffisants et non généralisés. Le présent travail est une suite à ces travaux. Il s'inscrit donc dans un objectif général de valorisation des sables locaux qui sont disponibles en grandes quantités dans notre pays et de leur utilisation dans les constructions locales pour amortir la demande très élevée en gros granulats. Pour ceci, deux sables locaux, de provenances et de granulométries différentes, ont été envisagés : un sable de dune, un sable d'oued et un mélange de ces deux sables. En ce qui concerne les fillers et le liant, des fines calcaires ont été utilisées comme filler et un ciment CPJ-CEM II /42.5A comme liant.

Ce travail comporte deux parties principales :

- Une première partie consacrée à des généralités sur les constituants du béton de sable et à une synthèse bibliographique comportant l'étude de la formulation, l'étude du comportement mécanique.

La première partie se compose de deux chapitres :

Le chapitre I : présente une introduction générale (avantages et inconvénients de béton de sable, historique...etc.)

Le chapitre II : est consacré à la synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable (définitions, constituants, méthodes de formulations, caractéristiques, utilisations...etc.) et la comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire ;

- Une deuxième partie dans laquelle nous avons essayé de caractériser expérimentalement les matériaux utilisés (sables, ciment et filler) et d'étudier la formulation du béton de sable.

La deuxième partie se compose de deux chapitres :

Le chapitre III : présente l'identification des matériaux utilisés.

Le chapitre IV : présentation et discussion des résultats.

Historique

Le béton de sable est un matériau ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines au milieu du 19^{ème} siècle, c'est à dire au début du développement du ciment armé.

En 1853 l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré. Il s'agissait, en effet d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité [1]

Il construit pour sa famille une vaste maison à saint Denis (Nord de Paris France) entièrement édifié en béton aggloméré.

En 1869, le phare de Port-Saïd en Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France. (photo.1)

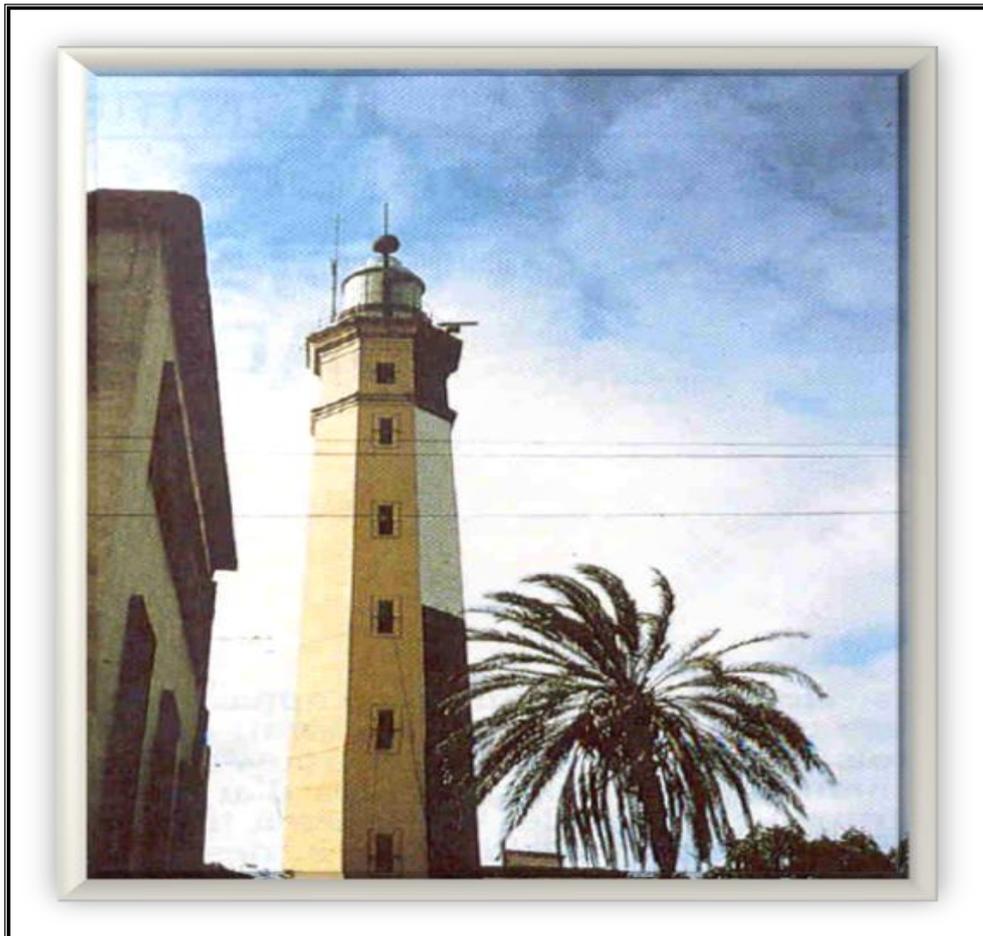


Photo .1 : Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré
Coignet (Egypte) [1]

Historique

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleau à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleau et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m^3 ; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers.

François COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA et c'est à New York que son entreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs de béton aggloméré.

En 1918 on note l'expérience très originale qui fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint -Peters Bourg (Russie). Cette expérience consistait à broyer ensemble une part de sable avec une autre part égale en ciment. Ce produit de broyage était ensuite mélangé avec trois parts de sable. Les résistances obtenues par le mélange furent les mêmes que celles d'un mélange composé d'une part de ciment et 2 parts de sable.

A partir de l'année 1910, avec le développement du béton à gros granulats et le remplacement de la chaux par le ciment, le béton aggloméré, ancêtre du béton de sable tombait en désuétude, sauf l'union soviétique qui ne cessa de réaliser diverses constructions avec des bétons composés essentiellement de sable et d'un ou deux liants.

Dans les années soixante dix, notamment en France, on constatait que les sables provenant de concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles. Dans ce contexte s'ouvre la réflexion sur la formulation des nouveaux bétons de sable qui utiliseraient les ressources peu exploitées, ou complètement abandonnées et présenteraient des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

A partir des années quatre- vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRET [1], pour la promotion et le développement de ce matériau.

Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant

Historique

d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en oeuvre.

Dans les dernières décennies, et vu l'insuffisance des résultats de son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau comme par exemple :

- CNERIB et ENPA en Algérie,
- CEBTP et LRPC en France,
- Des laboratoires en URSS.

Au début, les recherches se limitèrent à un béton de sable ordinaire sans aucune correction granulaire et sans adjuvants, puis elles s'étendent à la recherche d'une meilleure correction granulaire du sable dans sa partie fine par l'utilisation de filler (généralement calcaire) et à l'utilisation des adjuvants (plastifiant, réducteur d'eau). Plusieurs compositions de base ont été données, mais pour des matériaux bien déterminés. D'autres études ont essayé d'approfondir le sujet (retrait, fluage, adhérence aux armatures) mais les résultats obtenus restent toujours insuffisants.

chapitre II

béton de sable

II.1. Introduction :

Le béton de sable est un matériau de construction connu bien avant le béton traditionnel d'aujourd'hui ; Dans un contexte d'épuisement progressif des gros granulats dans certaines régions, du coût élevé du transport et l'abondance des sables, il était aisé d'entrevoir l'intérêt tant économique qu'écologique que pouvait présenter le béton de sable. Ce matériau commence à retenir l'attention des chercheurs. Il est constitué essentiellement de sable. Celui-ci, disponible en quantité quasi-infinie en Algérie, pourrait constituer un matériau de substitution pour les granulats du béton classique.

II.2. Définition :

Le béton de sable, défini par la norme NF P 18-500, se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable (s), l'absence ou le faible dosage en gravillons (rapport pondéral Gravillons/sable inférieur à 0,7). Il se distingue des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par sa destination : comme matériau de construction à l'instar du béton traditionnel.

II.3. Les composants du béton de sable :

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau, par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants. [1]

II.3.1. Les sables :

Par sables on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301*. Il s'agit soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulaire n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut utiliser aussi bien un sable fin même (homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou de type (0/D) de concassage [1]. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. Même si des études ont été faites sur les sables- pollués, aucune application n'a été réalisée avec ces sables. Les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau de gâchage, ce qui entraîne une chute de la résistance. Mais il est plus prudent à ce stade de se limiter à l'utilisation des sables propres tels qu'ils sont employés pour les bétons classiques.

Classification 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.

II.3.2. Les fines d'ajouts :

La compacité est l'une des qualités essentielles du béton, elle est en relation directe avec les principales caractéristiques du béton, comme la résistance en compression, en traction, le module de Young, le fluage... etc.

Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont :

- ✓ La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- ✓ L'énergie de mise en place.

La différence entre le béton classique et le béton de sable réside principalement dans la granulométrie différente.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes.

Dans le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 20 mm) ; ils créent des macrovides que l'on peut remplir par des sables et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre le besoin en fines et le dosage en ciment est interprétée par la règle suivante: [1]

$$C=550/\sqrt[5]{D} \quad \text{ou} \quad C=700/\sqrt[5]{D} \quad (\text{selon l'usage du béton})$$

Où C : dosage du ciment

D : diamètre de plus grand granulât

Le tableau 1 : donne le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre maximal (D_{\max}) du granulât employé [1].

Dans la conception de la composition du mélange, la quantité du fillers est considérée comme un liant au même titre que le ciment et donc on peut ainsi parler non plus du rapport (E/C) (eau/ciment), mais plutôt $E/(C+kF)$ où C représente le dosage en ciment et F le dosage en fillers ; k représente le coefficient prenant en compte la nature du filler.

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$C=550/\sqrt[5]{D}$	$C=700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	1,904	290	370	BETON
0/20	1,821	300	385	
0/16	1,741	315	400	
0/8	1,516	360	460	
0/6,3	1,445	380	480	
0/4	1,320	415	530	MORTIER
0/2	1,149	480	610	
0/1	1,000	550	700	

Tableau 1 : Relation entre le D_{\max} et le dosage minimal en ciment

La nature géologique la forme des grains des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable. Ainsi, des Fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins

d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci. (Figure 1 et 2).

On distingue les fines actives (laitiers moulus et cendres volantes, pouzzolane broyée...) et les fines inertes (fillers calcaires ou de broyage de roches massives...). [1]



Photo 2 : Fines sphériques et fines anguleuses [1]

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 200 kg/m³ et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influencer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente.
- Pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

Nous citerons deux types de fines (fillers) que nous allons utiliser dans notre étude : les fillers calcaires (fines inertes) et la fumée de silice (fines actives).

Les normes françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, cendres volantes...) naturelles ou non.

Ce mot filler provient de l'anglais « **to fill** » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2 mm.

L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse [12], [33]. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

II.3.3. filler calcaire :

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables.

L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable, les filler peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton.

II.3.4. fumée de silice :

Les fumées de silice sont des résidés évacuées de la chambre de combustion d'un four destiné à produire de silicium ou des alliages contenant du silicium. La fumée de silice se présente sous forme de microsphères de silice amorphe d'un diamètre moyen de l'ordre de 0.1 μm , leur surface spécifique est de l'ordre de 20 et 25 m^2/g , lorsque les microsphères sont bien dispersées, elles vont s'empiler dans l'espace industriel resté vide entre les grains de ciment qui possèdent un diamètre moyen environ 100 fois plus élevé. Ces fines particules améliorent les propriétés rhéologiques du mélange (fluidité, diminution de la ségrégation et du ressuage). Leur grande finesse et leur structure vitreuse en font un produit très réactif. Elles permettent aussi d'obtenir une pâte plus dense car le squelette granulaire est plus compact. [26]

La grande finesse et surface spécifique des fumées de silice tendant à augmenter la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la même maniabilité qu'un béton sans fumée de silice. Cependant, en présence d'une superplastifiante et utilisée en petite quantité pour des bétons ayant un faible E/C, les fumées de silice peuvent augmenter quelque peu la quantité d'eau libre dans le mélange de béton et accroître sensiblement la maniabilité. De plus, les fumées de silice augmentent la cohésivité du béton et diminuent donc le ressuage et la ségrégation.

L'utilisation de fumées de silice à des dosages de 5 à 10 %, par rapport à la masse de ciment, permet au béton d'atteindre des résistances mécaniques élevées, et permet aussi d'avoir

des bétons plus denses et plus imperméables, donc plus durables. Cependant, étant donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectuée.

II.3.5. Les ciments :

Le choix du ciment pour confectionner un béton de sable est conforme à la norme NF P15-301, le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieuetc. d'une façon générale, de la composition du béton et de l'usage auquel il est destiné.

Pour bien exploiter l'activité hydraulique des fines d'additions au mélange du béton de sable, les ciments type CPA (ciment portland) sont préférables. [1]

II.3.6. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P15-303
L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions d'adjuvants et autres ajouts et surtout par les sables.

II.3.7. Les adjuvants :

Les adjuvants sont les produits qui sont incorporés en très faible quantités aux bétons (dose inférieure à 5% du poids de ciment) avant ou pendant le malaxage, dans le but d'améliorer certaines propriétés, soit à l'état frais, ou pendant la prise et le durcissement, soit à l'état durci. On définit le superplastifiant d'après son action principale, même s'il a plusieurs actions secondaires. [28]

Il y a une gamme très importante d'adjuvants sur le marché qui se différencient par leurs fonctions et par suite par leur domaine d'application, ils sont présentés dans le tableau II.2.

Type d'adjuvant	Fonction
Plastifiant réducteur d'eau	Permet soit une amélioration de la maniabilité, sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C, donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. On peut également jouer sur les deux paramètres pour augmenter la résistance mécanique tout en améliorant la maniabilité.
Superplastifiant Hautement réducteur d'eau (fluidifiants)	Leurs actions sont plus importantes sur les bétons que celles des plastifiants réducteurs d'eau. Ils permettent, à teneur égale en eau, d'augmenter considérablement l'ouvrabilité des bétons.
Accélérateur de prise	Accélère la prise du béton.
Accélérateur de durcissement	Le développement des résistances initiales des bétons.
Retardateur de prise	Retarde la prise du béton.
Antigel	Abaisse notablement le point de congélation de l'eau des bétons.
Entraîneur d'air	Augmente la résistance au gel des bétons durcis.
Hydrofuge	Réduit la perméabilité et par suite la capacité d'absorption par capillarité des bétons durcis.
Les adjuvants anti-retraits	Réduisent la tension superficielle de l'eau pour contrer le mécanisme de son départ des pores qui provoque le retrait du béton.
Les inhibiteurs de corrosion	Parviennent à maintenir la couche protectrice passivante à la surface des aciers de renfort ce qui les protège de la corrosion.
Les agents de cohésion	Facilitent le pompage des bétons, réduisent la ségrégation des bétons désactivés, et les risques de délavage du béton coulé sous l'eau.
Les additifs pour béton léger	Produisent une mousse abondante qui fait abaisser la densité du béton.
Les produits de cure	Ils sont pulvérisés à leur surface pour former un film protecteur continu qui va limiter le risque de fissuration par retrait d'eau rapide (bétonnage par temps chaud).

Tableau 2 : les types d'adjuvants et leurs fonctions [28]

II.3.8 Autres ajouts :**II.3.8.1. Définition :**

Les ajouts pour béton sont des matériaux, présentant une granulométrie très fine, que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelque fois également au béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques.

Les ajouts sont souvent meilleur marché que le ciment portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

II.3.8.2. Les fibres :

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout.

On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène.) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte pour limiter les effets de retrait.

Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe.

[1]

II.3.8.3. Les gravillons :

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable, et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même, l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique.

En pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massive G/S (gravillon/sable) reste inférieur à 0,7. [1]

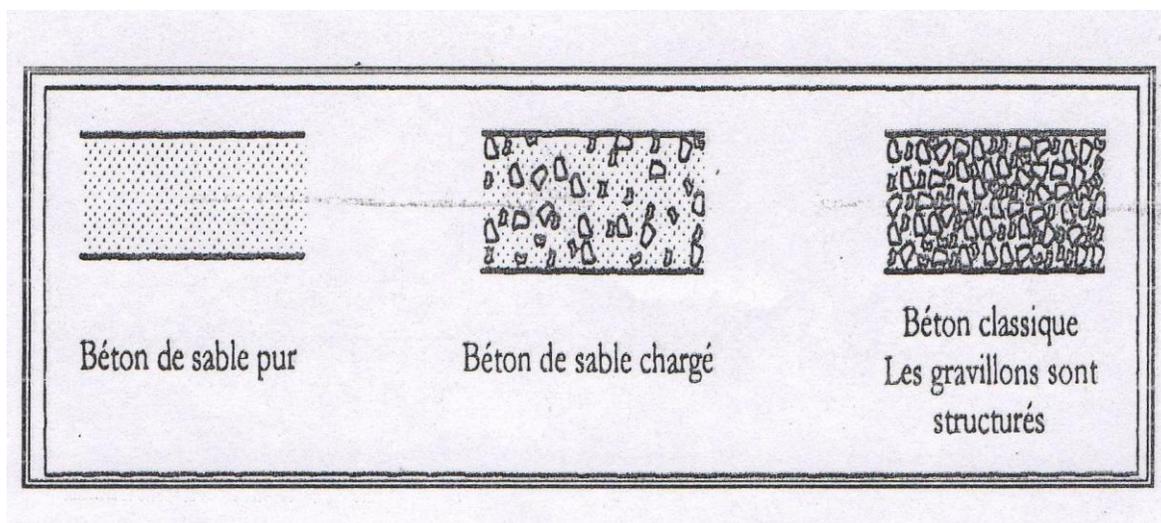


Figure 1 : Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire [1]

II.3.8.4. Les colorants :

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants utilisés dans le béton classiques peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps, pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas.

II.4. Propriétés essentielles du béton de sable :

II.4.1. Propriétés générales :

II.4.1.1. Granulométrie et maniabilité : [1]

Le béton de sable nécessite plus d'eau de gâchage que les bétons traditionnels ; ceci se traduit par des valeurs E/C (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5 ; ce rapport se situe entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange ; d'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport $E/C+A$ (A =addition en fines activées), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels.

La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau ; plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité. (Figure 2)



Figure 2 : Maniabilité en fonction du module de finesse du sable [1]

La (figure 2) montre l'effet des éléments grossiers sur la maniabilité du béton. Cinq sables ont été utilisés, chacun à des teneurs en fines variables entre 0 et 10 %.

D'un sable à un autre présenté sur la (figure 2) on a pu constater que l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de la maniabilité. On remarque ainsi que pour chaque sable l'augmentation de la teneur en fines diminue implicitement le module de finesse et entraîne de ce fait une maniabilité moins bonne. Ce phénomène n'a pas un caractère systématique, il dépend de la nature des fines incorporées puisque l'ajout des fines de type sphérique diminue la quantité des vides et rend l'eau plus efficace et donc améliore la maniabilité.

On constate ainsi que la relation entre le dosage en fines et la maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. Les graphiques de la (figure 3) montrent l'effet différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune.

Pour le sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m^3 entraîne une chute de maniabilité, ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact).

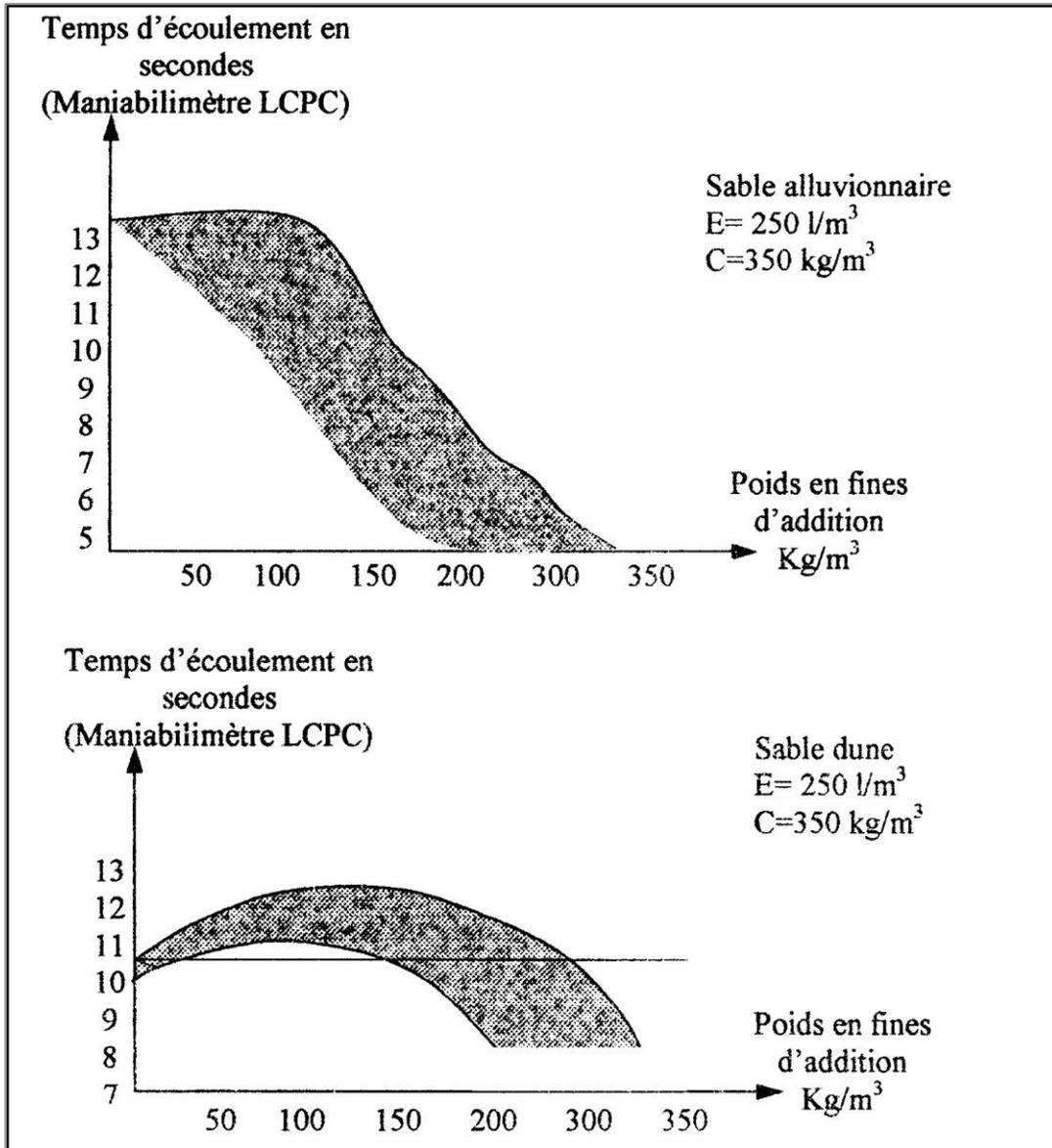


Figure 3: Influence de la nature du sable sur la maniabilité
(avec fines d'addition calcaire) [1]

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore, comme le traduit la figure (2) qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité.

II.4.1.2. Granulométrie et résistance :

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres et en particulier :

- **La finesse de l'addition :**

Plus l'addition est fine plus la compacité est importante (gain en résistance) ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie de sable (sable alluvionnaire, sable de dune...etc.)

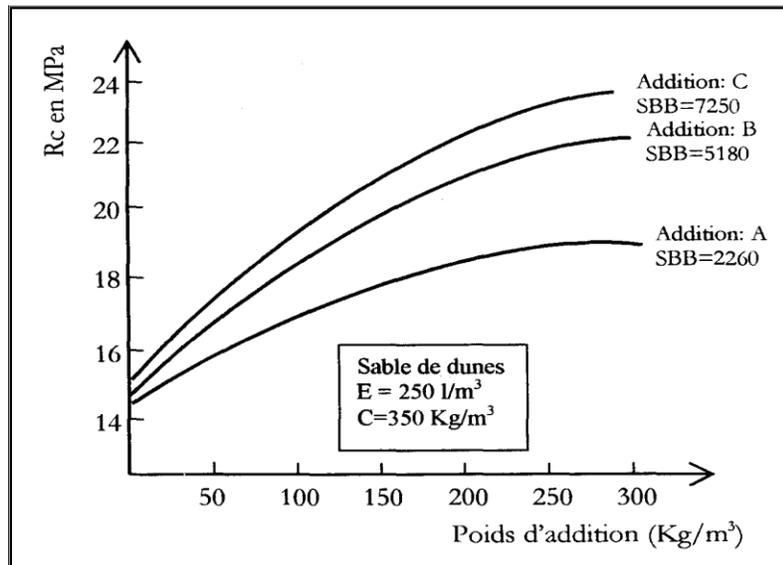


Figure 4 : effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [1]

- **La nature de l'addition :**

A même dosage selon la figure 5, on peut constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable. (Figure 5)

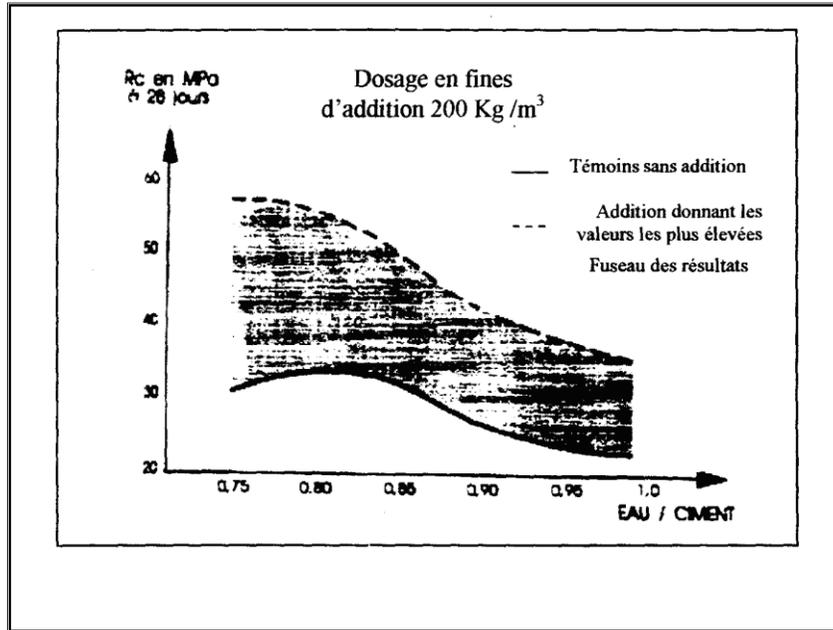


Figure 5: influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [1]

- **La dimension du D_{max} :**

La figure (6) montre l'effet de la granulométrie sur la résistance :

- Pour des rapports E/C (eau/ciment) constants, on constate que l'effet du diamètre du plus gros granulat D_{max} est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sables [1].

Cependant on constate que la maniabilité est très différente selon le type de sable. A titre d'exemple pour un D_{max} égal à 20 mm, le béton de sable est très maniable, ce qui n'est pas le cas pour un diamètre D_{max} égal à 1,6 mm. Ce dernier cas nécessite une quantité d'eau supplémentaire, et par conséquent une chute de résistance plus ou moins importante.

- L'effet de la granulométrie sur la résistance apparaît plus clairement à des dosages en ciment constants.

- Chaque fois que le diamètre maximal D_{max} diminue, il faut plus d'eau pour garder la même maniabilité ce qui fait chuter implicitement la résistance. Dans le cas du béton de sable ($D_{max} < 5\text{mm}$), et pour minimiser la chute de résistance, on prévoit l'utilisation d'un adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

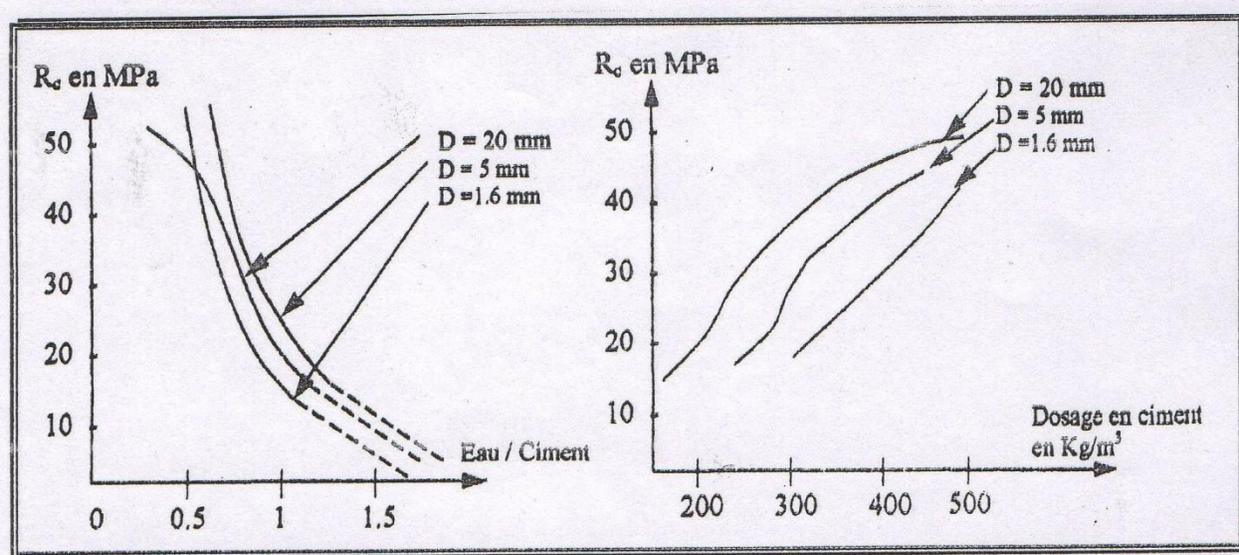


Figure 6 : Effet de la granularité sur la résistance. [1]

II.4. 2. Propriétés spécifiques :

II.4. 2.1.L'adhérence aux armatures :

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance), on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bons que le béton de référence. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable et un béton témoin traditionnel à l'aide de l'essai pullout. Il s'agit de mesurer le déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci, en fonction de l'effort de traction qui lui est appliqué.

Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de compositions appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques. (Figure 7)

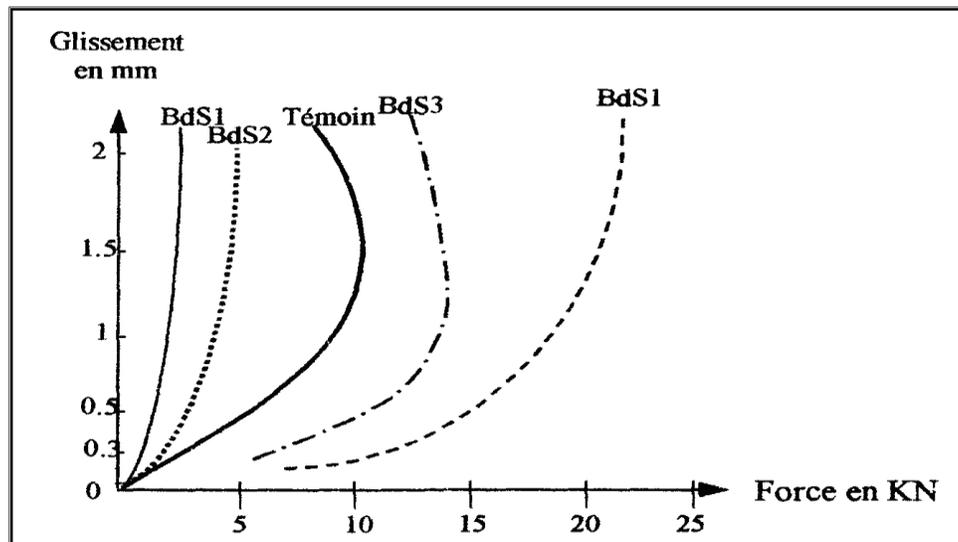


Figure 7 : Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation [1]

Dans le cas des petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondant au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la résistance en traction du béton de sable est élevée. (Figure 8)

Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels (contrainte ultime varie de 30 à 60 bars), alors qu'on peut dire que l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de structure.

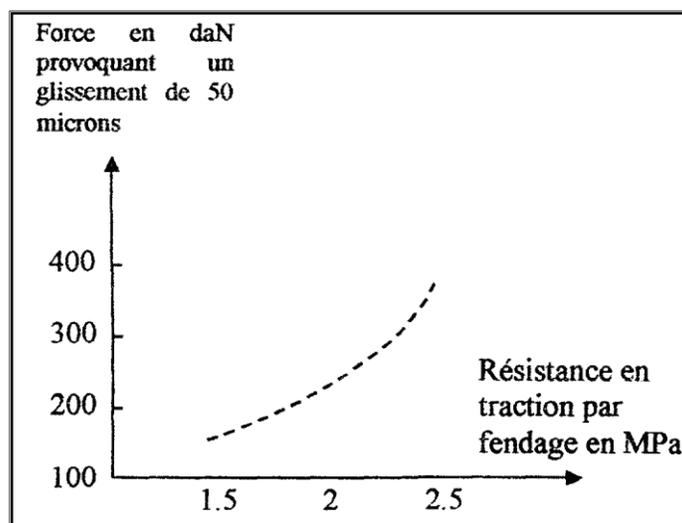


Figure 8 : Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures [1]

II.4. 2. 2. Durabilité des bétons de sable :

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcalisation ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur.

La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, régions montagneuses, milieu marin, ambiances agressives...etc.)

- ✓ Perméabilité à l'air et à l'eau ;
- ✓ gel-dégel ;
- ✓ Carbonatation ;
- ✓ Pénétration des ions de chlorure.

Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques exogènes ou internes, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.



Figure 9 : Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores [1]

La perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques. Ces résultats entrent dans le cadre du projet **SABLOCRETE** qui contribue à l'étude du comportement des bétons de sable vis-à-vis de la durabilité. Ils ne sont pas généralisés à toutes les formulations de béton de sable mais plutôt à des bétons de sable correctement formulés. C'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment. Dans ces conditions le comportement est très satisfaisant et même excellent. [1]

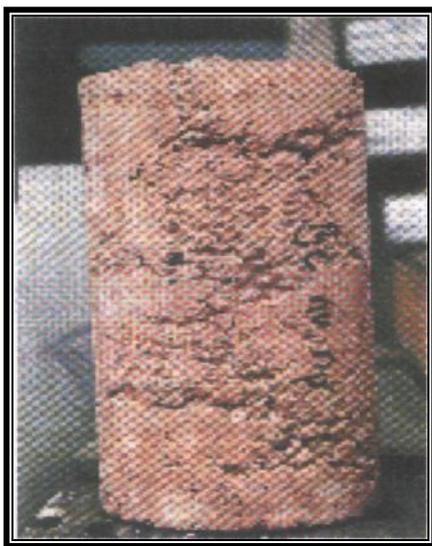
II.4.2.3 Résistance au gel et au dégel :

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalente aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores.

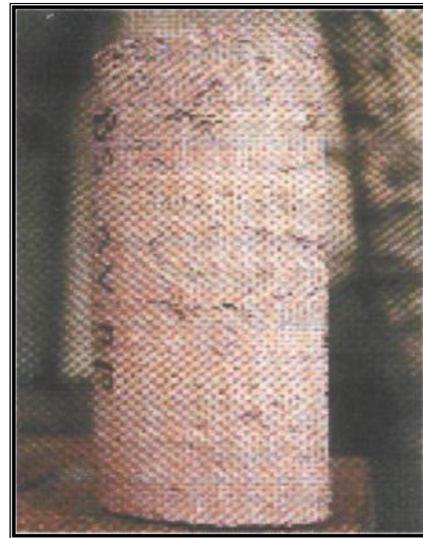
II.4. 2.4. Phénomène de ségrégation des constituants :

Du fait de leur faible étendue granulaire, et donc de leur plus grande homogénéité, combinée à une bonne maniabilité, cela confèrent aux bétons de sable un meilleur comportement vis à vis des phénomènes de ségrégation que les bétons traditionnels.

Cette faculté apparaît plus clairement à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en œuvre variables. Les deux figures qui suivent montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées, sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastiques équivalentes (cône de 14 cm).



a) Béton traditionnel.



b) béton de sable.

Photo 3 : Eprouvettes non vibrées, non piquées [1]

II.4. 2. 5. Retrait et Fluage :

II.4.2.5.1. Le retrait :

1. Rappel sur les mécanismes de retrait : Les mortiers et les bétons subissent des variations importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varie.

Immédiatement après le gâchage, a lieu une première réduction de volume irréversible. Après le durcissement de mélange et son exposition à l'air commence une nouvelle réduction de volume qui est partiellement réversible à la réhumidification.

La première réduction de volume due au séchage irréversible s'appelle contraction plastique et la réduction de volume due au séchage réversible s'appelle retrait. La contraction plastique est provoquée

par l'hydratation des composants minéralogiques du ciment, tandis que le retrait est dû surtout à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores.

On distingue les retraits suivants :

- le retrait d'hydratation ;
- le retrait d'évaporation avant prise ;
- le retrait hydraulique après prise ;
- le retrait thermique.

Pendant la période de prise, l'eau n'est pas encore liée aux constituants des ciments ; elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement. L'évaporation se traduit par un tassement de béton donnant ainsi le retrait d'évaporation, qui, s'il est contrarié, provoque de profondes fissures, visibles au démoulage.

Le retrait après prise est beaucoup plus lent à se manifester que le retrait avant prise. Il est dû à la perte d'une partie de l'eau de gâchage ; si le béton est conservé dans une atmosphère à faible humidité relative.

Le phénomène du retrait hydraulique a été beaucoup étudié, parce qu'il est en liaison avec la tendance à la fissuration des liants durcis qui représentent le premier signe de leur dégradation.

Les facteurs qui influent sur ce retrait sont nombreux :

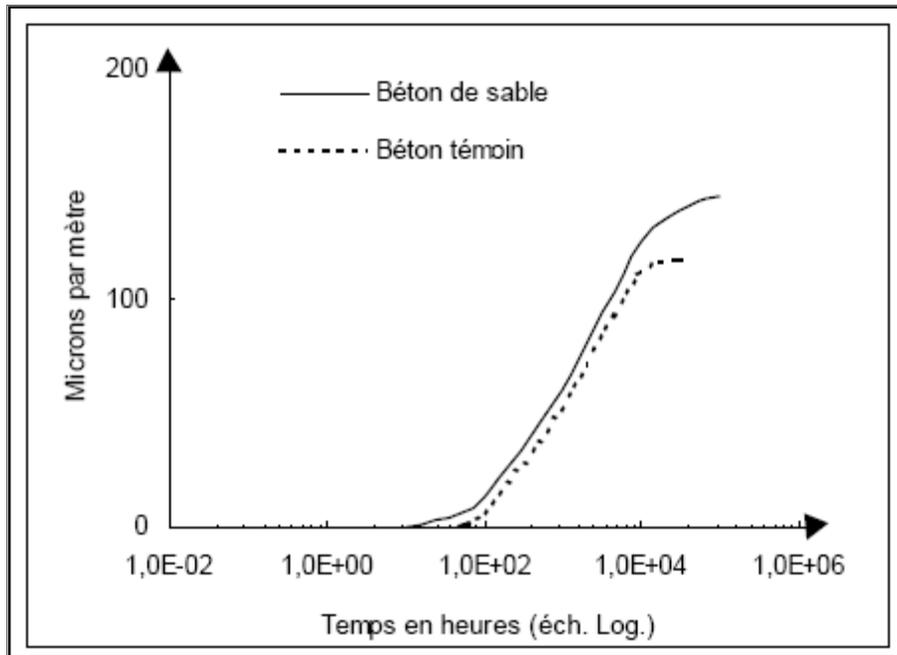
- le retrait varie avec l'humidité relative et la température du milieu environnant. Il est d'autant plus important, que l'humidité de l'air est plus faible et la température plus élevée.
- Le retrait est d'autant plus grand que l'hydratation du ciment est plus accentuée. Les ciments finement broyés présentent un retrait plus grand que ceux qui ont été broyés grossièrement.
- La composition minéralogique du ciment influe sur le retrait, surtout si le ciment est riche en aluminat tricalcique.
- Le retrait dépend aussi des adjonctions minérales pulvérulentes ainsi que de la fraction fine de granulats.
- La forme des ouvrages et les armatures ont leur effet sur le retrait. Dans le cas des barrages, des murs épais, le retrait est négligeable ; par contre il peut être appréciable dans le cas des planchers, des dalles des enduits.

Le retrait thermique est dû à des baisses de température provenant soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges suivie de son refroidissement, soit des variations climatiques du milieu.

2. le retrait du béton de sable :

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons, en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondant globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48 (fig. 10). En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage) [22, 31, 32]. Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire.

Retrait d'auto-dessiccation



Retrait total

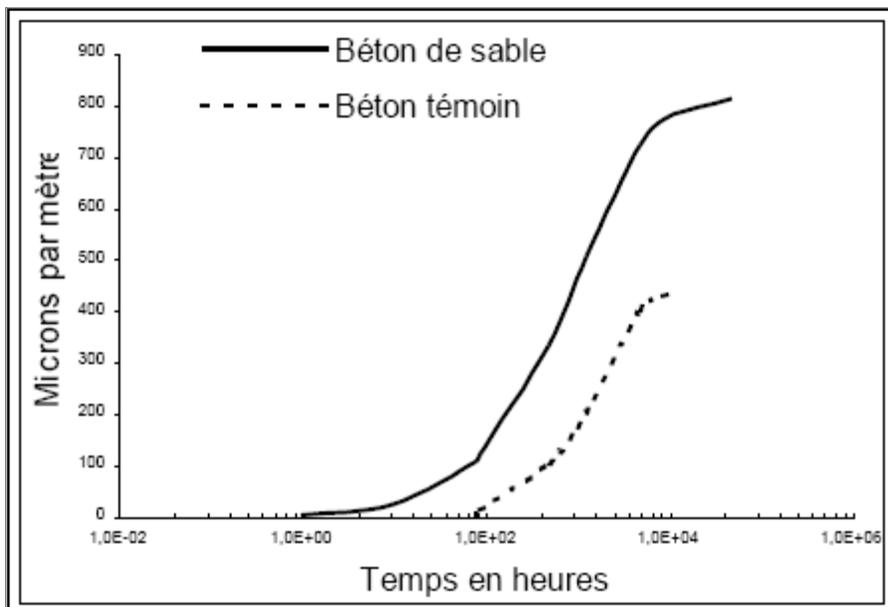


Fig. 10 : Evolution du retrait dans le béton de sable [1]

II.4.2.5.2 Fluage :

1. Rappel sur les mécanismes de fluage :

Le fluage est un phénomène de déformation différée sous une charge fixe indéfiniment appliquée. Le phénomène peut être constaté avec la même intensité, en traction, en compression, en torsion...etc., il est étroitement lié à la structure du matériau que confirment par ailleurs les valeurs du module d'élasticité.

Le déchargement des matériaux provoque une diminution instantanée des déformations très proches, en valeurs absolues, de celle d'une éprouvette témoin chargée à cet âge, suivie d'une diminution différée, appelée recouvrance, nettement inférieure au fluage correspondant, et se stabilise au cours de quelques semaines.

Le fluage dépend d'un certain nombre de paramètres en particulier :

- ◆ La charge appliquée : sous des charges modérées, on peut considérer qu'il est proportionnel à la charge appliquée, alors que si cette charge dépasse 50% de la charge à la rupture, le fluage croît plus vite que la contrainte.
- ◆ Nature du béton: dans le cas d'un béton léger, dont les granulats poreux constituent une réserve d'eau, leur fluage est en générale inférieur à celui d'un béton ordinaire de même résistance.

2. Description de la loi de fluage :

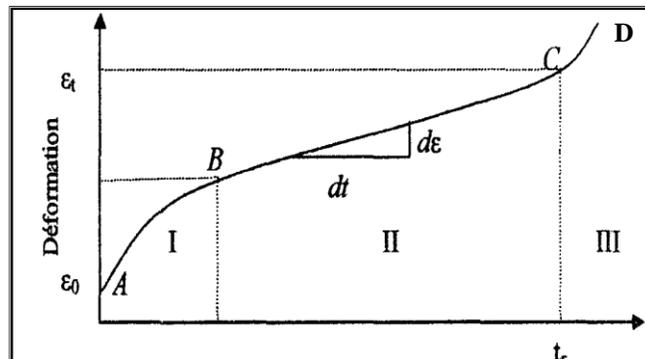


Figure11 : courbe idéale de fluage

Sur cette courbe on distingue :

- ◆ Une déformation élastique instantanée qui apparaît lors de l'application de la charge, celle-ci dépendant du module de Young.
- ◆ Le fluage primaire (AB) est une réponse viscoélastique, cette première phase du fluage démarre dès que l'échantillon se déforme élastiquement. Elle est caractérisée par une croissance de la vitesse de déformation, ainsi que par un phénomène d'écrouissage ou de durcissement.

Il faut signaler toute fois que ces résultats comparatifs sont obtenus à un niveau de résistance en compression de 25MPa , et qu'en matière de fluage notamment, un béton de sable plus résistant, n'a pas le même comportement: fluage plus faible voisin de celui d'un béton classique. Des études confirment cette hypothèse, puisqu'en passant de 25 à 50 MPa, on divise le fluage par 5: Au même niveau de résistance (exemple 50 MPa), le fluage du béton de sable n'est pas supérieur à celui d'un béton classique, de même niveau de résistance, que de 20 %. [1]

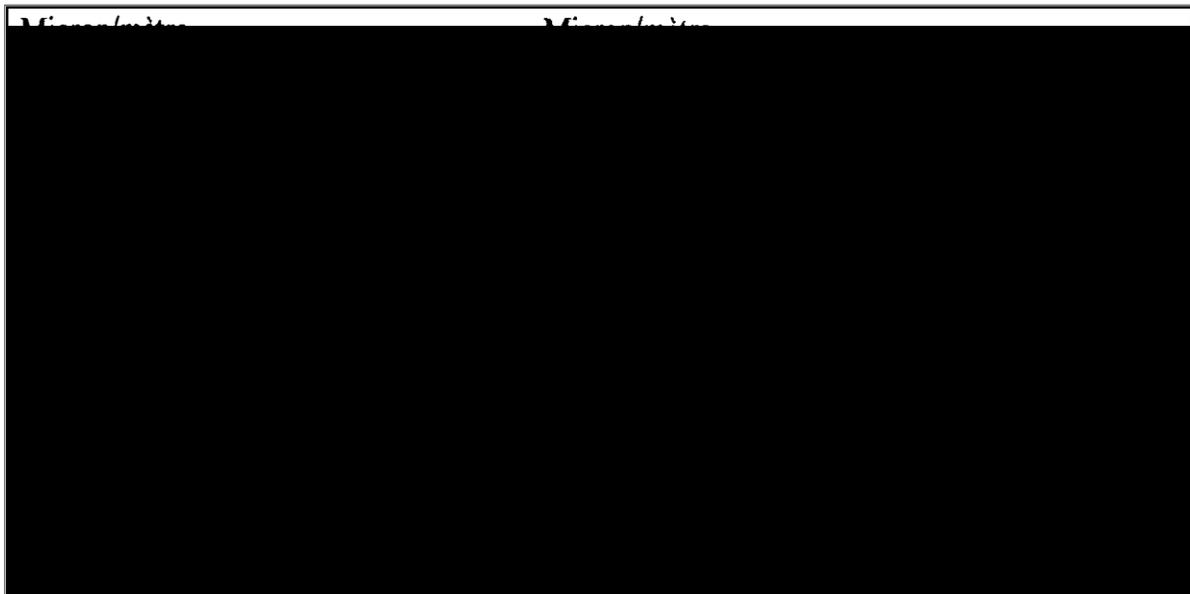


Figure 12 : Evolution du fluage du béton de sable [1]

II.5. Domaines d'emploi des bétons de sable :

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci.

II.5.1. Les bétons non vibrés :

Ces bétons sont souvent des bétons fluides utilisés notamment, lorsque la vibration est impossible, pour la fabrication des pieux forés et la réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.

II.5.2. Les bétons projetés :

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement et se prêtent au renforcement de structure par projection, exemple :

- La réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- La stabilisation de parois ou talus.

En général, le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments (Photo 4, 5 et 6).



Photo 4 : Le béton de sable en projection (Projection sur surface ancienne. Vue de détail (avec nouveau ferrailage) [5]



Photo 5 : Tunnel d'accès au métro de Leningrad [5]

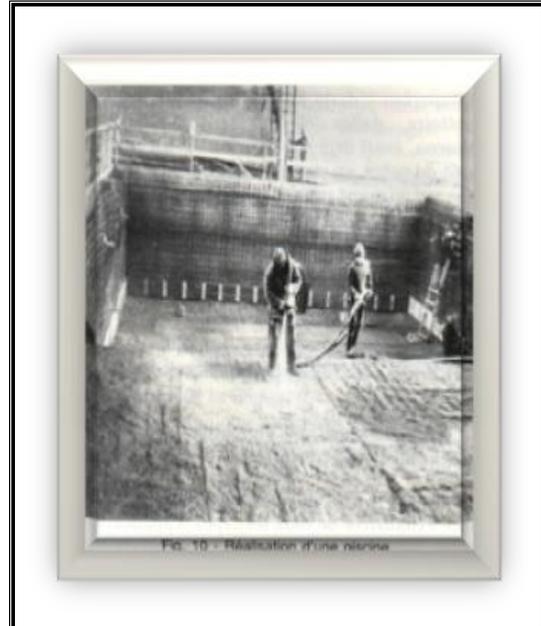


Photo 6 : Réalisation d'une piscine [5]

II.5.3. Les travaux d'injection :

A cause de sa petite granularité et sa maniabilité, le béton de sable est favorable aux techniques de reprise en sous-œuvre par injection ou coulage gravitaire :

- le comblement de cavités.
- la réparation de fondation et renforcement d'ouvrages portuaires.

II.5.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents :

Le souci esthétique est de plus en plus pris en compte dans toutes les constructions; les bétons de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect. Le béton de sable peut être utilisé dans la préfabrication pour des murs architecturaux, pour des mobiliers urbains, en bâtiment et en voirie (Photo 7).



Photo 7 : Le béton de sable dans la préfabrication

Béton de sable coulé : Il peut être coulé sur place dans les routes et autoroutes, dans les aérodromes et en bâtiment (Photo 8 et 9).

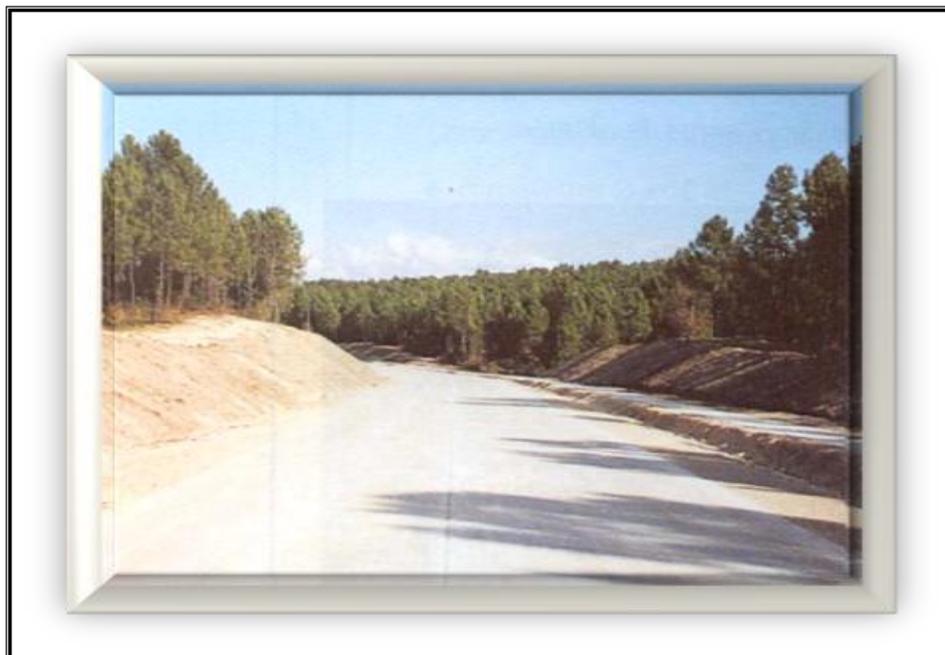


Photo 8 : Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface



Photo 9: Déroulement d'un film polyane (cure) [1]

II.6. Intérêts et limites des bétons de sables :

II.6.1. Intérêt des bétons de sable :

Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Cependant il exige, parfois, des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques :

- **La maniabilité** : Le béton de sable étant très maniable, sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif.
- **La cohésion et l'absence de ségrégation**: La variation entre les dimensions des gains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation.
- **La petite granulométrie et la faible dimension des grains** : le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en œuvre des structures à fortes densités de ferrailage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures.

- **Le transport** : Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques, bien que les bétons de sable soient généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport faibles ce qui permet son transport à des distances lointaines.
- **L'aspect de surface**: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

En plus de ces caractéristiques, le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions, ce qui conduit à des économies certaines.

II.6. 2. Limites des bétons de sable :

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques. [6]

- **Raisons économiques** : l'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas "un plus" dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé. En ce qui concerne notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquels nous pouvons tirer des fillers. Il existe également des fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

- **Raisons techniques** : On n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.

II.7.1. Les méthodes de formulation [1] :**II.7.1. Introduction :**

La formulation d'un béton de sable consiste à trouver les proportions des différents constituants, afin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques. Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème. Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique. A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre est expérimentale, en se basant sur les deux critères principaux des bétons structuraux :

- La résistance mécanique.
- La maniabilité (facilité de mise en œuvre).

II.7.2. Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable :

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, et joue aussi le rôle d'une colle liant les granulats en donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{\max}).

Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V=V_0 (d/D_{\max})^{1/5} \quad (1)$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

D_{\max} : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence telles que la méthode de Faury, Bolomey, Dreux, etc.

II.7.2.1. Dosage en fines d'un béton de sable :

Pour le but d'optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable, il faut que ces constituants soient séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 μm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à 80 μm .
2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable D_{max} , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 μm , provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 μm et l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$P_s = V = 0.75 (0.08/D)^{1/5} \quad (2)$$

$P_s (v)$: Porosité du sable d'étendue granulaire comprise entre 80 μm et D_{max} .

D_{max} : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V_0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8).

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80 μm , et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80 μm) et le volume de vide associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

$$[\text{Fines}] = [\text{Vides}].$$

Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.08/D_{\text{max}})^{1/5}$$

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.

II.7.2.2. Dosage en eau d'un béton de sable :

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v .

$$(e+v)_{\min.} = 0.8 (d/ D_{\max})^{1/5} \quad (3)$$

Le calcul de la porosité minimale exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange (d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (60/ (f.r)) \text{ mm.} \quad (4)$$

Avec:

f : surface spécifique exprimée en cm^2/g du constituant.

r : densité du constituant exprimée en g/cm^3 .

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères.

Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des floccs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale. (fig.13)

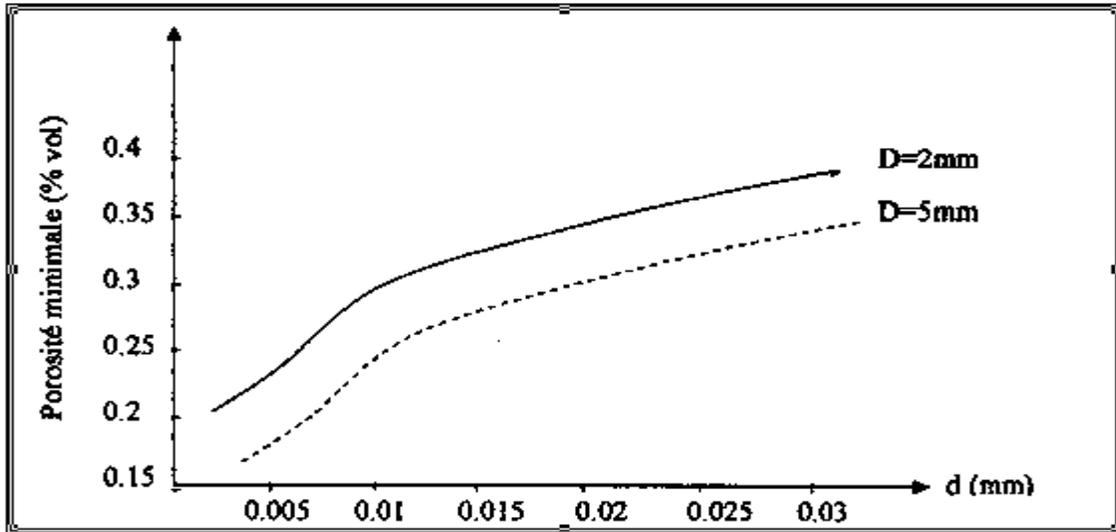


Figure 13: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable [1]

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité $(e+v)$ supérieure à $(e+v)_{\min}$, alors pour des quantités d'eau supérieures à celles qui donnent l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire. (fig.14)

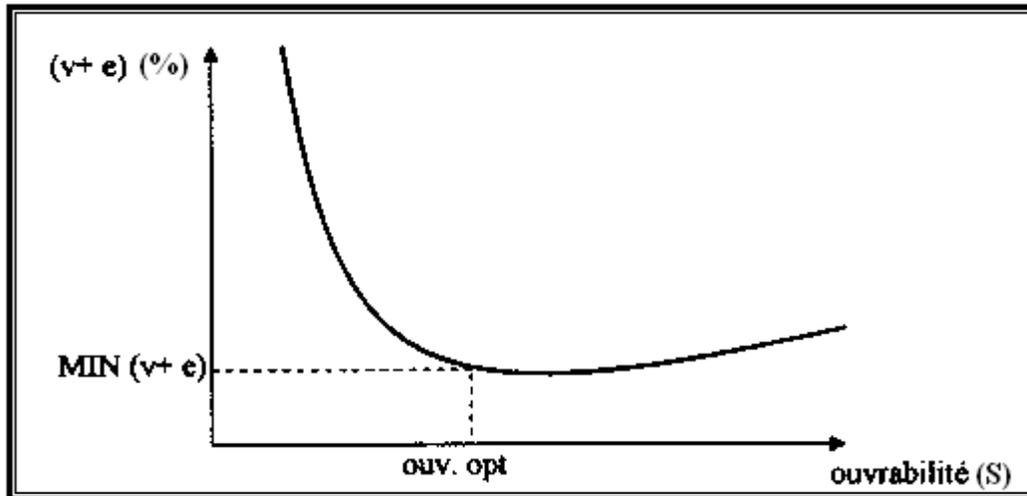


Figure 14: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage $(e + v)$ d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [1]

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vide}] = K [\text{eau}] \quad (5)$$

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

II.7.2.3. Dosage en sable :

Pour estimer le dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des constituants fines, eau et vides, comme ci-dessous :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fine}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \quad (l/m^3) \quad (6)$$

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80 μm , soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition. (Voir LBS -76)

II.7.2.4. Estimation de la résistance en compression :

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [1] a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e + v)}{c(1 + K_1 + K_2)}\right)^2} \quad (7)$$

K_f : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

R_c : classe vraie du ciment (MPa) ;

e : dosage en eau totale (l/m^3) ;

v : air piégée (l/m^3) ;

C : dosage en ciment (kg/m^3) ;

R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

$$K_1 = K_{cv} (CV/C) + K_{fs} (FS/C);$$

$$0.2 < K_{cv} < 0.4$$

$$2 < K_{fs} < 3.3$$

$$K_1 \leq 0.5$$

$$K_2 = K_{fil} (\text{Fil}/\text{C});$$

$$0 < K_{fil} \leq 0.4$$

$$K_1 < 0.2$$

K_1 : coefficient pouzzolanique

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv} , K_{fs} , K_{fil} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3)

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés (K_{cv} , K_{fs} et K_{fil}). Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente [7].

Ainsi d'autres paramètres pourraient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. L'activité de filler calcaire présente un optimum au-delà duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques. (fig.15)

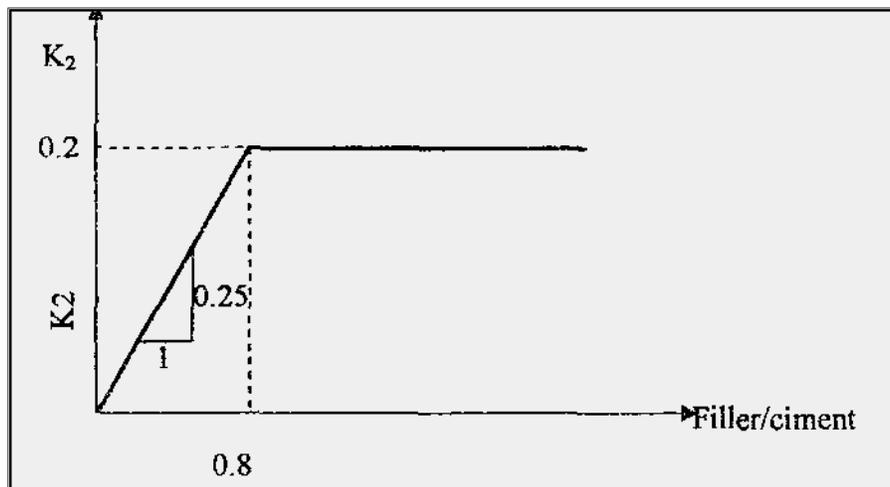


Figure 15 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [1]

Ainsi il y a d'autre paramètre qui s'ajoutant pour le dosage en fines, toute fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité, ces fines regroupant le ciment, l'addition (filler calcaire, cendres volantes ...) et la fraction du sable inférieur à 80 μm , ainsi que l'optimum de la résistance serait atteint pour les dosages en ciment et en addition, solution du système suivant :

- Dosage en ciment + dosage en fines d'addition = dosage en fines.
- Dosage en fines d'addition / dosage en ciment = optimum d'activité.

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme.

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme.

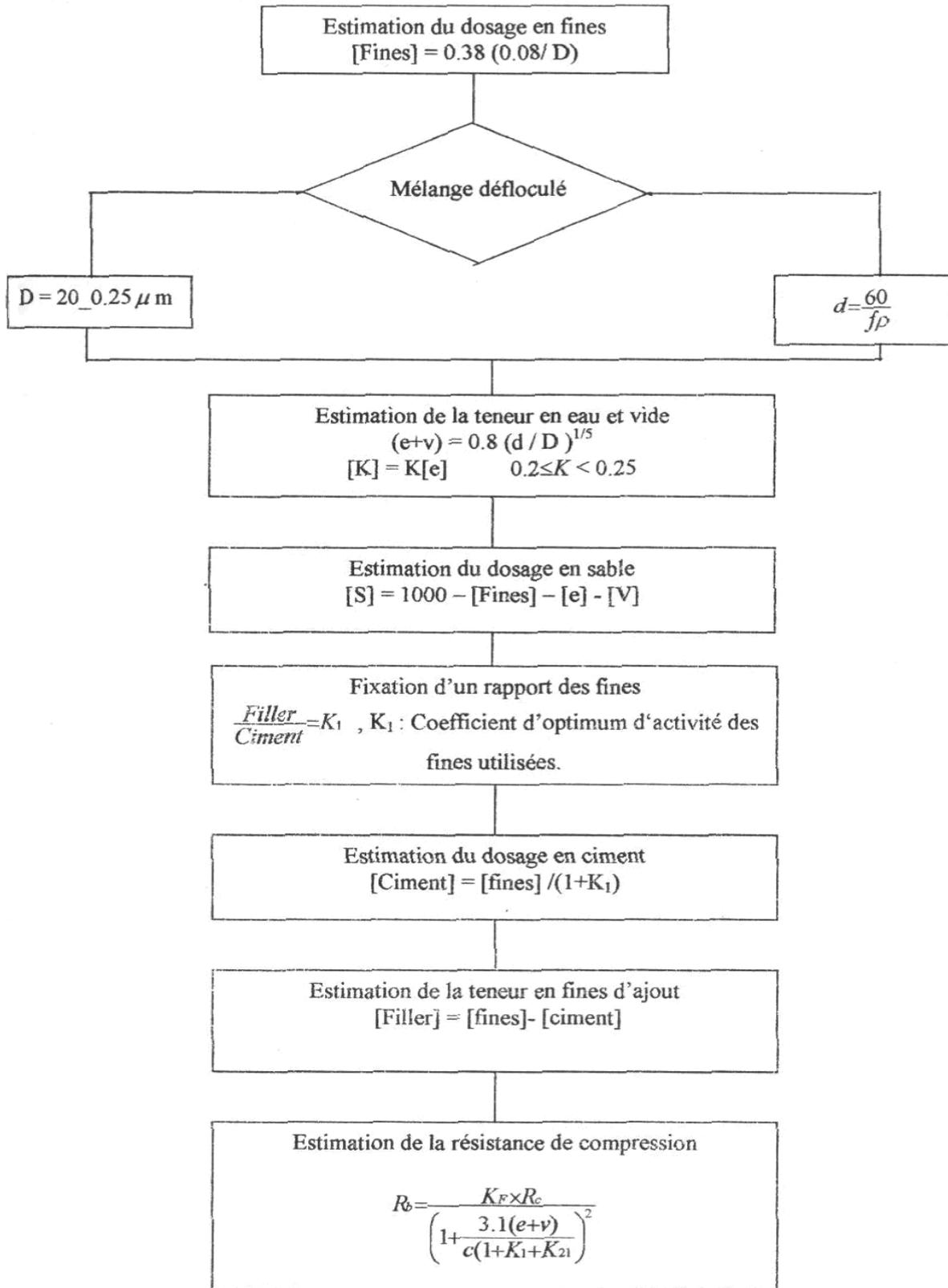


Figure 16 : Organigramme de la méthode théorique [7]

II.7.3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable :

II.7.3.1. Présentation générale de la méthode expérimentale :

Dans le même but recherché par l'approche théorique, diverses méthodes expérimentales ont été mises au point ; ceci est dû aux nombreux facteurs qui sont à prendre en compte lors d'une étude de composition d'un béton. Chacune de ces formules conférerait au béton certaines qualités et en même temps certains défauts. La base de toutes ces méthodes est la réalisation de légères gâchées de béton à fin d'effectuer quelques mesures susceptibles de donner une appréciation à l'aptitude du béton dans sa destination.

La méthode présentée ici est une adaptation de la méthode de Baron-LESAGE : elle est itérative et basée sur la réalisation des gâchées légères, qui sont caractérisées par des mesures de la maniabilité et de la masse volumique apparente. A noter que plusieurs formulations de béton de sable ont déjà été réalisées par cette méthode : bétons de pieux, bétons routiers, bétons de projection, etc.

II.7.3.1. 1. Les différentes étapes de la formulation :

Après avoir rendu compte des matériaux entrant dans la composition du béton par une identification précise, l'obtention du mélange doit satisfaire à l'ordonnancement suivant :

a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :

Pour cela on cherche à réaliser un béton de sable dont la maniabilité est comprise entre 7 et 10 secondes au maniabilimètre LCPL ; ce béton est composé seulement de ciment, d'eau et de sable.

1. Le dosage en ciment :

Les dosages en ciment sont souvent influencés par la destination du béton (bâtiment, barrage, milieu agressif...etc.), mais on opte toujours à des minimums selon les prescriptions et les normes en vigueur. Ces dosages sont fixés lors de l'étude et sont notés par C (kg/m³).

2. Dosage en eau :

L'estimation du dosage en eau est approximative. A ce stade de la formulation et sur la base de l'expérience, les praticiens donnent à titre indicatif un dosage en eau de 220 l/m³ pour un dosage en ciment de 350kg/m³, 250l/m³ d'eau pour un dosage en ciment de 400Kg/m³, mais on peut toujours utiliser la formule exposée dans la méthode théorique permettant d'estimer le dosage en eau en fonction de la porosité du squelette granulaire.

$$E = \frac{800}{1 + \alpha} * \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{1}{5}}$$

α Compris entre 0.1 et 0.15 ;

d est la borne inférieure de la phase solide du béton (mm) ;

D est la borne supérieure de l'étendue granulaire du sable (mm) ;

b. Détermination du dosage en sable :

Dans un premier temps et pour permettre la défloculation des fines, on utilise un fluidifiant réducteur d'eau au dosage normal préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm) [1]. Le béton contient toujours un volume d'air V_{air} , la teneur en air des bétons est de l'ordre 3% en volume. Cette valeur est supérieure pour le béton de sable et se situe entre 5 % et 7 % du volume. Le dosage en sable peut être calculé par soustraction des différents volumes des constituants précédents

$$V_{\text{sable}} = 1000 - V_c - V_{\text{adj}} - V_{\text{air}} - V_{\text{eau}} \quad (8)$$

(Les volumes sont exprimés en litre).

Connaissant la masse volumique absolue du sable, on peut déduire la masse nécessaire pour la formulation d'un mètre cube du béton de sable.

$$M_{\text{sable}} = MVA * V_{\text{sable}}$$

M_{sable} : masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable.

MVA_{sable} : masse volumique absolue du sable.

V_{sable} : volume du sable.

Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m^3).

$$MVAT = m_{\text{ciment}} + m_{\text{eau}} + m_{\text{adj}} + m_{\text{sable}} \quad (9)$$

c. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule :

Le mélange obtenu selon les formules précédentes doit répondre aux objectifs fixés et qui se résument dans les deux critères essentiels :

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (9)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.

L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique apparente théorique (MVAT) vers la masse volumique apparente réelle (MVAR)) et le temps d'écoulement de 7 à 10 S.

La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$S_i = S_{i-1}(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) + V * MVA_{\text{sable}}. \quad (10)$$

Où

S_i : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction

MVAT, MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV_{sable} : masse volumique absolue du sable

V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

Il sera rajouté si l'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 10).

Il sera retranché si l'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 10)

Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle.

En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable

II.7.3.1.2. Détermination du dosage en fines d'addition :

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optimal permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total ($MVAR=(MVAT)$).

Ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle.

Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés et fixés précédemment afin de les comparer aux critères imposés. Si ces derniers ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \quad (11)$$

Connaissant la maniabilité et la masse volumique pour chaque dosage en fines d'addition, on trace les courbes correspondantes : la masse volumique en fonction du dosage en fines et l'évolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines. Ces deux courbes permettent de définir les dosages

optimums en fines et en sable correspondant à la formule la plus compacte et la plus maniable.

Toutefois pour des raisons économiques ou lorsque l'ajout de fines n'améliore que très peu les caractéristiques, le dosage en fines peut être pris avant l'optimum [1]

II.7.3.1.3. Evaluation de la résistance :

Dans le but de la détermination de la résistance caractéristique du béton de sable ainsi formulé, des essais mécaniques classiques sont effectués. Si les résistances obtenues ne correspondent pas à celles recherchées, elles peuvent être modifiées en jouant sur les paramètres de départ; augmentation ou réduction du dosage en eau et ou en adjuvant, ou changement du ciment.

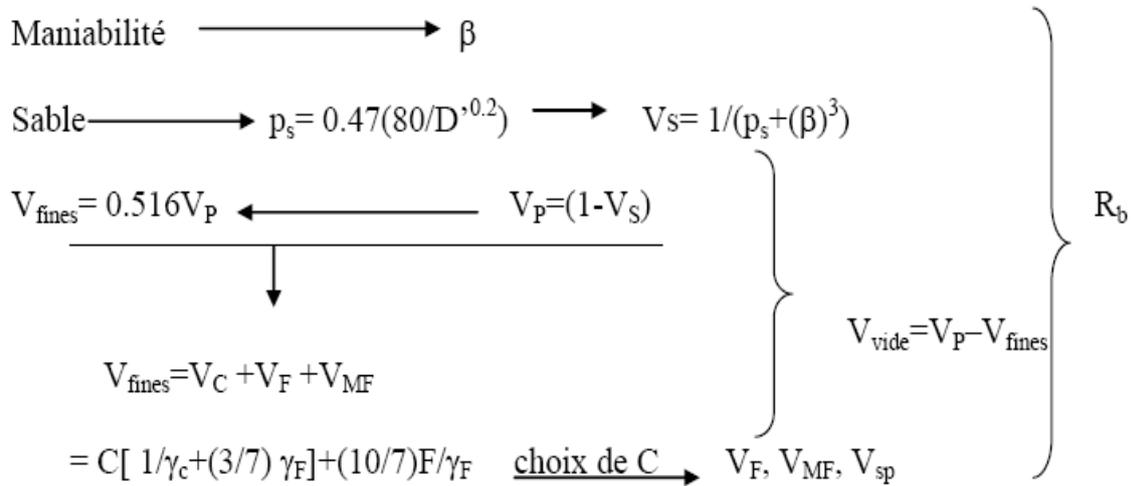
La méthode expérimentale permet de formuler des bétons de sable et conduit à réaliser un nombre important de gâchées en laboratoire ; le recours préalable à une approche théorique constitue un outil efficace et utile et permet de réduire considérablement le nombre de gâchées.

II.7.4. Les méthodes de formulation :

II.7.4.1. Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées [13]

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques. Dans le cas des bétons, il existe de nombreuses méthodes de formulation permettant de viser les deux propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance, en se fixant généralement la taille des plus gros grains des granulats. Pour les bétons de sable qui font partie des nouveaux bétons aux propriétés spécifiques intéressantes (finesse, ouvrabilité...), la démarche de formulation demeure très empirique. Différentes approches ont été envisagées pour appréhender les caractéristiques de résistance. Par contre la prise en compte de l'ouvrabilité comme critère de formulation demeure complexe. Un béton de sable, confectionné essentiellement de sable dont la surface spécifique est très grande, a besoin davantage d'eau et de ciment. Or l'influence négative d'un fort dosage en ciment sur le coût et d'un fort dosage en eau sur les caractéristiques mécaniques et sur le retrait est bien connue. Il est donc judicieux de remplacer une partie du ciment par des fillers et limiter le dosage en eau par l'ajout des adjuvants. Enfin nous pouvons dire que pour formuler un béton de sable, il faut combiner les deux paramètres : maniabilité et compacité [13].

Dans la plupart des études rencontrées, des compositions ont été proposées pour des matériaux bien déterminés. Les compositions optimales obtenues sont presque toujours basées sur la combinaison des deux paramètres indiqués précédemment : la compacité et la maniabilité. La seule méthode de formulation qui semble plus ou moins généralisée est celle publiée par LCPC en 1996 [13]. Cette méthode se base également sur les deux paramètres cités auparavant. La synthèse de cette méthode est comme suit :



Où

V_{fines} : volume du filler

P_s : porosité du sable

V_P : volume de la pâte

D' : diamètre équivalent de Faury.

V_{MF} : volume du microfiller

β : constante caractéristique de l'association ciment-granulat.

V_{SP} : volume du superplastifiant

V_s : volume du sable

V_C : volume du ciment

C : dosage du ciment

R_b : résistance en compression

Les mélanges réalisés ont montré que (air/eau) = 0.287.

R_b désirée peut être obtenue par calcul itératif au niveau du choix de C ou par résolution à l'aide d'un logiciel.

II.7.4.2. Étude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda : [33]

Z.Boudaoud [33] a formulé un béton de sable (sable fin de Boussaâda) par l'utilisation de la méthode de Dreux-Gorisse ; en fixant la quantité de ciment 350 kg/m^3 , et il a déterminé la quantité de sable en supposant un coefficient de compacité du mélange égale à 0.75, valeur tirée du tableau 10-13 du nouveau guide du béton de G.Dreux [31] et correspondant à un mélange avec $D_{\text{max}} = 5 \text{ mm}$

et une consistance molle, ($V_s + V_c = 0.75 \times 1000 = 750L$), après le calcul il a fixé la dépense en sable à 1660 kg/m^3 . Le dosage en eau est déterminé après fixation de la maniabilité, ce qui a donné un rapport $E/C = 0.86$. Avec cette formulation de base, **Boudaoud** a introduit deux types de filler calcaire ($\varnothing < 125\mu\text{m}$), afin de remplir et de corriger les dépenses en sable (compacité), et pour voir leur effet sur les caractéristiques mécaniques du BS, il a substitué et remplacé à chaque fois une quantité de sable par du filler calcaire, tout en corrigeant les dépenses en sable et en filler.

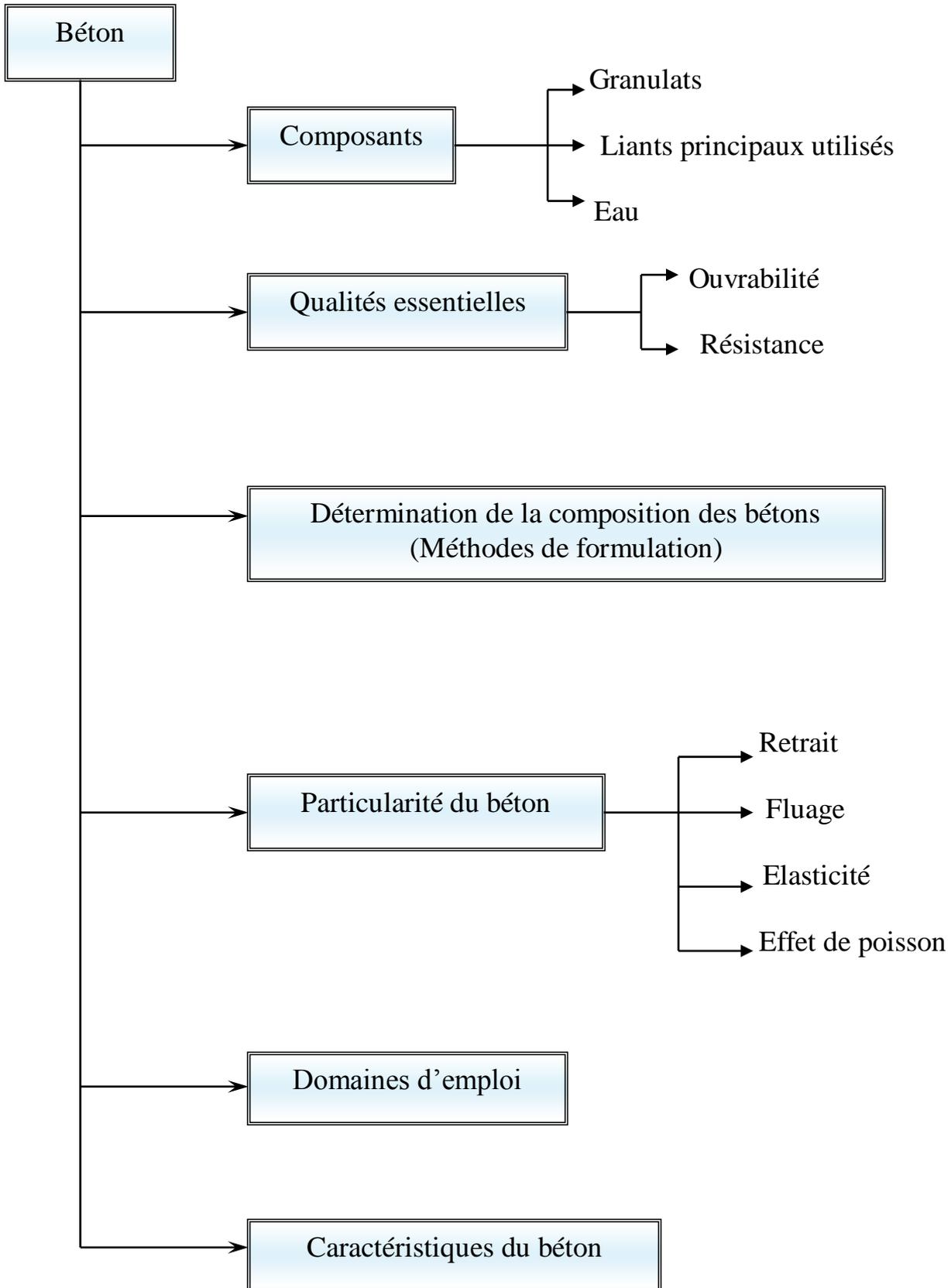
Les résultats d'essais de résistance à la compression à 28 jours pour cette formulation de BS avec ajout fillers ont donné des valeurs maximales avec des dosages de 200 kg/m^3 pour les deux types de fillers calcaire qui sont utilisés.

D'autres travaux ont été réalisés [10, 11 et 12] avec du sable de dune et avec du filler de polissage de carrelage ou du filler de calcaire, elles ont obtenu avec un dosage similaire de 200 kg/m^3 des valeurs optimales à la résistance à la compression à 28 jours.

Béton de sable (BS)	Béton ordinaire (BO)
----------------------------	-----------------------------

II.8. Comparaison entre le béton de sable (BS) et le béton ordinaire (BO) : [37]

* Plan succinct du thème « le béton » :



<p><u>Composants [1]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ciment ✓ Sable ✓ Filler ✓ Eau : plus quantité d'eau 	<p><u>Composants</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ciment ✓ Sable ✓ Gravier ✓ Eau : moins quantité d'eau
<p><u>Qualités essentielles</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ouvrabilité moins : le module de finesse de mélange est plus faible. ✓ Résistance faible : due à l'utilisation davantage de quantité d'eau dans la composition du BS pour mouiller toutes les particules fines 	<p><u>Qualités essentielles</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ouvrabilité plus : le module de finesse de mélange est plus grand. ✓ Résistance forte : due à l'effet de présence de gravier dans la composition des BO
<p><u>Méthodes de formulation</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Méthode théorique et méthode expérimentale. [1] ✓ Méthode de formulation des BS à maniabilité et résistance fixées. [13] 	<p><u>Méthodes de formulation [37]</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. méthodes basées sur des considérations théoriques ou des essais : <ul style="list-style-type: none"> ✓ méthode à granularité continue de Bolomey ✓ méthode de Vallette ✓ méthode de Faury 2. méthodes générales du C.E.S (centre d'essai des structures) <ol style="list-style-type: none"> 2.1. évaluation de l'humidité des granulats 2.2. utilisation d'abaque (méthode Dreux)

Béton de sable (BS)	Béton ordinaire (BO)
<p><u>Particularité du béton [1]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ retrait plus que le BO ✓ fluage plus faible, voisin de celui d'un BO <p>Elasticité : Module d'élasticité : les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faibles que ceux des bétons classiques. C'est une donnée généralement des matériaux granulaires (0/D) pour les quels le module diminue lorsque Dmax diminue. [9].[13]</p>	<p><u>Particularité du béton</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ retrait moins que le BS ✓ fluage voisin de celui d'un BS ✓ Elasticité : les bétons ordinaires ont des modules d'élasticité plus forts que ceux des bétons de sable.
<p><u>Domaines d'emploi : [5]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ bâtiments ✓ fondations ✓ voiries ✓ aéroport ✓ travaux des réparations ✓ les ponts ✓ la préfabrication ✓ la projection des surfaces ✓ pieux forés et la réalisation de dallages ✓ la réhabilitation de collecteurs d'assainissement. ✓ la stabilisation de parois ou talus. ✓ Les travaux d'injection : <ul style="list-style-type: none"> - le comblement de cavités. -la réparation de fondation et renforcement d'ouvrages portuaires 	<p><u>Domaines d'emploi : [37]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ bâtiments ✓ fondations ✓ voiries ✓ aéroports ✓ ouvrages d'art ✓ travaux des réparations ✓ les ponts ✓ la préfabrication

Béton de sable (BS)	Béton ordinaire (BO)
<p><u>Caractéristiques du béton de sable : [6]</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ <u>Maniabilité</u> : le BS étant très maniable, sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec un serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif. ✓ <u>La cohésion et l'absence de ségrégation</u>: La variation entre les dimensions des grains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation. ✓ <u>La petite granulométrie et la faible dimension des grains</u> : le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en œuvre des structures à fortes densités de ferrailage, ainsi que dans les travaux de rénovation de structures. ✓ <u>Le transport</u> : Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques, bien que les bétons de sable soient généralement plus plastiques et les risques de ségrégation pendant le transport sont faibles ce qui permet son transport à des distances lointaines. 	

Béton de sable (BS)	Béton ordinaire (BO)
<ul style="list-style-type: none">✓ <u>L'aspect de surface</u>: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.✓ <u>Aspect économique</u> : le béton de sable possède un autre intérêt plus important pour les régions du sud algérien et qui consiste à utiliser les sables qui se trouvent en abondance dans ces régions.	

chapitre III

caractérisation des matériaux utilisés
"formulation des bétons de sable "

III. 1. Introduction :

Le comportement rhéologique et mécanique du béton est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, l'emploi judicieux de ses matériaux dans la construction exige la connaissance de leurs diverses propriétés : physiques, chimiques et mécaniques, et qui permet de faire un choix répondant à leur destination.

Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes. Ainsi pour évaluer ces propriétés, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés durant ce projet de recherche, les procédures des malaxages pour confectionner nos mélanges, les différents essais expérimentaux pour caractériser les mélanges à l'état frais et durci. ainsi que les compositions des différents mélanges utilisés dans le cadre de cette étude.

III. 2. Matériaux utilisés :

III. 2.1. Sable :

Dans notre projet, nous avons utilisé un sable de dune et un sable d'oued dont le prélèvement s'est effectué dans la région de Biskra :

- Sable de dune de la région d'Ain Bennaoui (EL-Hadjeb)
- Sable d'oued de la région Lioua

Ces sables ont été caractérisé comme suit :

III. 2.1.1. Caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques étudiées sont :

a)- Analyse granulométrique :

C'est la mesure de la distribution dimensionnelle des grains des granulats.

La variation de la masse du passant en fonction de la dimension de la maille du tamis est représentée par une courbe granulométrique.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P 18-560.

b). Propriétés physiques

- **Masse volumique absolue (γ_s)**: c'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{III-1})$$

Où M_s est la masse des grains solides et V_s est le volume des grains solides

- **Masse volumique apparente (γ)**: c'est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{III-2})$$

Où M est la masse du matériau et V est le volume total du matériau.

- **Module de finesse (Mf)** : il est défini par :

$$M_f = \frac{[\sum \text{des refus cumulés (en \%)} \text{ sur les tamis } 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5]}{100}$$

(III-3)

- **Compacité (NF P 18-554)**: Elle est définie par :

$$C_p = \frac{V_s}{V} = 1 - P = \frac{\gamma}{\gamma_s} \quad (\text{III-4})$$

Où P est la porosité.

- **Equivalent de sable** : cet essai, référé par la norme **NF P18 598**, est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 mn, on mesure les éléments suivants :

- la hauteur h_1 : sable propre + éléments fins
- la hauteur h_2 : sable propre seulement

On en déduit l'équivalent de sable qui est par convention :

$$ES = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \times 100 \quad (\text{III-5})$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

ESV (équivalent de sable visuel)

ESP (équivalent de sable au piston)

les valeurs de l'équivalent de sable sont détaillées dans le tableau suivant:

ES _v	ES _{piston}	Nature et qualité
ES _v < 65	ES < 60	Sable argileux: risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 ≤ ES _v < 75	60 ≤ ES < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ ES _v < 85	70 ≤ ES < 80	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de qualité.
ES _v ≥ 85	ES ≥ 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.

Tableau 3 : Nature et qualité du sable

III. 2.1. a. Sable de dune :

Tamis (mm)	Tamisât (%)
5	100
2.5	99.6
1.25	99.1
0.63	96
0.315	45.5
0.160	11.2
0.08	0.8

Tableau 4 : Analyse granulométrique du sable de dune

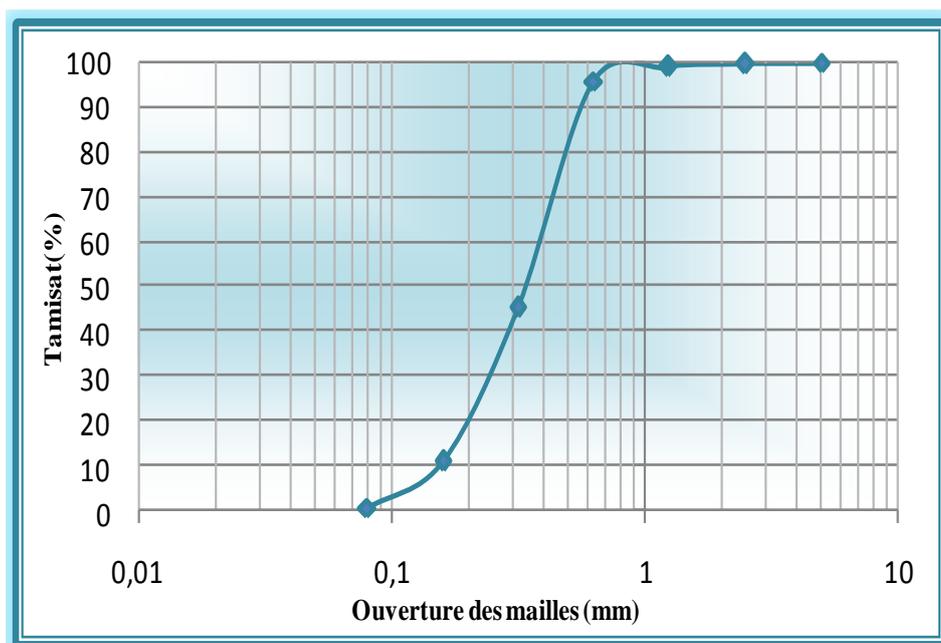


Figure 17 : Courbe granulométrique du sable de dune

➤ Propriétés physiques :

Module de finesse (M_f)	1.446
Équivalent de sable visuel (ESV)	73.85
Équivalent de sable au piston (ES)	68.4
Masse volumique apparente	1.512
Masse volumique absolue	2.63
Compacité	57 %
Porosité	43 %

Tableau 5 : Propriétés physiques du sable de dune

III. 2.1. b. Sable d'oued :

Tamis (mm)	Tamisât (%)
5	100
2.5	89.4
1.25	80.3
0.63	65.9
0.315	33.1
0.160	18.7
0.08	1.1

Tableau 6 : Analyse granulométrique du sable d'oued

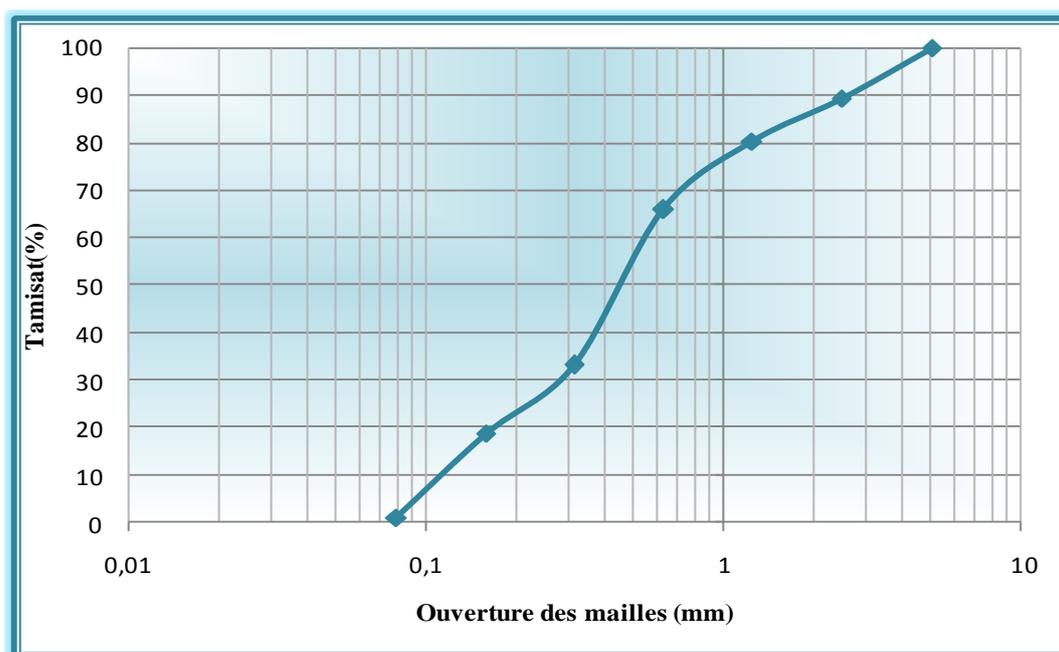


Figure 18 : Courbe granulométrique du sable d'oued

➤ Propriétés physiques :

Module de finesse (M_f)	2.126
Équivalent de sable visuel (ESV)	83.9 %
Équivalent de sable au piston (ES)	80.47 %
Masse volumique apparente	1.67
Masse volumique absolue	2.61
Compacité	64 %
Porosité	36 %

Tableau 7 : Propriétés physiques du sable d'oued

III.2.1.2. Analyse chimique : les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie de AIN-TOUTA.

Éléments	Proportion (%)
SiO ₂	74.99
Al ₂ O ₃	0.06
Fe ₂ O ₃	1.44
CaO	15.76
MgO	0.65
K ₂ O	0.21
Na ₂ O	0.01
SO ₃	0.06
Cl	0.02
PAF	4.67

Tableau 8 : Analyse chimique SD

Éléments	Proportion (%)
SiO ₂	74.08
Al ₂ O ₃	0.14
Fe ₂ O ₃	1.05
CaO	9.51
MgO	0.44
K ₂ O	0.14
Na ₂ O	0.05
SO ₃	0.07
Cl	0.02
PAF	03.34

Tableau 9 : Analyse chimique SO

III.2.2. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment (CPJ-CEM II /42.5A) provenant de la cimenterie (SCIMAT) à AIN TOUTA, les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques de ce type de ciment sont indiquées dans le tableau ci- dessous :

PHASE	CONSOMATION MINERAUX DES AJOUTS	Teneur (%)
Ajouts	Cal/laitier	20%
	Cal/pouz	20%

Commentaire : ciment de classe CPJ –CEM II 42,5 ; avec des propriétés physiques – chimiques satisfaisantes aux exigences normatives de la norme NA 442 / 2000.

Caractéristique physique - mécaniques					Composition chimique		
DESIGNIATION		Unités	Garanties NA.442	Mesures	Eléments	Garanties	Teneur %
POIDS SPECIFIQUE		g/ Cm ³		3.03	SiO ₂		20.65
SURFACE SPECIFIQUE BLAINE (NA 231)		Cm ² /g	-	3852	Al ₂ O ₃		4.92
CONSISTANCE NORMALE (NA 229)		% H ₂ O	-	26.33	F ₂ O ₃		2.97
TEMPS DE PRISE (NA234)	DEBUT	h :min	≥ 01h :00	01h 58	CAO		59.40
	FIN	h :min	-	02h 57	MgO		1.01
EXPANSION à chaud (NA 232)		mm	≤ 10	1.47	K ₂ O		0.8
RETRAIT -28jours-(NA440)		µm/m	≤ 1000	765	Na ₂ O		0.19
CONFLEMENT -28jours- (NA440)		µm/m	-	0.00	SO ₃	≤ 3.5%	2.75
REFUS SUR TAMIS 45 µm		%	-	12.37	CL ⁻	≤ 0.10%	0.022
Résistance à la flexion	02 jours	MPa	-	3.65	P.AF 1000°C		6.02
	07 jours	MPa	-				
	28 jours	MPa	-		CAO Libre		0.78
Résistance à la compression (NA234)	02 jours	MPa	≥ 12.5	17.42			
	07 jours	MPa	-		Résidu insoluble		0.68
	28 jours	MPa	≥ 42.50 ≤ 62.50				

Tableau 10: Contrôle de qualité de ciment vendu (Février 2010).

III.2.3. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage pour les bétons de sable, comme tout le béton ordinaire, doit être potable, dépourvue des sels minéraux. L'eau utilisée (l'eau de robinet) pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P 18-303, la quantité d'eau est légèrement supérieure à celle utilisée pour le béton traditionnel.

III.2.4. L'adjuvant : « MEDAPLAST SP 40 » Nous avons utilisé un adjuvant produit par la société « GRANITEX », c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton, il se

présente sous forme liquide marron. Ce haut réducteur d'eau est appelé « MEDAPLAST (SP40) ». Sa densité absolue est de 1,20 et sa concentration en particule solide est de 40%, le contenant de superplastifiant a été agité avant chaque utilisation afin de bien homogénéiser la solution.

Ajoutons que, pour des raisons de confidentialité, le producteur ne fournit pas la composition chimique de cet adjuvant.

III.2.5. Les ajouts :

III.2.5. 1. Filler calcaire

Les fillers sont destinés à compléter la courbe granulométrique du sable dans sa partie fine et à combler les vides. Les fillers utilisés dans notre cas sont de nature calcaire. Ils sont obtenus par tamisage (au tamis 80 μm) des déchets de concassage d'une carrière abandonnée se trouvant dans la ville de Constantine. Rappelons que les fillers calcaires sont les plus adaptés aux bétons de sable et donnent de meilleures performances.

Leur composition chimique est mentionnée dans le tableau (11).

Matières ou éléments	Proportion (%)
SiO ₂	2.26
Al ₂ O ₃	0.79
Fe ₂ O ₃	0.38
CaO	53.72
MgO	0.47
K ₂ O	0.13
NaCl	0.6
SO ₃	0.07
PF	40.03

Tableau (11) : Analyse chimique des fillers

Leurs caractéristiques physiques sont définies comme suit :

caractéristiques physiques	valeurs
Densité apparente (g/ cm ³)	1,35
Densité absolue (g/ cm ³)	2,85
finesse	4416.2

Tableau (12) : Caractéristiques physiques du filler calcaire

III.2.5. 2. Fumée de silice :

Elle est à base de microsilice provenant de la société « **GRANITEX** » sous forme de poudre, cette fumée de silice est désignée par le nom « **MEDAPLAST HP** », ses caractéristiques physiques sont représentées au tableau (13) :

caractéristiques physiques	valeurs
Densité apparente (g/ cm ³)	0,5
Densité absolue (g/ cm ³)	1,87
finesse	> 15 (m ² /gr)

Tableau (13) : Caractéristiques physiques de fumée de silice

Les compositions chimiques sont :

SiO₂ > 85%

SO₃ < 2,5%

Cl⁻ <0,2 %

III.3. La formulation du béton de sable :

Comme nous avons dit auparavant la formulation consiste à trouver les meilleures proportions des différents constituants après s'être assuré de leur compatibilité, puis évaluer à l'aide des tests prédictifs le comportement du béton de sable.

Le choix de ces compositions est fait à partir des deux critères principaux du béton de structure :

- La maniabilité.
- la masse volumique (MV).

Le but principal de notre recherche expérimentale est la valorisation de l'utilisation des matériaux locaux (sable de dune, fibre d'alfa et fibre de palmier dattier). Et dans notre recherche expérimentale, on est passé par deux étapes pour la formulation du béton de sable:

Dans la première étape : on a essayé de formuler et d'optimiser la formulation du béton de sable pour avoir une formulation de base avec l'utilisation de sable de dune dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, il a plusieurs études récents qui exploitent cette ressource naturel ; le sable de dune possède des caractéristiques semblables aux caractéristiques de la fumée de silice [14],[17],[19], et [34] .

Dans la deuxième étape on a introduit des fibres (la fibre d'alfa et la fibre de palmier dattier) pour voir l'effet des fibres végétales sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

- **La première étape** : Dans cette étape on a fabriqué 5 séries de béton
- **1^{ère} série d'essais** : à partir des caractéristiques physiques et chimiques de sable de dune et leur influence sur le comportement mécaniques et rhéologiques des bétons et des mortiers [14],[34],[39], et dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux ; on a utilisé dans notre recherche expérimentale une méthode empirique pour la formulation du béton de sable ; cette méthode est basée sur variation le rapport SO/SD (de 0 à 4) jusqu'à l'obtention d'un BS plus maniable et on fixe le rapport SO/SD correspondant, d'après [1] $D_{\max} = 5$ mm on est amené à envisager des dosages en ciment entre 398 à 507 kg/m^3 , mais il y a des problèmes liés à l'utilisation d'un fort dosage en ciment qui sont : coût élevé, retrait important, excès de rigidité ; pour éviter ces derniers phénomènes, on a fixé le dosage en ciment à 350 kg/m^3 [10], [11], [12] et [33], le rapport E/C est gardé fixe (E/C =0.80) [1] (p33- E/C [0.75-0.80]), le but de la formulation de cette série est faire la correction granulométrique et d'avoir une formulation de base du béton de sable.

La composition de chaque mélange pour cette série est mentionnée dans le tableau (14) suivant :

	100%SD	90%SD + 10%SO	80%SD + 20%SO	70%SD + 30%SO	60%SD + 40%SO	50%SD + 50%SO	40%SD + 60%SO	30%SD + 70%SO	20%SD + 80%SO
C (kg/m³)	350	350	350	350	350	350	350	350	350
(SO/SD)	0	0.11	0.25	0.43	0.67	1.0	1.5	2.33	4.0
E (kg/m³)	280	280	280	280	280	280	280	280	280
E/C	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
S (l/m³)	607	607	607	607	607	607	607	607	607

Tableau (14) : 1^{ère} série d'essais de la formulation

- **2^{ème} série d'essais :** le but de la formulation de cette série de béton consistera à déterminer la quantité d'ajout filler calcaire pour obtenir la compacité et la résistance optimale. Nous devons chaque fois substituer et remplacer une quantité de sable par le filler calcaire tout en corrigeant les dépenses en sable et en filler calcaire de manière à garder le dosage en ciment de 350 kg/m³ et le même rapport E/C.

La composition de chaque mélange pour cette série est mentionnée dans le tableau (15) :

C (kg/m³)	FC (kg/m³)	S (kg/m³)	E	E/C	F/C
350	0	1588	280	0.80	0
350	100	1488	280	0.80	0.28
350	150	1438	280	0.80	0.43
350	200	1388	280	0.80	0.57
350	250	1338	280	0.80	0.71

Tableau (15) : 2^{ème} série d'essais de la formulation

➤ **3^{ème} série d'essais** : afin d'avoir des gains de résistance appréciable et pour améliorer la maniabilité de la 2^{ème} série du béton, et à partir de la formulation la plus performante de ce dernier, on a fait introduire du superplastifiant avec différents dosages, en gardant la même composition avec les mêmes dosages.

La composition de chaque mélange pour cette série est mentionnée dans le tableau (16) ci-dessous :

C (kg/m3)	FC (kg/m3)	S (kg/m3)	E	SP (%)	E/C
350	200	1388	280	0.6	0.80
350	200	1388	280	1.0	0.80
350	200	1388	280	1.5	0.80
350	200	1388	280	2.0	0.80
350	200	1388	280	2.5	0.80

Tableau (16): 3^{ème} série d'essais de la formulation

➤ **4^{ème} série d'essais** : dans le but de réduire la quantité d'eau et minimiser le rapport E/C afin d'avoir un béton plastique avec un affaissement fixé, on prend le béton le plus performant de la 3^{ème} série en gardant la même composition et les mêmes dosages, et on fait varier le rapport E/C.

La composition de chaque mélange pour cette série est mentionnée dans le tableau (17) ci-dessous :

C (kg/m3)	FC (kg/m3)	S (kg/m3)	E	SP (%)	E/C
350	200	1388	262.5	2.0	0.75
350	200	1388	245	2.0	0.70
350	200	1388	227.5	2.0	0.65
350	200	1388	210	2.0	0.60

Tableau (17) : 4^{ème} série d'essais de la formulation

➤ **5^{ème} série d'essais** : dans cette série, on a pris la composition du béton le plus performant de la 4^{ème} série et on a fait introduire de la fumée de silice à la formulation de base, pour avoir l'effet de la fumée de silice sur les caractéristiques mécaniques du béton de sable.

La composition de chaque mélange pour cette série est mentionnée dans le tableau (18) ci-dessous :

C (kg/m3)	FC (kg/m3)	S (kg/m3)	E	FS (%)	E/C	SP (%)
350	182.5	1388	210	5	0.60	2
350	173.75	1388	210	7.5	0.60	2
350	165	1388	210	10	0.60	2

Tableau (18) : 5^{ème} série d'essais de la formulation

La deuxième étape : pour cette étape de formulation on a fabriqué 02 séries de béton, on a pris la composition du béton le plus performant de la 5^{ème} série et on a fait introduire des fibres végétales (Les fibres du palmier dattier et les fibres d'alfa), pour avoir l'effet de chaque fibre sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

La composition de chaque mélange pour chaque série de cette étape est mentionnée dans les tableaux (19) et (20):

C (kg/m3)	FC (kg/m3)	S (kg/m3)	FS (%)	% fibres	E/C	SP (%)
350	165	1388	10	0.5	0.60	2
350	165	1388	10	1	0.60	2
350	165	1388	10	1.5	0.60	2
350	165	1388	10	2	0.60	2

Tableau (19) : 6^{ème} série d'essais de la formulation

C (kg/m ³)	FC (kg/m ³)	S (kg/m ³)	FS (%)	% fibres	E/C	SP (%)
350	165	1388	10	0.5	0.60	2
350	165	1388	10	1	0.60	2
350	165	1388	10	1.5	0.60	2
350	165	1388	10	2	0.60	2

Tableau (20) : 7^{ème} série d'essais de la formulation

III.3.1. Confectionnement du béton :

Le béton doit être soigneusement confectionné et mis correctement en place pour que les résultats obtenus soient significatifs.

Le confectionnement comporte deux étapes principales :

- **Malaxage** : Le but de cette opération est d'homogénéiser le béton et lui donner une bonne cohésion.

Le malaxage des bétons au laboratoire a été effectué dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 50 l pour la confection des éprouvettes 10X10X10, et à l'aide d'un malaxeur à l'axe vertical d'une capacité de 5 l, pour la confection des éprouvettes 4X4X16.

le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés, la même procédure de gâchage a été utilisée pour toutes les séries de béton.

1. introduction de sable et du ciment plus filler ; puis un malaxage à sec pendant une minute.
2. ajout de l'eau de gâchage, dans le cas d'utilisation du superplastifiant, on le mélangé avec le tiers de la quantité d'eau nécessaire.
3. continuer à malaxer jusqu'à ce que tous les constituants soient mouillés et tout le mélange soit homogène.
4. mesurer l'affaissement du béton frais immédiatement à la fin du malaxage.

- **Serrage des bétons de sable:**

La mise en place d'un béton doit être exécutée d'une façon correcte pour augmenter au maximum sa compacité et bien entendu sa résistance. Dans notre cas, le serrage a été obtenu avec une vibration produite par une table vibrante. Le temps de vibration est en fonction de la plasticité du béton.

III.3.2. Confection des éprouvettes et conditions de conservation :

On a fabriqué deux types d'éprouvettes pour tous les bétons, et pour chaque type de béton 12 éprouvettes de 10X10X10 et 12 éprouvettes de 4X4X16.

Les éprouvettes ont été coulées dans des moules préalablement huilés, le béton frais est placé en deux couches vibrées pendant 10 secondes à l'aide de la table vibrante. Une fois le moule est rempli, le surplus du béton a été arasé et la surface a été égalisée à la truelle.

Les moules remplis par le béton frais ont été ensuite recouvert par un film plastique jusqu'au démoulage qui se fera après 24 heures, ensuite les éprouvettes sont mûries dans un bac d'eau à température ambiante de 20°C. **Photos 10 et 11**, ci-dessous.

Nous avons utilisé au cours de cette étude deux types d'éprouvettes :

1. Les éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm pour toutes les compositions afin de mesurer les résistances à la traction et à la flexion à 7, 14 et 28 jours et mesure le retrait et la perte de masse.
2. Les éprouvettes cubiques de dimensions (10X10X10) cm pour toutes les compositions afin de mesurer les résistances à la compression à 7, 14 et 28 jours et mesurer la capacité d'absorption d'eau



Photo 10 : Les éprouvettes du BS après le démoulage

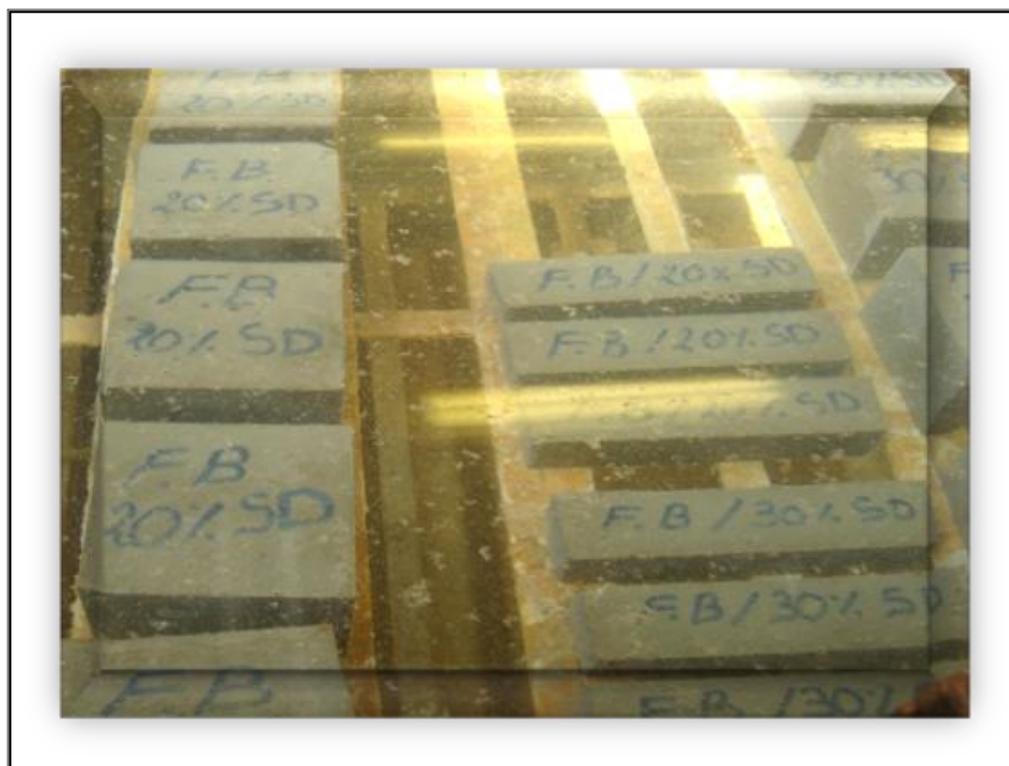


Photo 11 : Cure du béton de sable

III.3.3. Essais réalisés :

III.3.3.1. Essais réalisés à l'état frais :

III.3.3.1.1. Malaxage:

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des mortiers et bétons. Plusieurs variables peuvent intervenir sur cette opération dont les principales sont :

- Le type de malaxage : le meilleur est celui qui assure au mélange un déplacement des matériaux les uns par rapport aux autres (palette, cuve tournante,...) où seule l'action de la pesanteur est utilisée.
- La durée du malaxage : Que ce soit pour les bétons de sable ou pour tout autre béton, elle doit être suffisante pour obtenir l'homogénéité des constituants. Il est même déconseillé d'augmenter cette durée, car un entraînement d'air peut en résulter avec les conséquences qui en découlent (microbullage interne, réduction des performances,...).
- La vitesse de malaxage : le malaxage doit être rapide et les vitesses communiquées aux particules aussi grandes que possible pour mobiliser les grains du mélange.

La qualité du béton dépend beaucoup plus de l'homogénéisation de la composition, non seulement au stade macroscopique, mais également au stade microscopique. Les constituants actifs (ciment+ fines) doivent être introduits en dernier dans les mélangeurs, immédiatement avant la mise de l'eau. Il faut qu'ils soient bien répartis sur tous les grains de sable.

Une stabilité du mélange parfaitement homogénéisée, favorable non seulement au point de vue de la maniabilité mais aussi au point de vue résistance qui, après prise et durcissement, sera uniformément répartie dans toute la masse.

III.3.3.1.2. Serrage des bétons de sable :

Cette opération consiste à accroître la compacité du béton de sable frais et maintenir sa cohésion lors de sa mise en place. Plusieurs techniques peuvent être utilisées : damage, picage, compression et vibration. Cette dernière semble la plus efficace pour les bétons, elle s'effectue par la paroi des moules et des coffrages, et sert à diminuer le frottement interne entre grains eux-mêmes, grains-paroi du moule et grains-armatures pour les bétons armés. Elle diminue la teneur en air et augmente la fluidité du béton, ce qui permet une mise en place facile.

III.3.3.1.3. Protection contre la dessiccation :

La dessiccation est l'action d'enlever au béton durci l'humidité qu'il renferme suite à un séchage naturel qui débute dès qu'une surface est soumise à une humidité relative externe inférieure à celle régnant dans le réseau poreux. Le flux d'humidité, qui entraîne une évaporation de l'eau à la surface (départ de l'eau vers l'extérieur), est induit par le déséquilibre d'humidité relative qui va engendrer une perte relative de masse et une apparition des microfissures à la surface du béton. La cure des surfaces du béton est réalisée soit par humidification, soit par application d'un produit de cure (adjuvant) ou d'une feuille de matière plastique.

III.3.3.1.4. La maniabilité :

La maniabilité d'un béton est une qualité aussi importante que sa compacité. Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps dicté par la particularité du mélange (c'est-à-dire le diamètre maximal des grains).

Pour apprécier cette caractéristique nous avons utilisé le cône d'Asrams pour déterminer la maniabilité du béton de sable. L'essai utilisé est celui décrit par la norme NFP 18-451. Il consiste à remplir le cône d'Asrams de trois couches du béton d'égal volume et de piquer chaque couche de 25 coups par une tige en enfonçant légèrement cette dernière dans la couche précédente. Après l'achèvement de la dernière couche, la surface de cette dernière est arasée. Le cône est ensuite retiré et l'affaissement peut ainsi être mesuré.

III.3.3.1.5. Essai de prise :

Des phénomènes chimiques, physico-chimiques et mécaniques interviennent dans les premières heures qui suivent le gâchage. Leur manifestation la plus importante est la prise : c'est la propriété qu'ont les liants hydrauliques de passer d'une consistance fluide à une consistance solide quand ils sont associés à l'eau. Le temps de prise, qui est le temps écoulé entre la fin de gâchage et le début de prise, est mesuré à l'aide de l'aiguille de Vicat. On dit qu'il y a « début de prise » lorsque l'aiguille n'est pas capable de transpercer la totalité de la pâte mais s'arrête au moins à 2,5 mm du fond du moule : des aiguilles d'ettringite apparaissent.

La fin de prise se situe au moment où l'aiguille de Vicat s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur, une faible quantité de l'anhydre a été hydratée et la résistance en compression continue à accroître au fur et à mesure que l'hydratation progresse.

III.3.3.1.6. Essai sur la masse volumique :

La masse volumique est la masse d'un échantillon Effectué sur du béton frais occupant l'unité de volume, tous vides inclus. Cette caractéristique est très importante, elle indique la qualité en terme de compacité et par conséquent en terme de résistance mécanique.

Les mélanges, dont la masse volumique est relativement grande, ont des résistances élevées. La masse volumique des bétons de sable de dune varie autour de 2100 kg/m^3 [7, 12], contre une masse volumique de 2500 kg/m^3 pour les bétons classiques.

III.3.3.2. Essais sur béton de sable durci:

a. Essais de compression

La caractérisation du comportement en compression est effectuée sur des éprouvettes cubiques de $(10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3)$ mûries à l'eau, conformément à la norme NEP 18-406.

Les résultats de la résistance à la compression sont obtenus aux échéances 7, 14 et 28 jours. Chaque valeur de résistance est la moyenne de trois essais de compression par échéance et par matériau. La machine utilisée pour l'écrasement uniaxial des cubes est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500KN en compression. Afin d'avoir des valeurs correspondant aux résultats obtenus par des éprouvettes cylindriques (norme ENV206), on multiplie les résultats obtenus par un coefficient d'équivalence égale à 0,83. (Rapport entre cube et cylindre : $f_{\text{cyl}}/f_{\text{cube}}=0,83$) [38], (Photo 12).



Photo 12 : Essai de compression

b. Essais de traction

Le comportement en traction est caractérisé par l'essai de traction par flexion effectué sur des éprouvettes prismatiques de (4X4X16 cm³) mûries à l'eau. L'évolution des résistances en traction est suivie par des essais à 7, 14 et 28 jours. Chaque valeur de résistance est la moyenne de trois essais de traction par flexion, par échéance et par matériau.

L'appareil utilisé pour l'essai est une machine d'essai de flexion (appareil Simrup) [30], (Photo 13).



Photo 13 : Essai de traction par flexion

c. Mesure de retrait :

Afin de comprendre le comportement hygrométrique de notre béton, nous avons décidé de mesurer le retrait. La mesure de retrait s'effectue sur des éprouvettes prismatiques de dimension (4X4X16 cm³), selon la norme (NFP 15-433). Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans le déformètre, qui permet le suivi de la variation de longueur de l'échantillon. Le retrait de chaque béton est mesuré sur deux prismes, chaque jour après le démoulage, durant 28 jours.



Photo 14 : Préparation des éprouvettes pour mesurer le retrait du BS



Photo 15 : Appareil pour la mesure du retrait

d. Capacité d'absorption d'eau :

La capacité d'absorption d'un béton donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de tester la compacité de mélange. Plus le béton est compact plus sa compacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche. Cette capacité d'absorption est déterminée par une méthode simple, les éprouvettes de mortier sont pesées après leur passage à l'étuve à 105°C d'où elles ne sont retirées qu'après stabilisation de leur poids (soit P_s), ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau pendant 24 heures, puis retirées et pesées, (soit P_h). Les valeurs sont prises par la moyenne de trois pesées par éprouvettes de chaque béton. La capacité d'absorption est donnée par la formule suivante :

$$A\% = P_h - P_s / P_s \times 100$$

e. Calcul du pourcentage de fines : [29]

Les fines désignent l'ensemble des grains passant au tamis de 80 μm , qu'il s'agisse des ciments, d'additions de fillers ou de sable. La détermination du volume optimal des fines donne la compacité maximale (porosité minimale) de mélange et donne aussi la résistance maximale.

On calcule le dosage volumique en fines V (exprime en l/m^3) par la relation suivante :

$$V = \frac{C}{m_C} + \frac{S}{m_S} + \frac{A}{m_A}$$

Où C : dosage en ciment (kg/m^3) de densité m_C ;

S : dosage en fines des granulats de densité m_S ;

A : dosage en addition minérales de densité m_A ;

chapitre IV

présentation et discussion des résultats

IV.1.Introduction :

Le but de notre recherche expérimentale est de trouver la formulation optimale du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux (sable de dune, fibre d'alfa et fibre du palmier dattier) .

De façon générale, le programme expérimental de ce mémoire est d'étudier l'effet des différents paramètres sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton de sable et de rechercher une formulation optimale du béton de sable.

Premièrement on a fait la correction granulométrique de sable d'oued par l'ajout de sable de dune, puis on a recherché la compacité maximale du béton de sable par la substitution d'une partie de sable par une partie de filler calcaire, et après on a introduit le superplastifiant, tout en essayant de réduire la quantité d'eau de gâchage et à la fin on a introduit les ajouts (fumée de silice, fibres d'alfa et fibres du palmier dattier).

Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les résultats obtenus avec sept séries de bétons [F-SO/SD], [F-FC], [F-SP], [F-E/C], [F-FS], [F-FP] et [F-FA], en vue d'améliorer la qualité du béton de sable à l'état frais et durci.

Nous rappelons que notre étude expérimentale est basée sur deux étapes pour la formulation du béton de sable :

- **1^{er} étape** : optimisation de la formulation du béton de sable.
- **2^{ème} étape** : Formulation du béton de sable avec des fibres végétales dans le cadre de valorisation des matériaux locaux.

IV.2. L'effet des différents paramètres sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton de sable :

1^{er} étape : optimisation de la formulation du béton de sable

IV.2.1 : la maniabilité :

1. L'effet du rapport SO/SD sur la maniabilité du béton de sable :

La figure (19) montre que l'affaissement augmente avec l'augmentation du rapport SO/SD, tant que ce rapport augmente le module de finesse M_f augmente aussi et donc la maniabilité du BS s'améliore. [28]

La figure (19) montre aussi l'évolution de la maniabilité en fonction du rapport SO/SD.

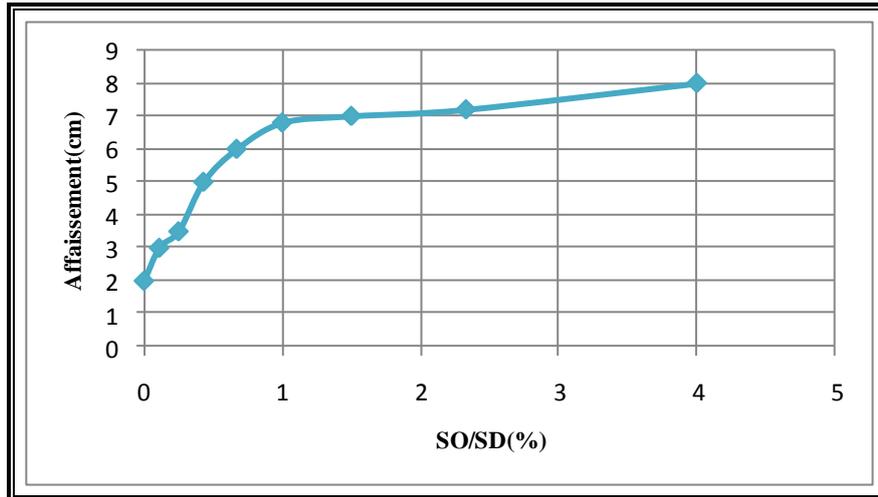


Figure (19) : Effet du rapport SO/SD sur l'affaissement

2. L'effet du dosage de filler calcaire sur la maniabilité du béton de sable :

La figure (20) montre l'évolution de la maniabilité en fonction du dosage de filler calcaire, et d'après la figure (20) on remarque que l'affaissement diminue avec l'augmentation du dosage de filler calcaire (de 0 à 250 Kg/m^3), tant que le dosage de filler calcaire augmente, le pourcentage des fines augmente aussi, et le rapport E/C est fixe, on remarque une diminution de l'affaissement du béton de sable, il faut donc augmenter la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage des différentes compositions du béton de sable.

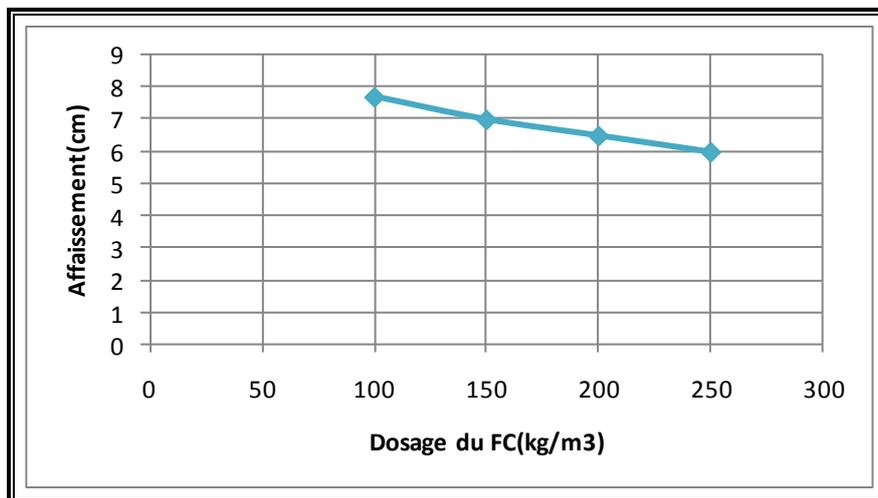


Figure (20) : Effet du dosage du FC sur l'affaissement

3. L'effet du dosage de superplastifiant sur la maniabilité du béton de sable :

L'évolution de l'affaissement en fonction de dosage du superplastifiant, tout en gardant le rapport E/C constant ($E/C=0.80$), est présentée à la figure (21). Cette figure montre que si on augmente le dosage du superplastifiant, l'affaissement du béton augmente aussi, cet affaissement passe de 6 cm pour un dosage de 0 % à 23.5 cm pour un dosage de 2.5 %, donc on assiste à une amélioration de la maniabilité, ceci est due à l'action dispersante du superplastifiant qui augmente la maniabilité du béton et donne une meilleure distribution des grains de ciment et par conséquent, une meilleure hydratation [40], photo (16) et (17).

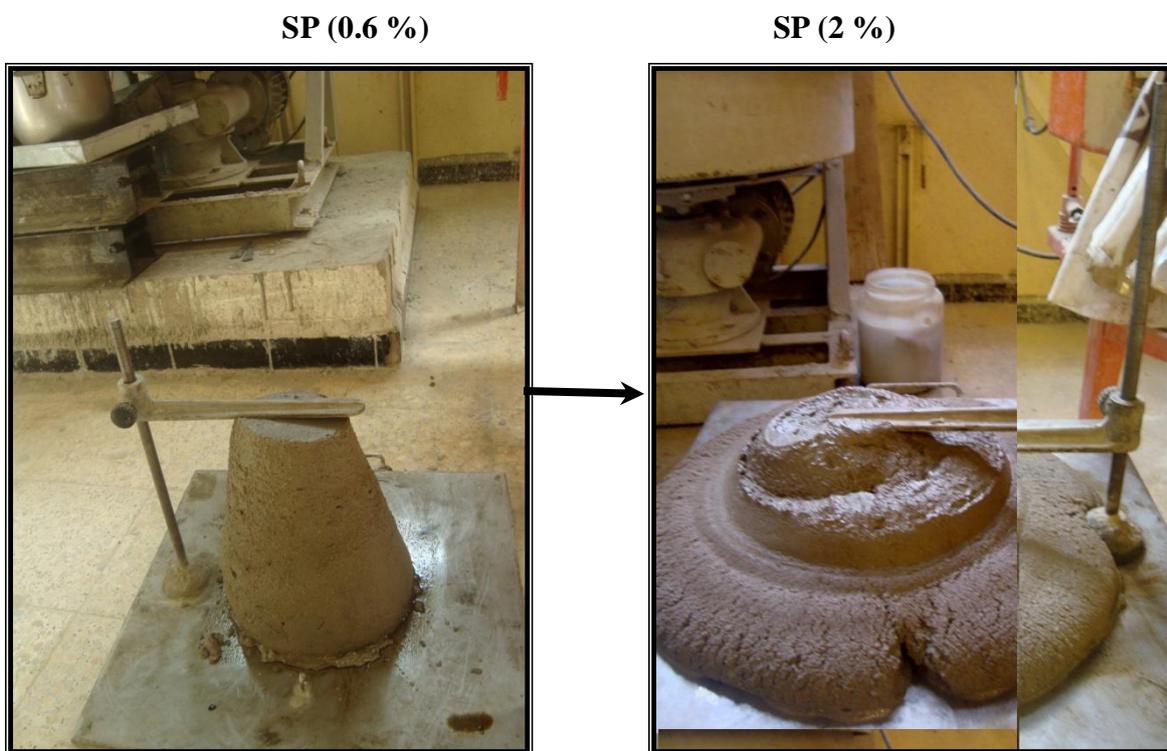


Photo 16: Effet du dosage de superplastifiant

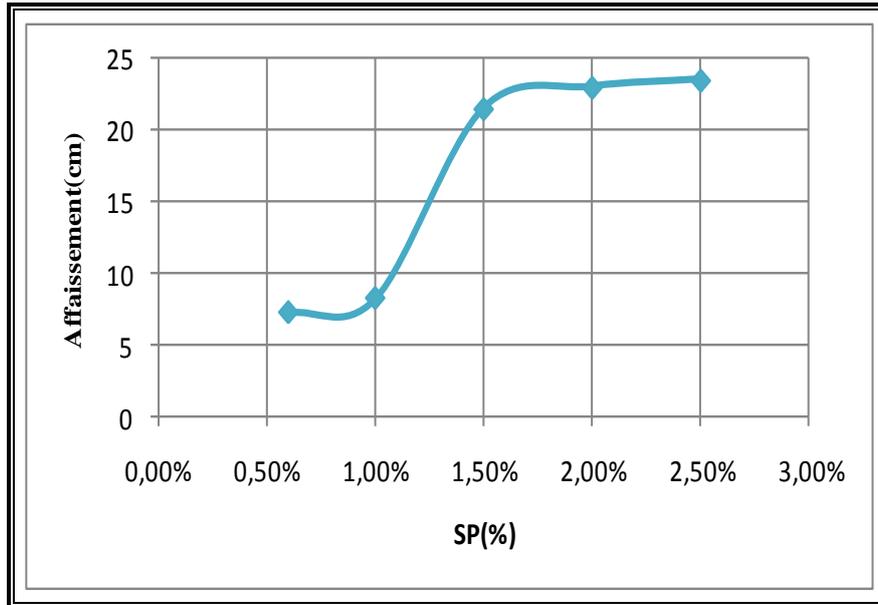


Figure (21) : Effet du dosage du superplastifiant sur l'affaissement

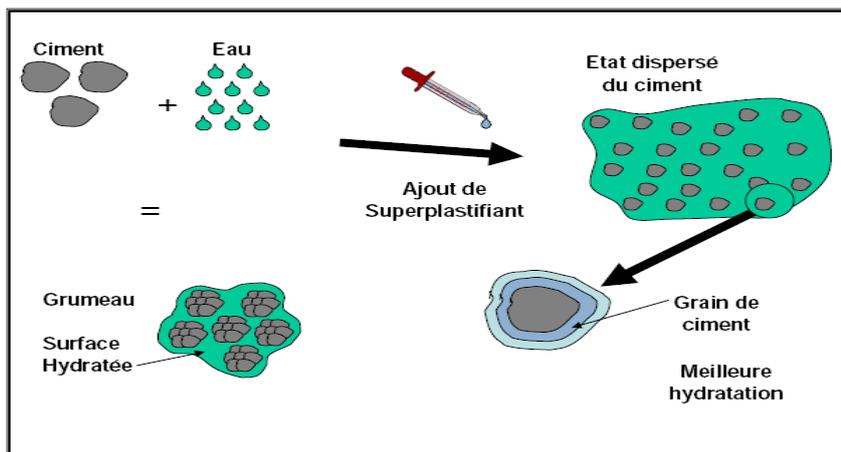


Photo 17 : Effet de l'ajout du superplastifiant sur la dispersion des grains de ciment

(amélioration du rendement cimentaire) [40]

4. L'effet du rapport E/C sur la maniabilité du béton de sable :

La figure (22) montre que l'affaissement diminue avec la réduction du rapport eau/ciment (E/C [0.75-0.60]), et d'après la figure (22), on remarque que le rapport E/C=0.65 est le rapport qui donne un béton de sable plastique, son affaissement est égal à 7.5 cm. figure (22), photo 18.

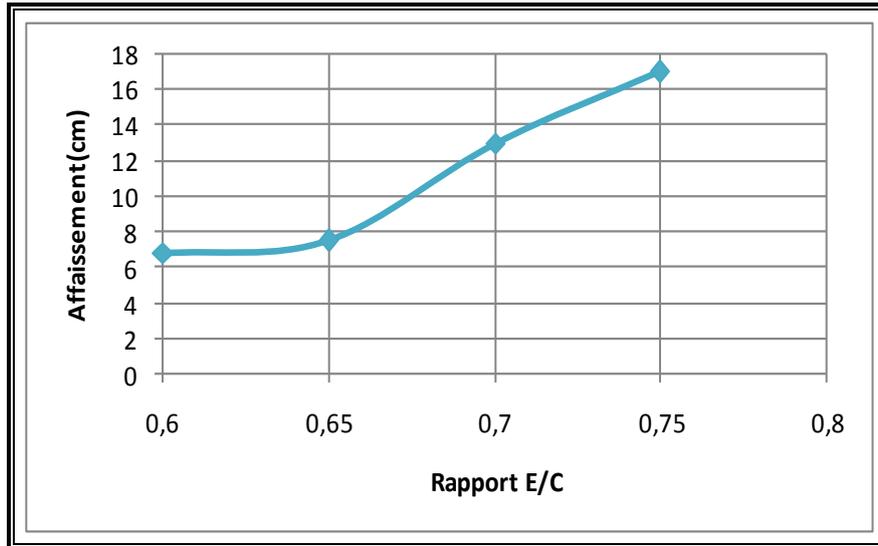


Figure (22) : Effet du rapport E/C sur l'affaissement du BS

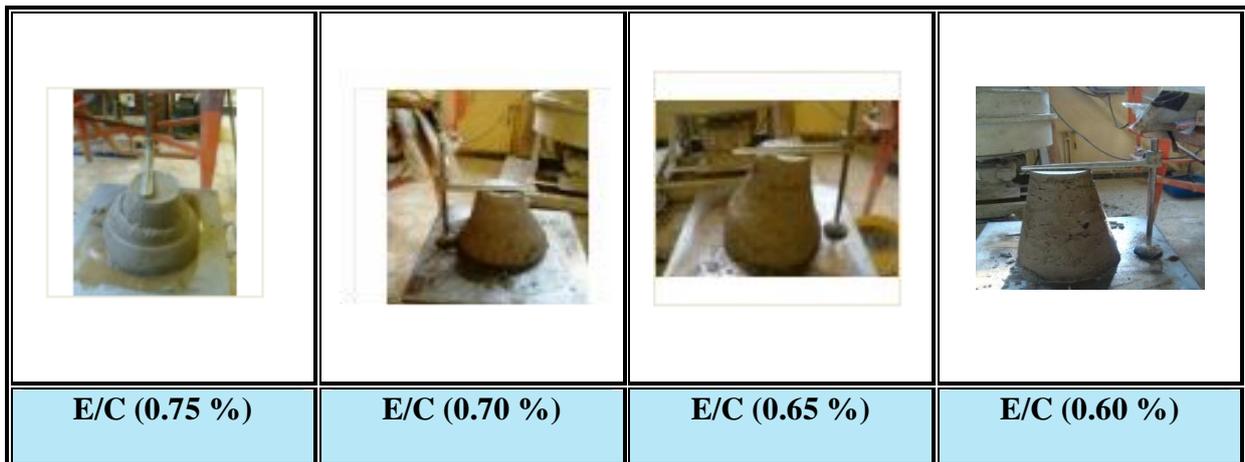


Photo 18 : Effet de rapport E/C

5. L'effet de la fumée de silice sur la maniabilité du béton de sable :

La figure (23) montre l'évolution de la maniabilité en fonction du dosage de fumée de silice, et d'après la figure (23) on remarque que l'affaissement augmente avec l'augmentation du dosage de la fumée de silice, on a obtenu des mélanges avec une cohésion très forte avec très peu de ressassage, pour les trois dosages de la FS, du à la finesse de celle-ci; car le diamètre des grains est 100 fois plus petit que celui des petits grains de ciment [26].

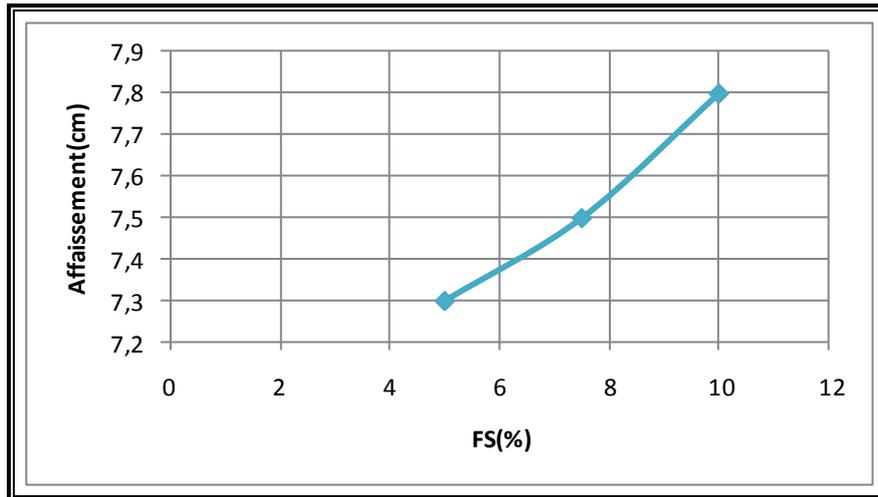


Figure (23) : Effet du dosage de la fumée de silice sur l'affaissement

IV.2.2 : La résistance à la compression R_C :

La résistance à la compression a été mesurée à l'âge de 7, 14 et 28 jours selon la norme NF P18-406

1. L'effet du rapport SO/SD sur la résistance à la compression du béton de sable :

La figure (24) montre l'évolution de la résistance à la compression du BS en fonction du rapport SO/SD et du temps, d'après ces résultats on remarque que la résistance à la compression R_C augmente avec l'augmentation du rapport SO/SD et avec le temps jusqu'à la valeur de SO/SD = 2.33 qui correspond à la compacité optimale de sable ($R_{C28} = 12.4$ MPa) au-delà de SO/SD = 2.33, on constate une chute de la résistance à la compression, et on explique cette diminution par la diminution de la compacité du mélange.

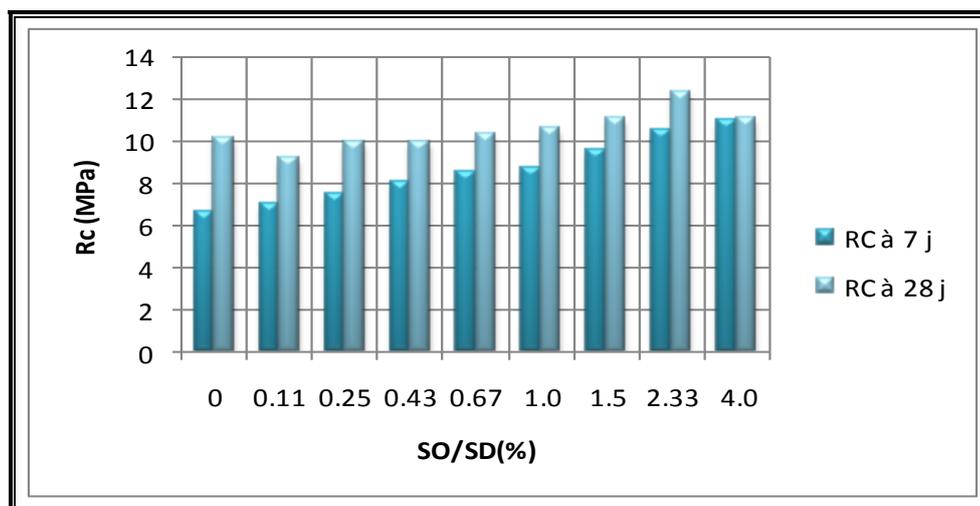


Figure (24) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du rapport SO/SD

2. L'effet du dosage de filler calcaire sur la résistance à la compression du béton de sable :

La figure (25) montre l'évolution de la résistance à la compression (R_c) en fonction du temps et du dosage de FC, pour les quatre (4) mélanges du béton de sable, on remarque que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de dosage de filler calcaire jusqu'à la valeur égale à 200 kg/m^3 , et l'augmentation du dosage au delà de 200 kg/m^3 n'apporte rien de plus, mais au contraire elle fait chuter la résistance à la compression, cela traduit que l'augmentation de dosage de filler calcaire, c'est-à-dire l'augmentation des fines jusqu'à ce que les vides soient complètement remplis, les fines commencent à occuper la place des grains de sable ce qui diminue le dosage de ce dernier et par conséquent la compacité du mélange.

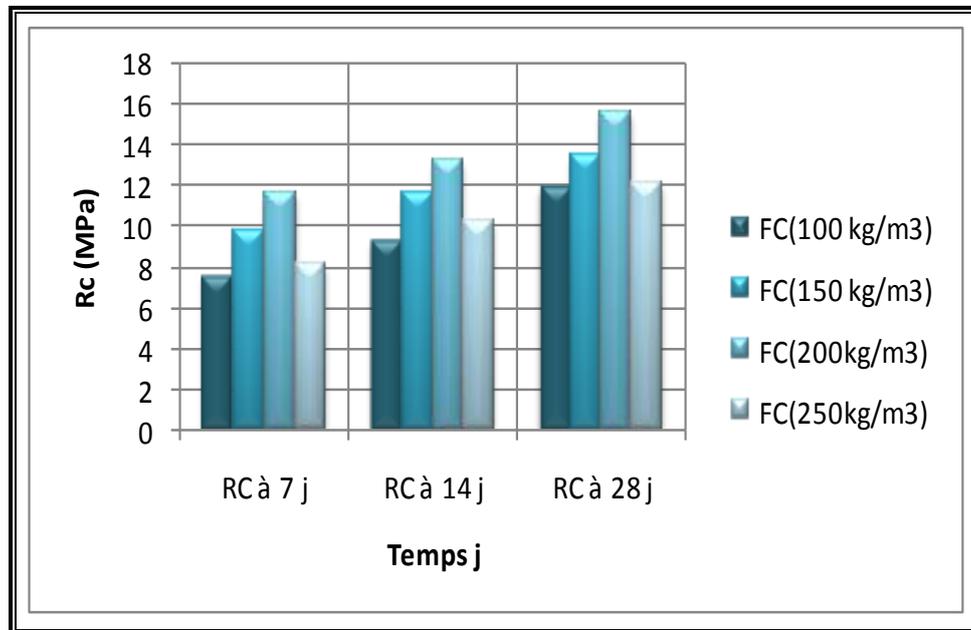


Figure (25) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du dosage en FC

3. L'effet du dosage de superplastifiant sur la résistance à la compression du béton de sable :

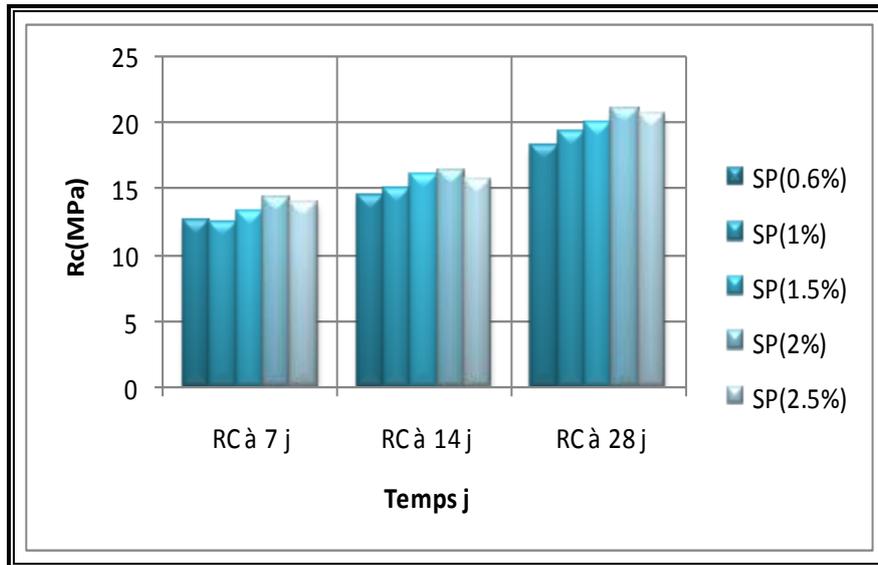


Figure (26) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du dosage en SP

L'évolution de la résistance à la compression (R_C) avec le dosage du superplastifiant est donnée par la figure(26), on constate que R_C augmente avec le dosage du superplastifiant et avec l'âge du béton de sable.

On a remarqué aussi qu'il y a une importante amélioration de R_C pour les dosages élevés, pour le dosage de 2 % la résistance à la compression à 28 jours est améliorée de 34.61% et la R_{C7} est améliorée de 22.10 % par rapport à un BS sans adjuvant. Cette amélioration est due à l'influence du superplastifiant sur les grains du ciment, car en s'adsorbant à la surface des grains de ciment les superplastifiants diminuent les forces d'attraction entre elles et donnent naissance à des forces de répulsion empêchant ces grains de ciment de flocculer [40] ce qui va donner des faces de grains de ciment en plus, qui vont contribuer à l'hydratation et par suite améliorer la résistance mécanique.

4. L'effet de la diminution du rapport eau/ciment (E/C) sur la résistance à la compression du béton de sable :

La figure (27) montre que la résistance à la compression est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand, et ceci s'explique par la relation directe entre la résistance et la porosité de la pâte de ciment.

La résistance à la compression R_{C28} augmente de 4.02 %, lorsque E/C passe de 0.75 à 0.70, elle augmente de 6.81 %, lorsque E/C passe de 0.70 à 0.65 et augmente de 3.78 %, lorsque E/C passe de 0.65 à 0.60, cela est dû à la diminution du dosage d'eau et l'effet du superplastifiant qui contribuent à tous les deux à l'amélioration des résistances à la compression, d'après les 4 mélanges pour cette série, tout en notant que la meilleure résistance est donnée par la formulation (F-E/C(0.60).

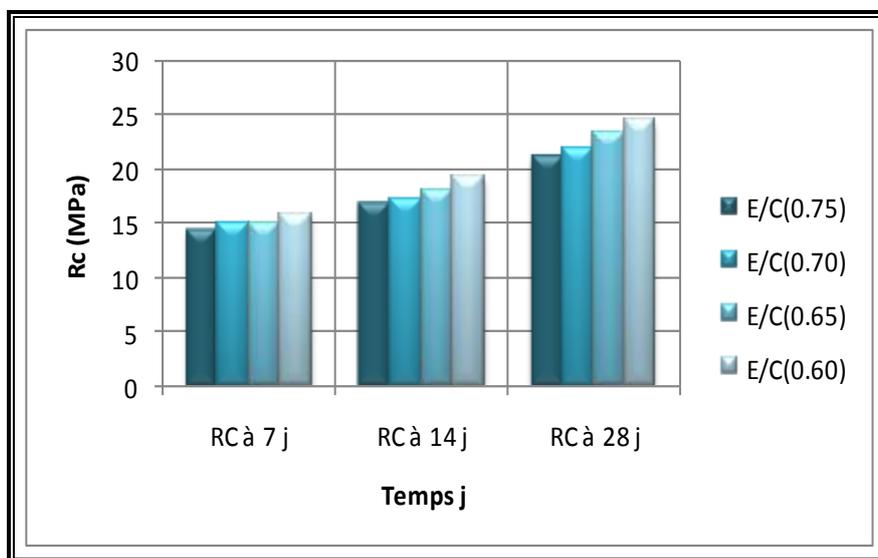


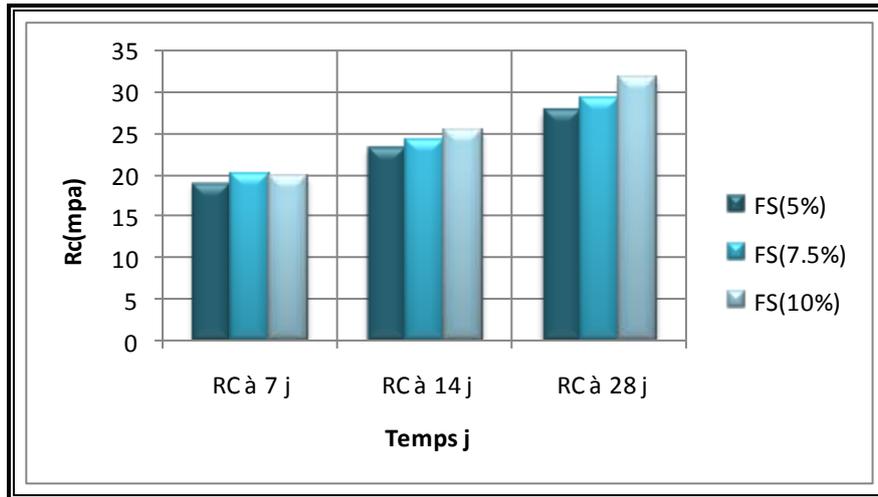
Figure (27) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du rapport E/C

5. L'effet de la fumée de silice sur la résistance à la compression du béton de sable :

Parmi les additions minérales pouvant être utilisées dans la formulation des bétons, les fumées de silice jouent un rôle particulier du fait, d'une part, de leur composition (taux de silice supérieur à 85 %)[fiche technique] et, d'autre part, de leur finesse (supérieur à 10000 m²/kg, selon le mode opératoire BET), plusieurs études montrent que la présence de la fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment en favorisant la création de site de germination des cristaux de portlandite Ca(OH)₂, dès les premières minutes qui suivent le début de la réaction, et l'effet d'accélération des FS est plus important lorsque celles-ci sont utilisées avec un fluidifiant.

Cet effet accélérateur des FS sur l'hydratation du ciment, combiné à l'effet de remplissage dû à leur extrême finesse peut conduire à de meilleures résistances à court terme du béton [29].

La figure (28) montre une évolution de la résistance à la compression en fonction du temps et du dosage de fumée de silice, on remarque que R_{C28} augmente de 33.43% pour [F-FS (10%)], par rapport au béton de sable témoin à 28 jours [F-E/C(0.60)], on explique cette amélioration importance de la résistance à la compression par l'effet pouzzolanique du fumée de silice avec l'hydroxyde de calcium qui se produit par l'hydratation du ciment portland et par l'effet de FS comme filler qui augmente aussi la compacité de mélange.

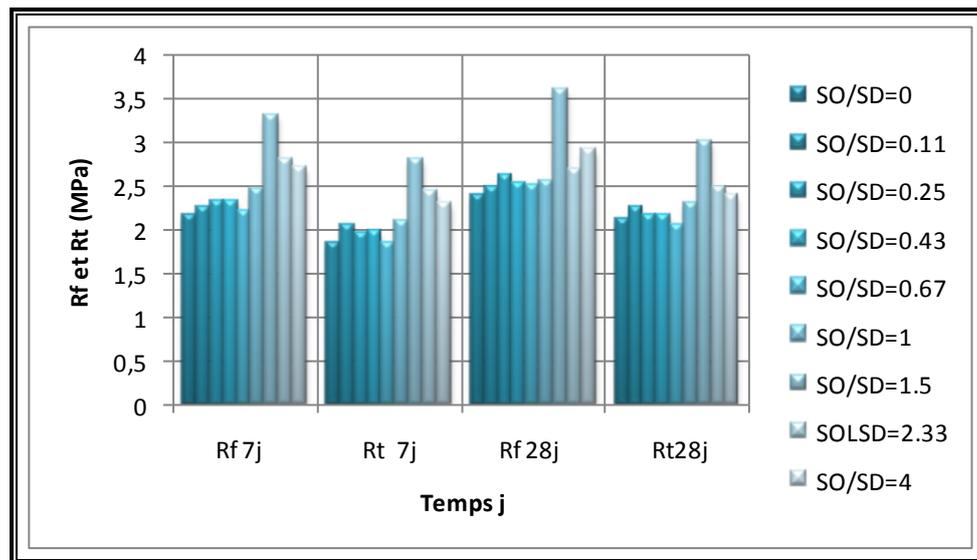


Figure(28) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de FS

IV.2.3 La résistance à la traction R_t :

1. L'effet du rapport SO/SD sur la résistance à la traction du béton de sable :

L'évolution de la résistance à la traction avec le rapport SO/SD est donnée par la figure (29). On constate que R_t augmente avec l'augmentation du rapport SO/SD, la granulométrie du sable a aussi son influence sur la résistance R_t puisque, à un rapport E/C fixe, le béton de sable a donné des résistances plus élevées que celle du béton de sable de dune (SO/SD=0 et le SD100 %), le BS avec le rapport (SO/SD= 2.33) donne de meilleurs résultats que les autres bétons de cette série, grâce à sa bonne répartition granulaire.



Figure(29): L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction du rapport SO/SD

2. L'effet du dosage de filler calcaire sur la résistance à la traction du béton de sable :

La figure (30) montre l'évolution de la résistance à la traction (la résistance en flexion) en fonction du temps et du dosage en FC.

Les résistances des bétons tendent vers une valeur maximale pour un dosage en filler égal à 200 kg/m^3 , l'augmentation du dosage au delà de 200 kg/m^3 (pour notre sable) n'apporte rien de plus, mais au contraire il fait chuter les résistances. À 28, nous avons une résistance à la traction maximale pour le béton de sable [F-FC (100)] au dosage 100 kg/m^2 de 2.867 MPa , comme on a obtenu une résistance de 3.1 MPa pour [F-FC (150)] à un dosage de 150 kg/m^2 , pour un dosage de 200 kg/m^2 , on a une résistance de 3.46 MPa et pour un dosage de 250 kg/m^2 on a obtenu une résistance à la traction minimale de 3.05 MPa . Ces résultats restent acceptables comparés à ceux obtenus par [9] et [12]. Figure (30)

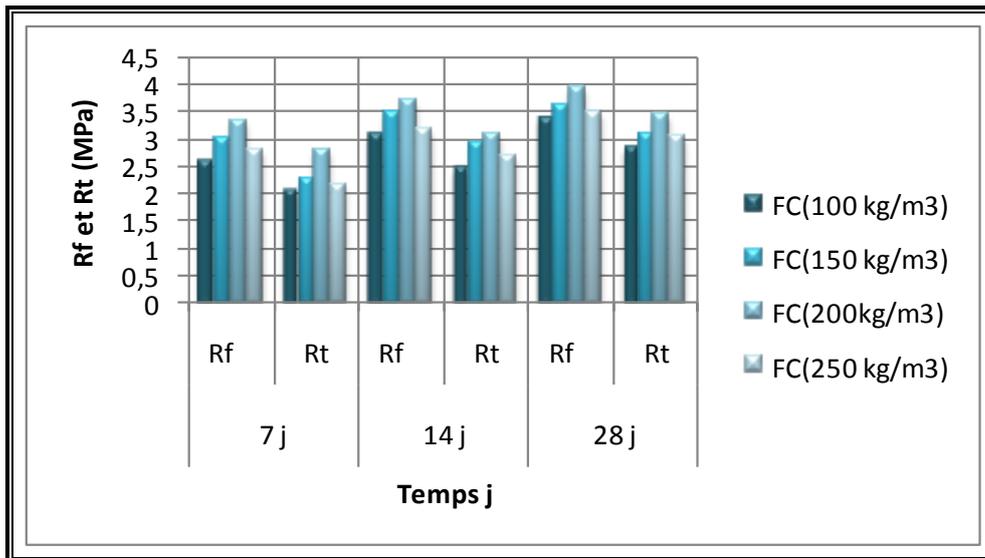
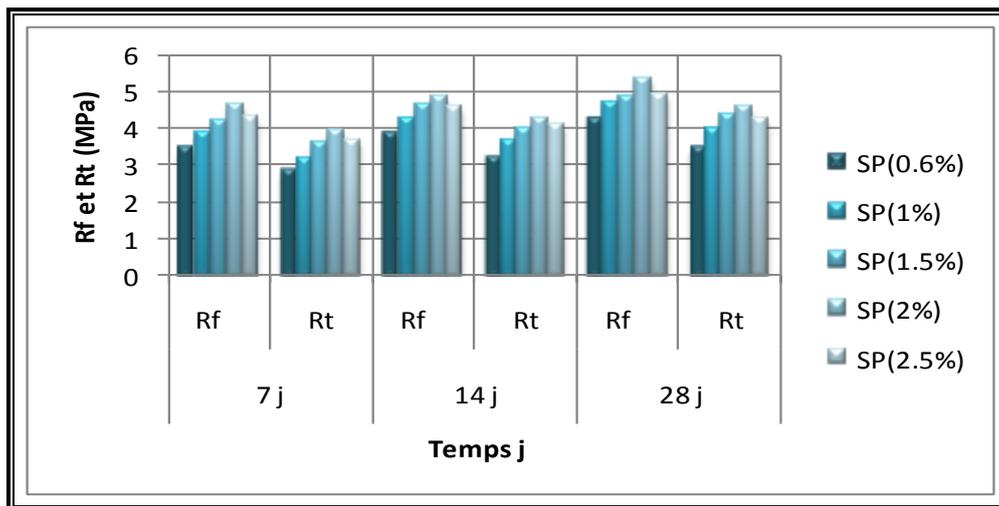


Figure (30) : L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction du temps et du dosage en FC

3. L'effet du dosage de superplastifiant sur R_t du béton de sable :

La figure (31) montre l'évolution de la résistance à la traction R_t (la résistance à la flexion R_f) en fonction du dosage du superplastifiant, on constate que R_t augmente avec le dosage du superplastifiant et avec l'âge du béton. Qu'il on constate aussi qu'il y a une amélioration avec le béton [SP (0.6 %)] de 3.5 MPa pour un dosage 0.6 %, en comparant ce résultat à celui du béton sans superplastifiant, on remarque que la résistance à la traction maximale pour le béton [SP (2 %)] de 4.6 MPa, cette amélioration est due à l'influence du superplastifiant sur les grains du ciment [40].

On constate aussi qu'il n'y a pas une amélioration remarquable de R_t après le dosage de 2 %, ce qui explique que nous sommes au voisinage du point de saturation, parce que au delà de ce dernier on va s'attend à une baisse de la résistance à la traction ($R_t = 4.3$ MPa).



Figure(31) : L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du temps et du dosage en SP

4. L'effet de la diminution du rapport eau/ciment sur la résistance à la traction (la résistance à la flexion R_f) du béton de sable :

La figure (32) montre que la résistance à la traction R_t et la résistance à la flexion R_f est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand, et ceci s'explique par la relation directe entre la résistance et la porosité de la pâte de ciment.

La résistance à la traction à 28 jours augmente de 7.14 % lorsque E/C passe de 0.75 à 0.65, mais on enregistre que la valeur optimale de la résistance à la traction donnée par [F- E/C (0.60)] ($R_t = 5.0$ MPa), ces résultats restent acceptables comparés à ceux obtenus par [33], [9] et [12].

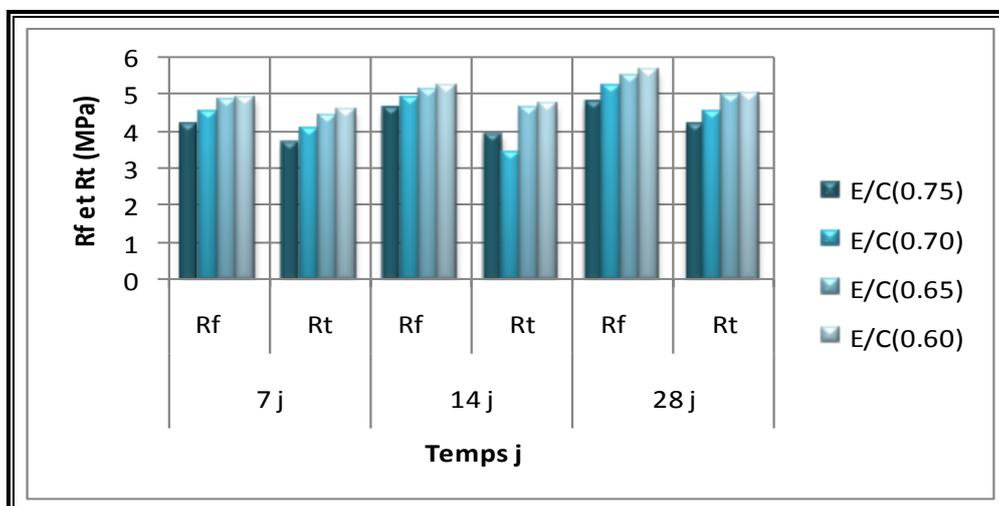


Figure (32) : L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du rapport E/C

5. L'effet de la fumée de silice sur la résistance à la traction du béton de sable :

La figure (33) montre une évolution de la résistance à la traction R_t et la résistance à la flexion R_f en fonction du temps et du dosage de la fumée de silice, d'après la figure (33) on constate que la résistance à la traction R_t (la résistance à la flexion R_f) augmente avec l'augmentation du dosage de la fumée de silice, on remarque aussi que R_{t28} augmente de 8.4 % pour [F-FS (10%)], par rapport au béton de sable témoin à 28 jours [F-E/C(0.60)], on explique cette amélioration importante de la résistance à la traction R_t (R_f) par l'effet pouzzolanique de la fumée de silice avec l'hydroxyde de calcium qui se produit par l'hydratation du ciment portland et par l'effet de la fumée de silice comme filler qui augmente aussi la compacité de mélange.

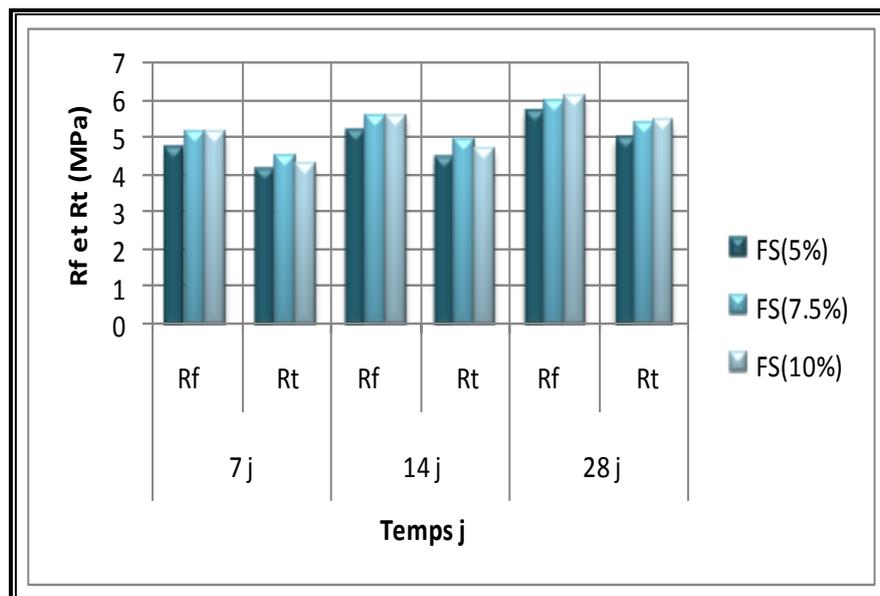


Figure (33): L'évolution de la résistance à la traction et la résistance en flexion en fonction temps et du dosage du FS

IV.2.4 Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations des bétons de sable :

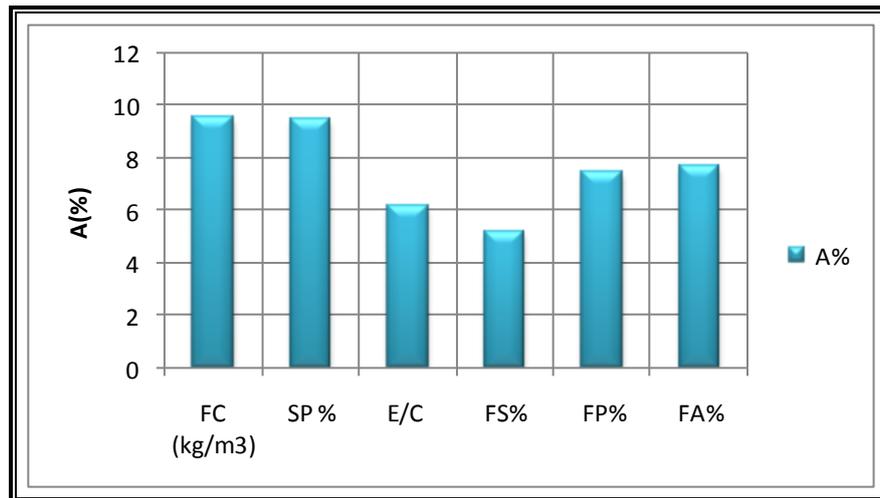
La capacité d'absorption d'un béton de sable donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores), c'est une manière comme une autre de tester la compacité du mélange, plus le béton de sable est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc il est plus étanche.

Rappelons que l'essai consiste à mettre les éprouvettes du béton dans l'étuve jusqu'à l'obtention d'un poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h (c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau) afin de calculer le volume des vides du béton [30].

Nous remarquons des résultats différents de la capacité d'absorption d'eau. et également, des améliorations de compacité avec les additions introduites à notre formulation de base et en particules de la fumée de silice. A cause de leur grande finesse, les particules de ce dernier peuvent remplir les vides qui se trouvent entre les particules les plus grosses de ciment. Surtout lorsque celles-ci ont défloculé une quantité convenable de superplastifiant. Le meilleur résultat ayant enregistré la plus faible capacité d'absorption est donné par le mélange [F-FS10%),

Tel qu'il est mentionné sur l'histogramme présenté par la figure (34). quand les capacités les plus élevées sont données par les mélanges [F-FC (200)], [F-SP (2%)], [F-FP (1%)] et [F-FA (1%)], on explique l'augmentation de la capacité d'absorption d'eau (A%) pour le mélange [F-FC(200)], malgré cette formulation correspondant à la capacité optimale pour cette série de formulation du BS, par l'effet de rapport eau/ciment ($E/C=0.80$) sur la porosité du BS, tant que le rapport E/C du mélange est plus élevé, sa porosité est importante et donc sa capacité d'absorption est plus élevée ; et on constate le même résultat pour le mélange [F-SP (2%)]. pour la formulation du BS de fibres, on remarque l'augmentation de la compacité d'absorption d'eau (A%), cela est dû à l'augmentation de dosage en fibres et cela peut être dû aussi aux fibres qui sont hydrophiles et qui ont une capacité d'absorption importante d'où une absorption d'eau maximale.

D'après les résultats de la figure (34), nous avons remarqué qu'il y a une relation irréversible entre la capacité d'absorption et la résistance à la compression. On constate que la capacité d'absorption d'eau s'affaiblit (la compacité est très élevée) avec l'augmentation de la résistance en compression. Le matériau qui donne la meilleure résistance à la compression est le matériau la plus faible en capacité d'absorption.



Figure(34) : Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations du BS

IV.2.5 Le retrait et la perte de masse des différentes formulations des bétons de sable:

IV.2.5.1 Mesure des variations de longueur (retrait) NF P 15-433 [23]

On sait que la réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume, appelé contraction. L'eau qui s'évapore d'un mortier conservé à l'air libre provoque le retrait, qui est la conséquence de la perte d'eau libre, lorsque cette eau se retire du matériau, une contraction se produit automatiquement.

Soit : $d\ell(t)$: la valeur lue sur le comparateur au temps t .

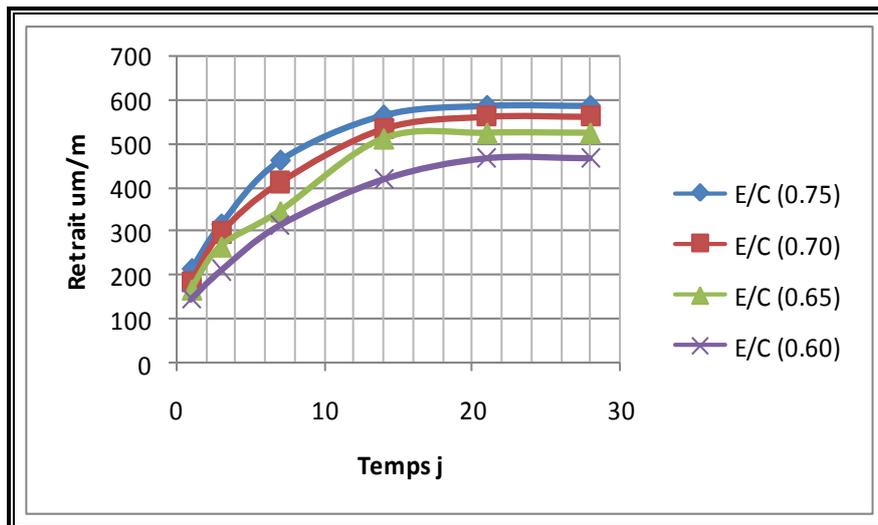
L : la longueur de base prise égale à 160 mm.

L'éprouvette a une longueur au temps considéré :

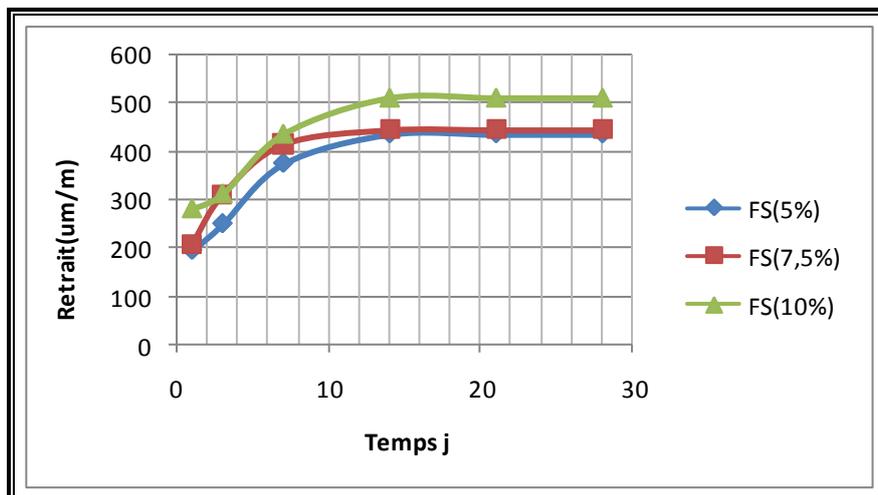
$$\ell = L - d\ell(t).$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = d\ell(t)/L$$



Figure(35) : Déformation du retrait du béton de sable [F-E/C]



Figure(36) : Déformation du retrait du béton de sable [F-FS(%)]

La figure (35) montre l'évolution de la déformation du retrait du BS en fonction du temps et en fonction du rapport E /C. D'après ces résultats, on remarque que le retrait est plus important que le rapport E/C est le plus grand [E/C(0.75-0.60)], on explique cette augmentation de la déformation du retrait du BS par l'excès d'eau par rapport à la quantité nécessaire à l'hydratation du ciment. D'après ces résultats on a sélectionné la formulation [F-E/C (0.60)] qui donne le meilleur résultat. À partir la figure (35), on remarque une amplitude de retrait importante de 467,5 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 28 jours (30% SD+70% SO), K.Gadri a remarqué une amplitude de 426 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 28 jours (sable concassé), Z.Boudaoud a enregistré un retrait de 678 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 30 jours (sable de dune) ; on explique la différence des résultats par la différence du type de sable

utilisé. À partir des résultats de la figure (35), on remarque que la diminution du retrait est due au faible rapport de E/C.

La figure (36) montre l'évolution de la déformation du retrait du BS en fonction du temps et en fonction du pourcentage de la fumée de silice. À partir la figure (36), on constate que le retrait du BS augmente avec l'augmentation de pourcentage du fumée de silice. On remarque une amplitude de retrait de 512.25 $\mu\text{m/m}$ à 28 jours, on explique cette augmentation de retrait par l'effet de pourcentage de fines sur le retrait du BS.

IV.2.5.2 Mesure de variation des masses :

On mesure la variation des masses, pesées à 0.1g pour chaque série d'éprouvette.

Pour chaque prisme des séries d'éprouvettes on calcule le rapport : $(\Delta M/M) \times 100$.

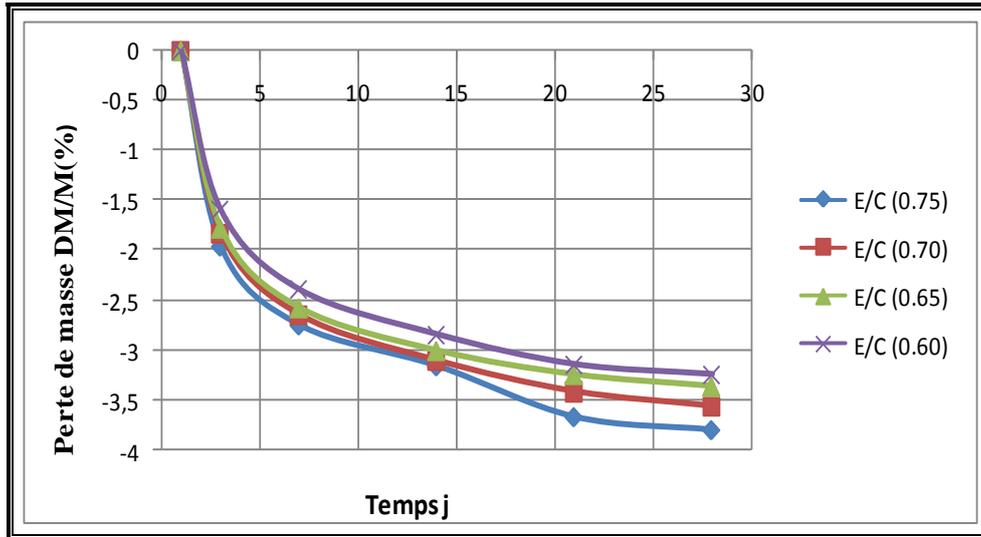
Avec :

ΔM = variation de masse par rapport à la masse au moment du démoulage.

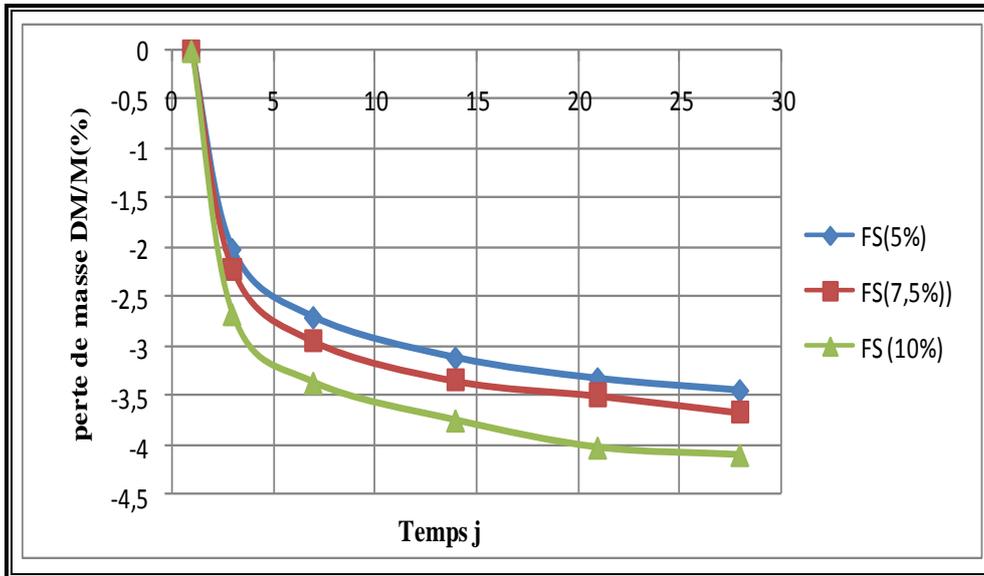
M = masse de l'éprouvette au moment du démoulage

Les résultats obtenus sont représentés par les figures (37) et (38). On sait que le retrait s'accompagne systématiquement d'une perte de masse, on remarque d'après les figures (37) et (38) que la perte de masse augmente en fonction du temps, cette perte devient plus faible à 28 jours.

D'après les résultats donnés par la figure (37), on remarque que la diminution de la perte de masse due au faible rapport E/C ; on enregistre la faible perte de masse 3.25% donnée par le mélange [F-E/C (0.60)]. A partir la figure (38), on constate que la perte de masse augmente avec l'augmentation du pourcentage de la fumée de silice, on enregistre une perte de masse minimale (3.44%) donnée par le mélange [F-FS (5%)] et une perte de masse maximale (4.10 %) donnée par le mélange [F-FS (10%)].



Figure(37) : Effet du rapport E/C sur la perte de masse du béton de sable.



Figure(38) : Effet de la fumée sur la perte de masse du béton de sable.

IV.2.6 L'effet du pourcentage de fines sur la résistance à la compression et le retrait du béton de sable:

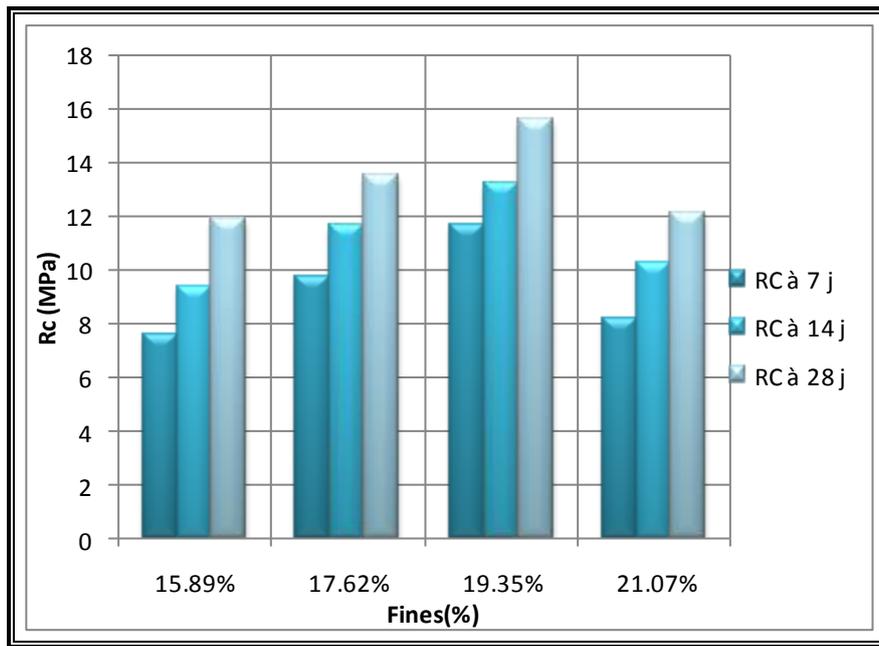
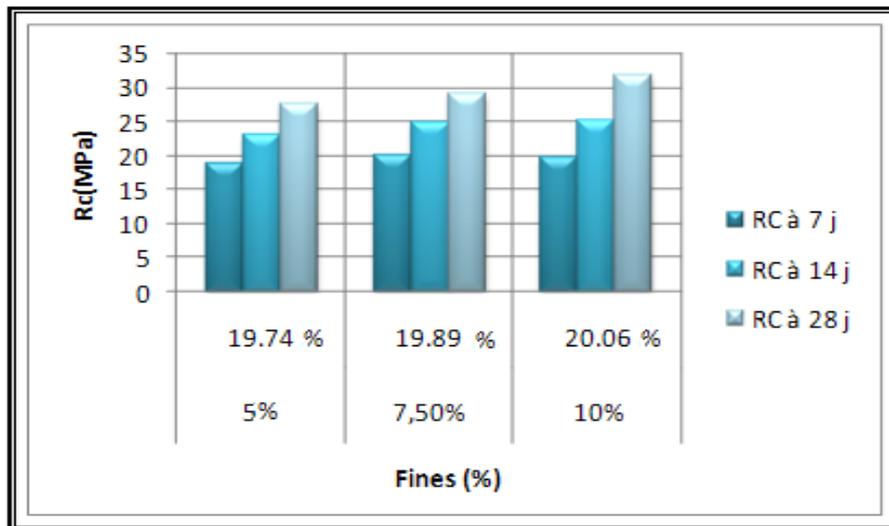


Figure (39): L'évolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de fines pour la 2^{ème} série d'essais [F-FC]



Figure(40) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de fines pour la 5^{ème} série d'essais [F-FS]

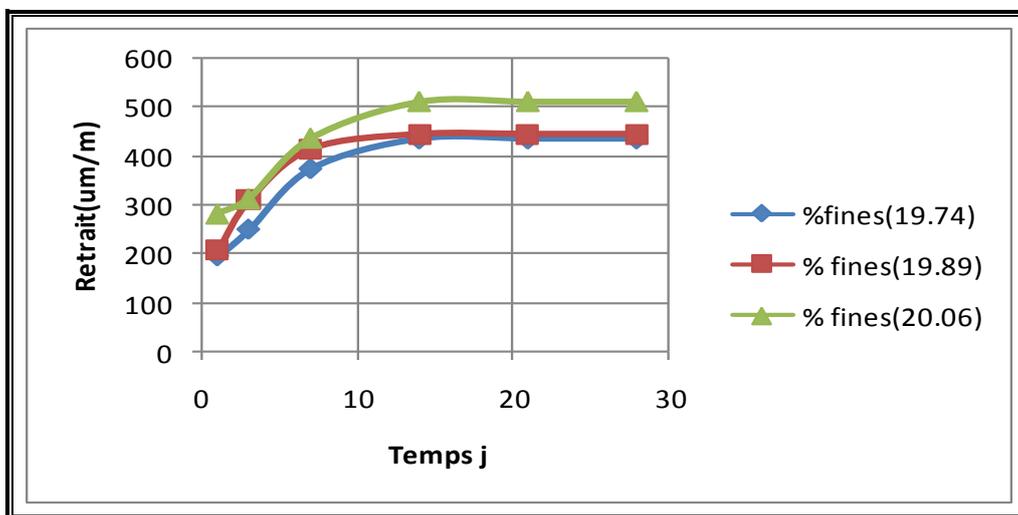
Les fines qui sont utilisées dans notre recherche expérimentale sont le filler calcaire et la fumée de silice pour atteindre la compacité optimale de mélange du BS, comme on a dit précédemment qu'il y a une relation irréversible entre la capacité d'absorption et la résistance

à la compression. On constate que la capacité d'absorption d'eau s'affaiblit (la compacité est très élevée) avec l'augmentation de la résistance en compression. On peut confirmer cette remarque par l'effet de pourcentage de fines sur la résistance en compression pour les deux séries de formulation [F-FC] et [F-FS].

D'après la figure (39), on constate que la résistance à la compression maximale correspond au pourcentage de fines égale à 19.35%, et à partir de la figure (40), on remarque aussi que la résistance à la compression maximale correspond au pourcentage de fines égale à 20.06%.

Tant que la résistance augmente, ceci revient à l'augmentation de la compacité du BS (diminution des vides provoqués par le dosage en fines). Pour le point correspondant à 20.06% de fines (figure (40)), on remarque que la plus grande résistance est atteinte, ceci permet de dire que les proportions des différents constituants sont en bon rapport, les vides existants sont occupés par les fines.

Le pourcentage des fines influencent aussi sur le retrait du béton [15], d'après la figure (41) on constate que le retrait du béton de sable avec l'ajout de la fumée de silice augmente avec l'augmentation de pourcentage des fines ou bien avec l'augmentation de pourcentage de la fumée de silice ; par contre pour la résistance à la compression, c'est l'inverse, (elle est maximale à 20.06 % de fines), donc il faut concilier la résistance à la compression importante et le retrait faible, par recherche du taux de fines acceptable.



Figure(41) : L'évolution du retrait du BS en fonction de pourcentage de fines

Pour la 5^{ème} série d'essais [F-FS]

2^{ème} étape : Formulation du béton de sable des fibres végétales dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux

1. Généralités :

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

Les fibres, selon leur nature, ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les bétons fibrés font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurelles (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées.

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques. [41]

1.1. Le rôle des fibres : [41]

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives.

Selon la forme et la nature des fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, le rôle ces fibres se traduit par des améliorations relatives à :

- la cohésion du béton frais ;
- la déformabilité avant rupture ;
- la résistance à la traction par flexion;
- la ductilité et la résistance post fissuration;
- la résistance aux chocs ;
- la résistance à la fatigue ;
- la résistance à l'usure ;
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures ;
- la tenue au feu;
- la résistance à l'abrasion.

1.2 Les caractéristiques et les propriétés des fibres :

Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

En effet, si comme on vient de le voir, les fibres ont un rôle qui apparaît commun, il se traduit par des résultats, donc des applications différentes en fonction de leur nature.

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en :

- fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose ;
- Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibres métalliques ;
- Fibres synthétiques organiques : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide. [41]

1.3 Les domaines d'application des bétons fibrés :

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil :

- béton coulé sur place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.) ;
- béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.) ;
- béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.) ;
- mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement.

Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées. [41]

2.1 Matériaux et méthodes d'essais :

La prospérité d'un pays dans le domaine de construction dépend de l'utilisation de ses ressources locales et de leur développement intégré au processus d'évolution de la société. Le manque des matériaux de construction et l'inflation de leur prix (ciment, acier, gravier, etc....), rendent l'utilisation des matériaux locaux de plus en plus nécessaires. Les pays afro-asiatiques possèdent d'énormes richesses en fibres végétales du palmier dattier et les fibres d'alfà, ces dernières présentent des propriétés mécaniques, susceptibles d'être utilisées dans les domaines techniques. En Algérie, chaque année après la récolte, ces fibres sont soit jetées ou brûlées, il n'y a uniquement qu'un faible pourcentage qui est exploité par la production artisanale. Dans le cadre de la protection de l'environnement et afin de valoriser ces ressources biologiques, on a essayé d'introduire les fibres du palmier et les fibres d'alfà dans le béton de sable afin de diminuer la fissuration et d'améliorer leur comportement mécanique.

2.1.1 Présentation de la fibre :

1^{er} cas : la fibre du palmier dattier :

Les fibres utilisées sont des fibres végétales du palmier dattier de la région de Biskra (Algérie), dont le coût est négligeable et la source renouvelable. Ces fibres ont une couleur marron à marron clair et d'une section circulaire. La longueur des fibres utilisées, dans cette étude est de 20 mm.

L'analyse chimique et l'étude de microstructure des fibres du palmier dattier, par microscope électronique à balayage à l'institut du Pin de Bordeaux en France, sont données par M.M Khenfer [20]. Cette analyse montre la présence d'atomes de carbone et d'oxygène avec un pourcentage atomique important par rapport aux autres éléments et que le carbone est l'élément le plus prépondérant, ce qui affirme la présence des groupes carboxyliques provenant des constituants de la cellulose. L'examen de la texture des fibres utilisées par MEB est présenté aux photos de 1 à 5 [20].

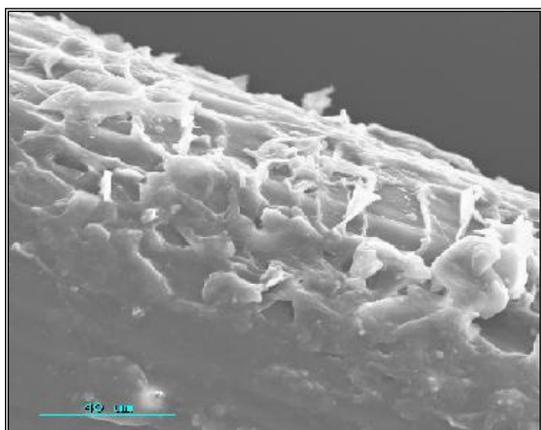


Photo 19: Observation de la texture de la fibre du palmier par MEB [20]

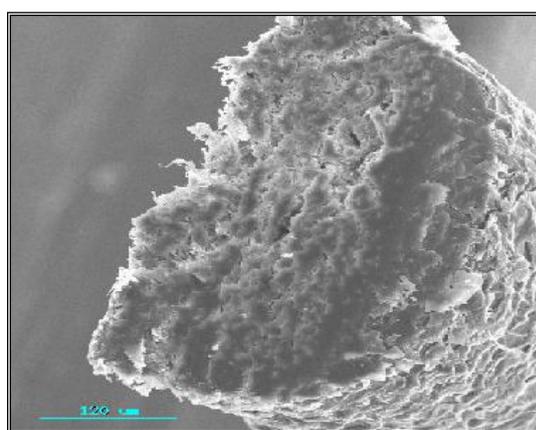


Photo 20: Coupe transversale de la fibre du palmier sous MEB [20]

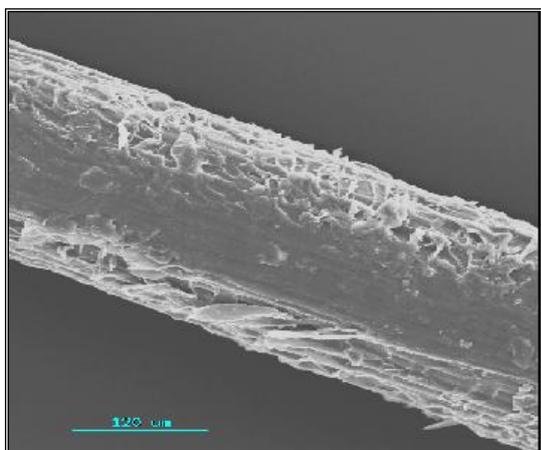


Photo 21: Coupe longitudinale de la fibre du palmier par MEB [20]

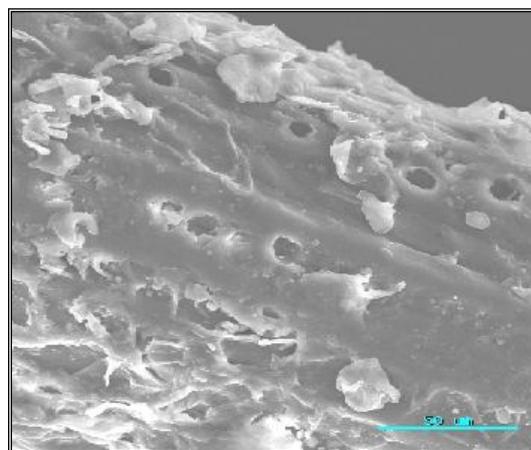


Photo 22: Observation des pores dans la fibre du palmier sous MEB [20]

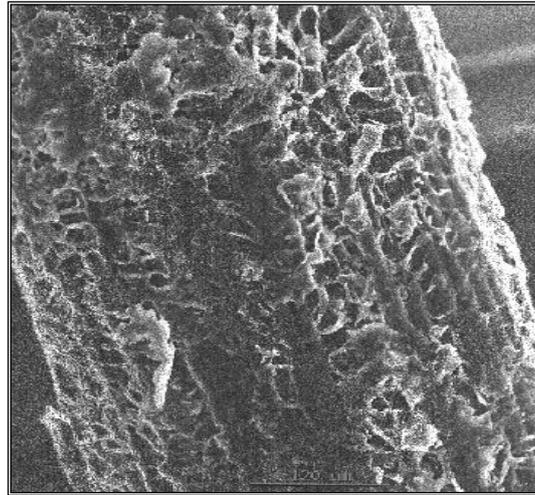


Photo 23 : Observation d'une vue tangentielle
de la fibre du palmier par MEB[20]

La photo (19) montre la texture de la fibre, la diffraction de la poudre de fibres par les rayons X affirme que la fibre du palmier est un composé amorphe. La photo 20 présente une coupe transversale de la fibre utilisée et qui montre que la fibre possède une section pleine, contrairement aux fibres de cellulose qui ont une section creuse [Khenfer & Morlier 1991]. La photo 21 montre que la fibre est constituée de très petits filaments formés d'un ensemble de feuillets (sous formes de pages de livres) orientés dans le sens de la longueur. Les feuillets désordonnés permettent la flexibilité du filament. En plus on observe la présence de certains pores dans la fibre ce qui affirme qu'elle est hydrophile (photo 22). D'après la photo (23), on remarque que la fibre possède des enchevêtrements, ce qui assure une bonne adhérence fibre-matrice.

2^{ème} cas : la fibre d'Alfa :

La fibre d'alfa est retenue pour des raisons de disponibilité et d'économie. Nous précisons que l'alfa utilisée dans notre étude provient de la région Djelfa (Algérie). Le végétal croît naturellement sans apport de traitement sylvicole particulier. Les fibres ont une couleur verte à marron clair et d'une section circulaire. La longueur des fibres utilisées, dans cette étude est de 20 mm.

L'analyse des matières organiques des fibres d'alfa a donné les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de lignine illustrées sur le tableau (21), selon [21].

Composants	Proportions en (%)
Cellulose	43.81
Hémicelluloses	28.00
Lignines	18.76
Taux de silice	01.06
Taux de cendres	03.66
Substances extractibles à l'eau	04.70
Humidité	10.20

Tableau 21. Compositions chimiques du végétal [21].

L'analyse minérale des cendres de la fibre d'alfa, par la technique appelée "fluorescence X" a donné les résultats illustrés dans le tableau (22). Selon [21].

Eléments	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	PF (Perte au feu)
%	34,13	6,57	4,64	2,51	1,47	1,31	47,5

Tableau 22. Analyse minéralogique des fibres d'alfa [21].

Nous constatons que les fibres d'alfa contiennent un taux remarquables de SiO₂ et de CaO. La présence de ces dernières dans l'alfa est due à la fixation des poussières des vents de sable sur la cuticule.

➤ Préparation de la Pâte : [21]

La préparation des fibres d'alfa a été faite selon le procédé mi-chimique (macération à froid). Ce procédé consiste à traiter un échantillon du végétal (environ 1000 grs d'alfa), d'une humidité déterminée de 10% dans une solution de soude caustique NaOH (20% -25%) pendant 48 Heures, pour la libération des fibres des substances incrustantes (lignines, hémicelluloses, pectines...).

Les paramètres influant sur l'efficacité seraient la durée de macération et la concentration du délignifiant NaOH. Le traitement des fibres est fait à température ambiante (25°C). [21]



Photo 24. Pâte cellulosique d'alfa après macération et défibrage



Photo 25. Les fibres du palmier dattier

2.1.2 Résultats et interprétations:

Les essais ont été élaborés sur des éprouvettes (4 x4 x16 cm) et des éprouvettes (10 x10 x10 cm) avec différents pourcentages de fibres proportion à la masse du béton, notamment (0.5, 1, 1.5 et 2 %) pour différents milieux de cure (air du laboratoire et eau de robinet) et avec de durée de conservation de 28 jours et cela pour le béton de sable de fibre du palmier **[BS.FP]**, le béton de sable de fibre d'alfa **[BS.FA]**.

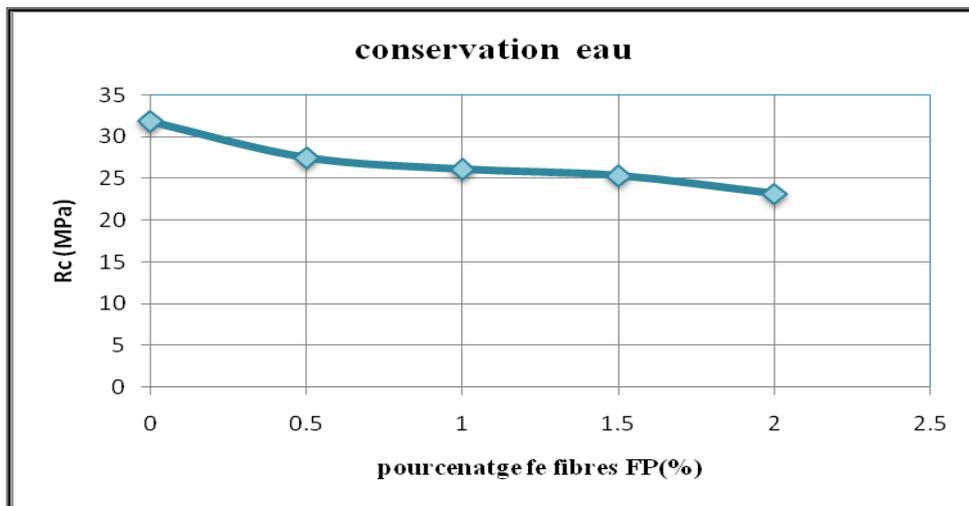
2.1.2.1 Résistances à la Compression R_c :

Figure (42) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FP (conservation dans l'eau)

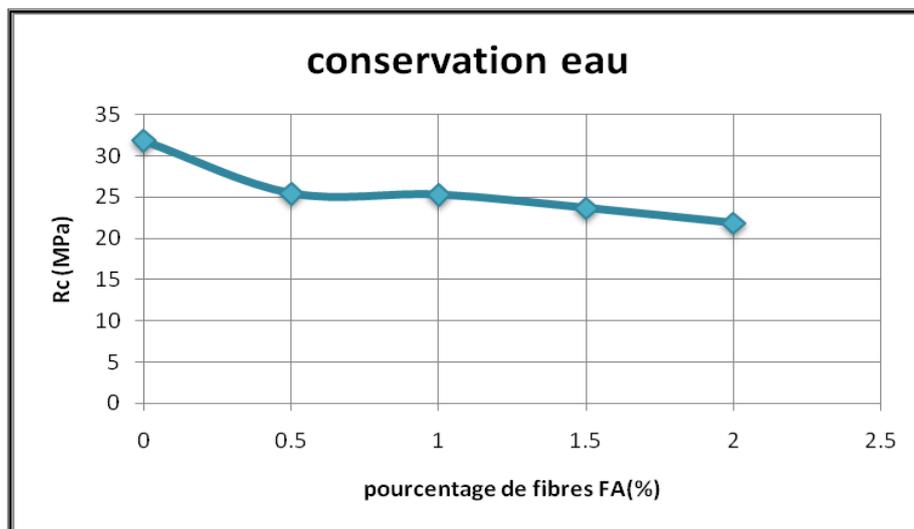


Figure (43) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FA (conservation dans l'eau)

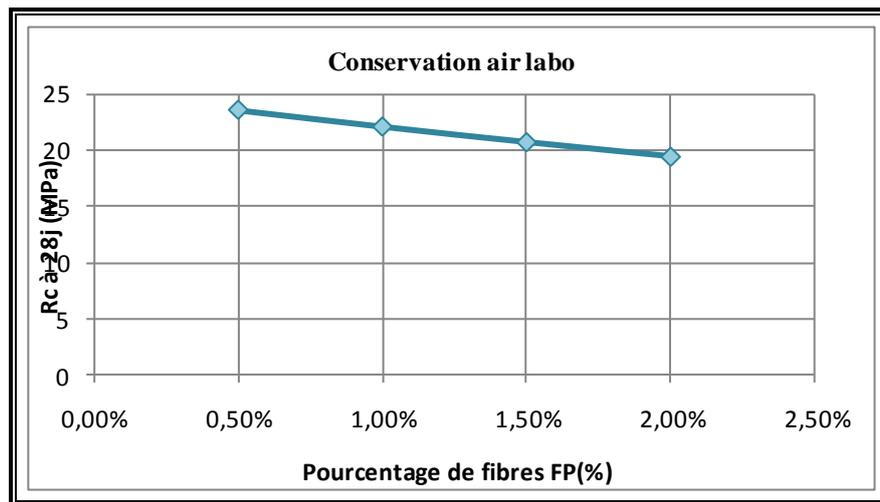
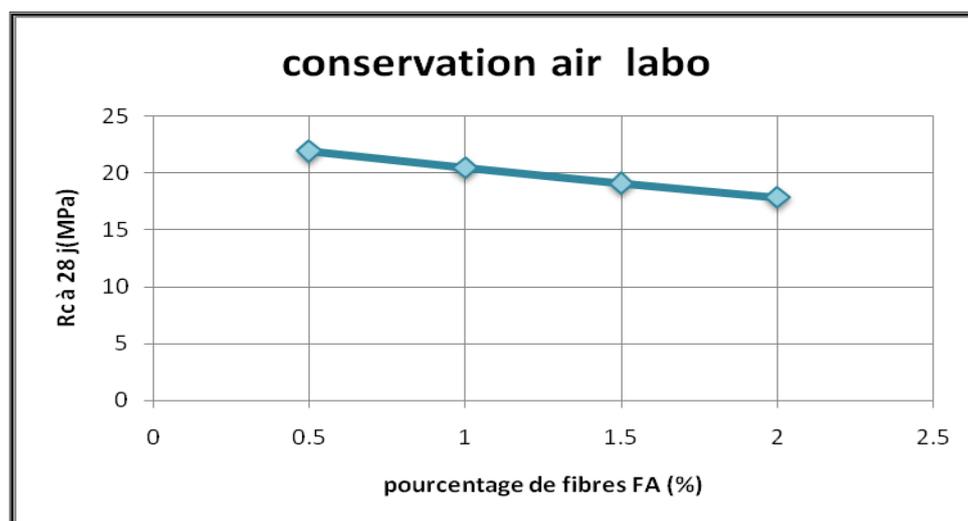


Figure (44) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FP (Conservation à l'air du laboratoire)



Figure(45) : L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage de fibres FA (Conservation à l'air du laboratoire)

Les figures (42), (43), (44) et (45) montrent les résultats à la compression à 28 jours des différents composites en fonction de la variation du pourcentage de fibres et en fonction du régime de cure (air du laboratoire et eau douce), on constate que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans les différents mélanges des bétons de sable de fibres et que le béton de sable témoin reste le plus résistant. Cette constatation est en accord avec les résultats de la littérature [41], qui affirment que l'ajout de fibres au mortier n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du béton augmente le

volume des vides et diminue la compacité du béton, d'où une diminution de résistance à la compression.

Par ailleurs, bien qu'il y ait une évolution de résistance en compression en fonction de l'âge pour les deux types de cures, les bétons de sable de fibres conservés dans l'eau, offrent des résistances supérieures à celles des bétons de sable conservés à l'air. Enfin, on conclut que les fibres végétales n'améliorent pas la résistance à la compression.

2.1.2.2 Résistances à la Traction par Flexion :

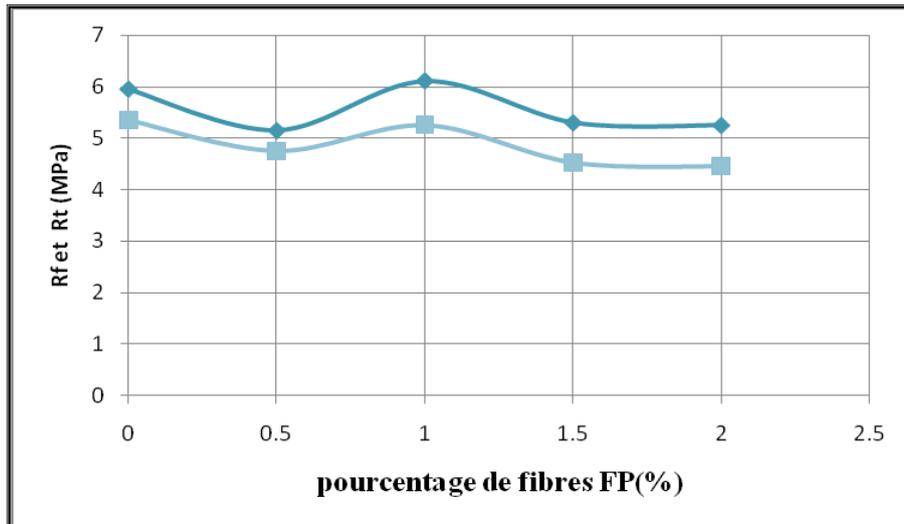
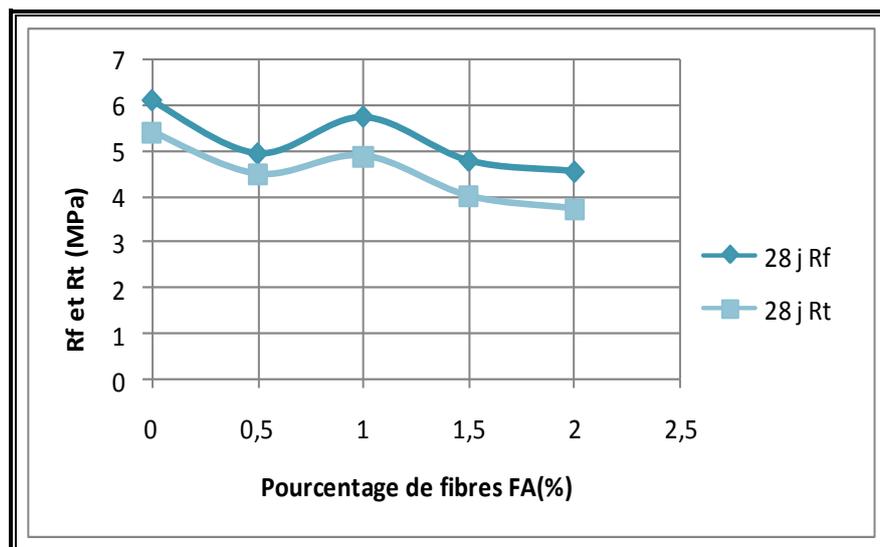
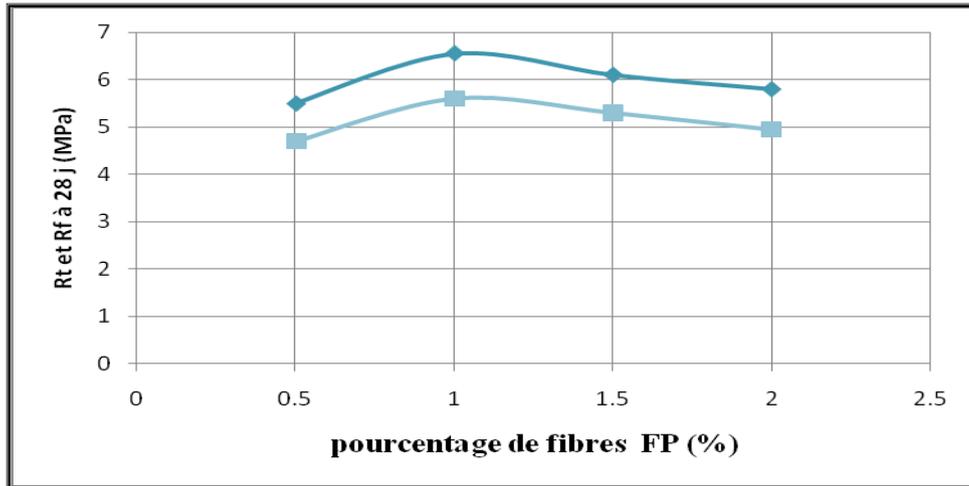


Figure (46): L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FP (conservation dans l'eau)



Figure(47) : L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FA (conservation dans l'eau)



Figure(48) : L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FP (Conservation à l'air du laboratoire)

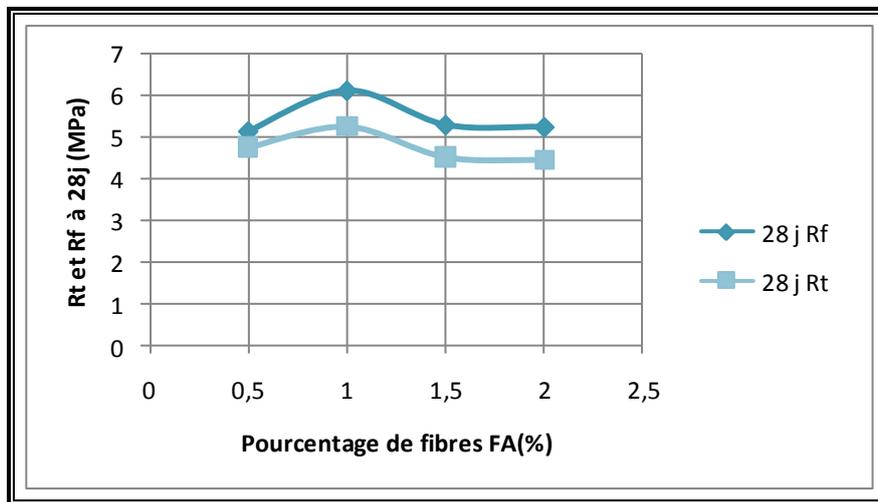


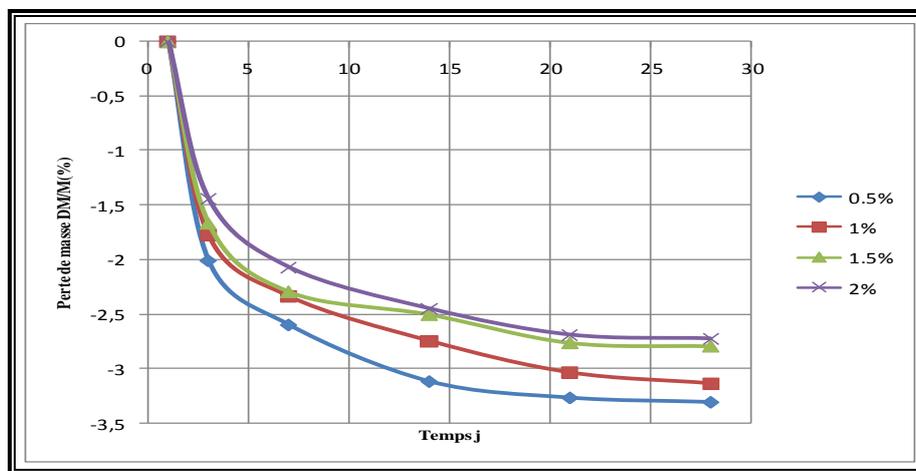
Figure (49) : L'évolution de la résistance à la traction et la résistance à la flexion en fonction du dosage de FA (Conservation à l'air du laboratoire)

D'après les figures (46), (47), (48) et (49), on constate que pour les BS de fibres, les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire ont des résistances à la traction par flexion (et la résistance à la flexion) supérieures à celles des éprouvettes conservées dans l'eau; cette différence dans la résistance est principalement due à l'effet de l'eau sur la fibre. La fibre non protégée perd ses caractéristiques mécaniques par l'effet de mouillage. A l'état sec du matériau composite (matrice + fibre), les fibres sont liées à la matrice par plusieurs liaisons d'hydrogènes et d'hydroxydes. Après rupture de la matrice, le transfert de chargement aux fibres passe par ces liaisons jusqu'à la fracture de la fibre [35].

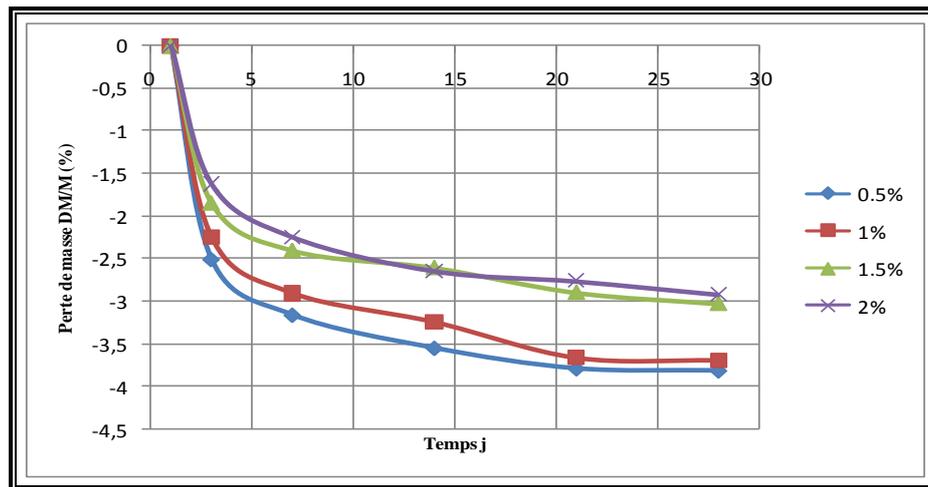
La résistance à la traction par flexion des bétons de sable de fibres [F-FA] [F-FP] pour les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire ont donc donné des résistances supérieures à celles conservées dans l'eau. Bien que la partie mortier du composite a gagné de la résistance du fait que l'échantillon a été conservé dans l'eau, la perte de résistance causée par la présence des fibres s'est avérée plus importante. On note enfin que 1 % est la fraction optimale à introduire dans la matrice pour les deux types des fibres utilisées.

2.1.2.3 Effet de fibres végétales sur le retrait et la perte de masse du béton de sable :

1. Mesure de variation des masses :



Figure(50) : Effet du pourcentage de fibres de palmier dattier sur la perte de masse du béton de sable

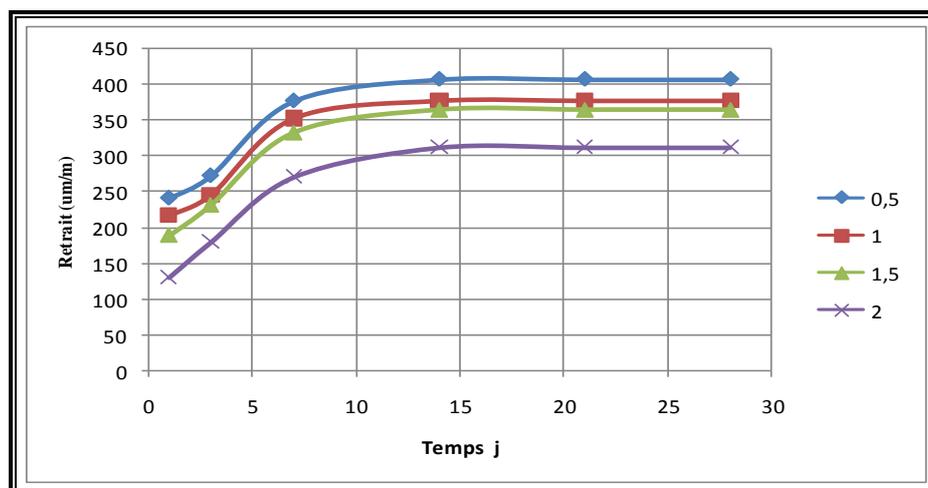


Figure(51) : Effet du pourcentage de fibres d'alfa sur la perte de masse du béton de sable

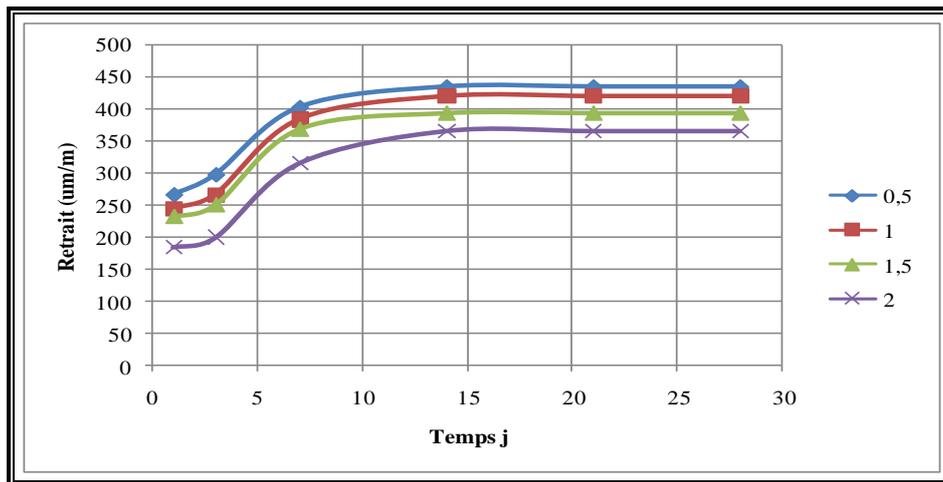
Les résultats obtenus sont représentés par les figures (50) et (51). On sait que le retrait s'accompagne systématiquement d'une perte de masse, on remarque d'après ces figures que la perte de masse augmente en fonction du temps, cette perte devient plus faible à 28 jours.

D'après les résultats donnés par la figure (50), on remarque que la perte de masse diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres du palmier dattier; on enregistre la faible perte de masse (2.7 %) donné par le mélange [F-FP (2%)]. A partir la figure (51), on constate que la perte de masse diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres d'alfa, on enregistre la faible perte de masse (2.925 %) donnée par le mélange [F-FA (2%)].

2. Mesure des variations de longueur (retrait) :



Figure(52) : L'évolution du retrait du BS en fonction du pourcentage de fibres de palmier dattier



Figure(53) : l'évolution du retrait du BS en fonction du pourcentage de fibres d'alfa

Les figures (52) et (53) montrent l'évolution de la déformation du retrait du BS en fonction du temps et du pourcentage de fibres du palmier dattier et de fibres d'alfa. D'après ces résultats, on remarque que le retrait est plus faible que le pourcentage de fibres est plus grand, on explique cette diminution du retrait du BS par l'effet des fibres végétales sur le comportement de ce dernier. D'après ces résultats on a sélectionné les formulations suivantes : [F-FP (2%)] et [F-FA (2%)] qui donnent le meilleur résultat. À partir la figure (52), on remarque une amplitude de retrait importante de 312,5 $\mu\text{m/m}$ à 28 jours [FP (2%)] et à partir la figure (53), on remarque une amplitude de retrait importante de 365,33 $\mu\text{m/m}$ à 28 jours [FA (2%)].

D'après les figures (52) et (53), on constate que le BS avec des fibres du palmier dattier donne les résultats de déformation de retrait que le BS avec des fibres d'alfa.

IV.3 Conclusion :

Dans la 1^{ère} partie expérimentale, on a essayé d'optimiser la formulation de notre béton de sable afin d'atteindre des caractéristiques mécaniques et rhéologiques optimums. On a formulé 05 séries :

- Dans la 1^{ère} série [F-SO/SD], nous avons préparé 09 mélanges avec différents rapports volumiques de sable d'oued sur sable de dune (SO/SD) et nous avons sélectionné la formulation la plus performante [F-SO/SD (2.33)], on a enregistré les meilleurs résultats des résistances suivantes :

Résistance MPa		
Rc28j = 12.4	Rt28j = 2.5	Rf28j = 2.95

- Dans la 2^{ème} série [F-FC], nous avons préparé 04 mélanges avec différents dosages en filler calcaire et nous avons sélectionné la formulation la plus performante [F-FC (200)] avec un dosage 200 kg/m³, on a enregistré les meilleurs résultats des résistances suivantes :

Résistance MPa		
Rc28j = 15.6	Rt28j = 3.46	Rf28j = 3.96

- Dans la 3^{ème} série [F-SP], à partir de la formulation performante [F-FC (200)] de la 2^{ème} série, on a aussi préparé 05 mélanges, tout en introduisant le superplastifiant MEDAPLAST SP 40 à des pourcentages différents. On a sélectionné le béton [F-SP (2 %)] à 2 % en dosage du superplastifiant, on a enregistré les meilleurs résultats des résistances suivantes :

Résistance MPa		
Rc28j = 21	Rt28j = 4.6	Rf28j = 5.4

- Pour la 4^{ème} série [F-E/C], nous avons préparé 04 mélanges à partir de la formulation performante [F-SP (2 %)], en a fixé le dosage en superplastifiant à 2 %, nous avons aussi varié le rapport E/C pour diminuer la quantité d'eau afin d'obtenir un béton plastique avec une meilleur compacité. On a sélectionné le béton [F-E/C (0.60)] avec un rapport E/C =0.60, un affaissement (Aff= 7cm), on a enregistré les meilleurs résultats des résistances suivantes :

Résistance MPa		
Rc28j = 23.87	Rt28j = 5	Rf28j = 5.67

Le retrait total égal 467.5 µm/m à 28 jours avec une perte de masse de 3.25 %

- Dans la 5^{ème} série [F-FS], à partir de la formulation performante [F-E/C (0.60)] de la 4^{ème} série, on a aussi préparé 03 mélanges, en introduisant la fumée de silice à des pourcentages différents, pour optimiser la compacité du BS et afin d'obtenir un béton plus plastique. On a sélectionné le béton [F-FS (10 %)] à 10 % en dosage de la fumée de silice, on a enregistré les meilleurs résultats des résistances suivantes :

Résistance MPa		
Rc28j = 31.85	Rt28j = 5.42	Rf28j = 6.12

Le retrait total égal 512.25 µm/m à 28 jours avec une perte de masse de 4.10 %.

Après toutes ces séries d'essais et de gâchés, on a obtenu la composition optimale du BS, qui est caractérisé par les valeurs présentées au tableau ci-dessous :

	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	FC (kg/m ³)	FS (%)	E	SP (%)
constituants	350	1388	165	10	210	2
% en volume	11.3	59.45	5.78	0.58	21	1.87

Tableau 23 : Composition optimale du béton de sable

Dans la 2^{ème} partie expérimentale, on a fait introduire des fibres végétales (FP, FA), pour la 6^{ème} et la 7^{ème} série, nous avons préparé 04 mélanges pour chaque série à partir de la formulation [F-FS (10 %)], nous avons varié le pourcentage de fibres, le type de fibre et le régime de cure (air du laboratoire et eau) pour avoir l'effet de chaque fibre sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable. On a sélectionné les bétons [F-FP (1 %)] et [F-FA (1 %)] à 1 % en dosage de fibres pour chaque type de fibre, on a enregistré les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques suivants :

	Fibres du palmier dattier (FP)		Fibres d'alfa (FA)	
	Air du laboratoire	Eau	Air du laboratoire	Eau
R _{C28} (MPa)	22.17	26.11	20.5	25.3
R _{t28} (MPa)	5.61	5.3	5.25	4.9
R _{f28} (MPa)	6.55	6.25	6.11	5.76
Retrait (µm/m)	377,15		420,67	
erte de masse(%)	3,14		3,7	

Tableau 24 : Les résultats du béton de sable de fibres végétales

*conclusion
générale*

Conclusion générale

L'objectif principal dans notre étude expérimentale est la formulation du béton de sable dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux (sable de dune, fibres du palmier dattier et fibres d'alfa) ; et l'amélioration du comportement mécanique et rhéologique du béton de sable.

Pour qu'on puisse atteindre ce but, on s'est basé sur la synthèse bibliographique qui nous a permis de faire un contexte scientifique et technique pour notre travail. On a pu connaître les intérêts et les limites des bétons de sable et leur comportement mécanique et rhéologique.

Notre étude expérimentale est divisée en deux parties :

- Première partie : étude de la formulation du béton de sables, en utilisant du ciment (CPJ CEM II /42.5 A), de filler calcaire, de la fumée de silice, de superplastifiant (MEDAPLAST SP 40) et l'utilisation des cinq rapports d'eau / ciment (0,80-0,75-0,70-0,65-0,60).
- deuxième partie : étude de la formulation du béton de sable de fibres végétale, et pour étudier l'effet du type de cure sur ces fibres, on a soumis les éprouvettes à deux types de cure (air du laboratoire, eau) ; et puis l'étude de la résistance à la compression, à la traction et à la flexion de l'âge de 7,14 et 28 jours et le contrôle de retrait du béton pendant 28 jours.

Après cette étude expérimentale nous pouvons présenter les conclusions suivantes :

1. l'effet bénéfique du rapport SO/SD sur les résistances mécaniques et la maniabilité des bétons de sable.
2. l'ajout de la fumée de silice a un rôle significatif dans la formulation des BS, elle contribue à l'amélioration de la compacité et les résistances mécaniques des BS.
3. l'introduction de filler calcaire dans la formulation du béton de sable permettra d'améliorer la compacité et les résistances mécaniques du BS.
4. l'introduction des fibres végétales dans la formulation des BS contribue à l'amélioration des résistances à la traction et à la flexion, elle a réduit aussi le retrait des BS.

5. les résistances à la compression des BS avec des fibres végétales diminuent en fonction de l'augmentation du dosage en fibres, car leur incorporation dans le BS augmente le volume des vides et diminue la compacité du BS.
6. pour les BS de fibres végétales on conclut que les éprouvettes conservées à l'air du laboratoire ont des résistances (R_t , R_f) supérieures par rapport aux éprouvettes conservées dans l'eau, cette différence dans les résistances est due à l'effet de l'eau sur la fibre végétale.
7. les BS de fibres du palmier dattier donnent des résultats meilleurs que les BS de fibres d'alfa. Cette différence est due à l'effet des caractéristiques mécaniques et physiques de chaque type de fibres, on constate que les fibres d'alfa sont plus flexibles et ont un pouvoir hydrophile très élevé que les fibres du palmier dattier.
8. avec nos différentes formulations des BS, on a pu enregistrer que la capacité d'absorption importante donnée par les BS de fibres végétales, et la capacité d'absorption croît avec l'augmentation du dosage en fibres et cela est dû aux fibres qui sont hydrophiles.

PERSPECTIVES

Perspectives

Notre objectif principal dans cette étude est la valorisation des matériaux locaux dans la formulation du béton de sable afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable ; ainsi on a utilisé des différents ajouts (la fumée de silice, le superplastifiant, les fibres...etc.), mais le béton de sable ne permet pas un remplacement systématique du béton classique, pour réduire les limites du béton de sable et élargir les domaines d'exploitation de ce type du béton, on propose les perspectives suivantes :

1. Pour que les fibres végétales ne perdent pas leurs caractéristiques mécaniques et pour aussi éviter l'effet de l'eau sur ces fibres, il faut protéger ces fibres.
2. Développement de la valorisation d'exploitation des matériaux locaux (sable de dune, déchets de briques et fibres végétales...etc) dans le domaine de constructions.
3. Trouver une relation qui lie la maniabilité plastique et la résistance mécanique optimale.
4. Etudier la durabilité du un BS de fibres végétales dans différents milieux de cure (air du laboratoire, eau et dans milieu agressif).

Bibliographie

Bibliographie

[1] **SABLOCRETE**, (1994) « Béton de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

[2] **BENMALEK, M. ; BALI A.** « Comportement du béton de sable de dune sur des éléments d'ossature armés » Séminaire national en génie civil ; M'sila, Le 16-17 nov. 1997.

[3] **AMRANI, Y.** « Béton de sable : expérience marocaine » ; Actes du colloque Franco-Maghrébin ' Construire en matériaux locaux ' ; Marseille 15-17 oct. 1991; pp. 133-152.

[4] **AFNOR**, « Bétons- Bétons de sable »; Projet P 18-500.

[5] **CHAUVIN, J.J.** « Béton de sable en Union Soviétique »; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n°174, juill. - août 1991.

[6] **CHAUVIN, J.J. ; GRIMALDI, G.** « Les bétons de sable »; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; N°157, Sept. 1988.

[7] **R.GUENOUN**, (2003), « Etude et formulation d'un béton de sable de dune », P.F.E, ENP, Alger, Algérie.

[8] **BENAISSA, A.; MORLIER, P. ; IGUIER, C.** « Fluage et retrait du béton de sable »; Materials and structures -26-333- 339- 1993.

[9] **K.HAMADACHE**, « Béton de sable modifié à la poudre de caoutchouc » mémoire d'ingénieur ; Ecole nationale Polytechnique -2005.

[10] **GADRI .K, HAOUARA .S,** « Utilisation des fillers à base de déchet de polissage de carrelage dans la préparation des bétons de sable », mémoire d'ingénieur ; université de Biskra1998.

[11] **GADRI .K**, « Contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destinées pour la réparation mince des structures », mémoire de magistère; université de Biskra 2007.

[12] **BEDERINA.M**, « Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable », mémoire de magistère; université de Laghouat 1998.

[13] **CHAUVILLARD, G. ; BASSUYAUX, O.** « Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées »; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°205, Sept. - oct. 1996.

[14] **TAFRAOUI.A**, « Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie).Application aux nouveaux bétons » doctorat de l'université de Toulouse Février 2009.

[15] **KHERBACHE .S, CHELOUAH .N, MEHIDI .KH, CHIKH AMER. H, TAHAKOURT .A/K**, « Étude de l'influence de l'ajout de particules fines contenues dans les sables concassées sur le retrait et la résistance des bétons » ; Laboratoire de Technique des Matériaux et de Génie des Procédés (LTMGP), Université A/MIRA de BEJAIA.

[16] **M. Bederina, M.M. Khenfer, R.M. Dheilly, M. Queneudec**, « Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes »; research, Vol. n° 35, 2005, pp.1170-1179.

[17] **A.Bouchouika, M.N.Ooudjit**, « influence du sable de dune finement broyé sur les propriétés physico-chimique et mécaniques des bétons »; International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries
ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

[18] **A. GUETTALA*, B. MEZGHICHE*, R. CHEBILI*** Civil Engineering Laboratory, University of Biskra, « Strength comparisons between rolled sand concrete and dune sand concrete » ; Courrier du savoir-N°02, Juin 2002, pp.85-89.

[19] **Z.Boudaoud et D.Breysse** « Étude des effets du cobroyage d'un sable et d'un clinker sur les propriétés d'un béton de sable ».Materials and Structure/ Matériaux et constructions, Vol.35, June 2002, pp 310-316.

[20] **Djoudi.A, M, Khenfer.M, Bali. A** « Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétales du palmier dattier». International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries
ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

[21] **O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul.** «Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa) » ; International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries
ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

[22] **A.A.CHAOUCH, (1993)**, « Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes», mémoire de magistère, ENP, Alger, 1993.

[23] **R. DUPAIN, R. LANCHON, et J.C. SAINT-ARROMAN** ; «Granulats, sols, ciments et bétons (Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire)».
Editions CASTEILA, France 1995

[24] **CHAUVIN, J.J. ; GRIMALDI, G.** "Les bétons de sable"; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; N°157, Sept. 1988.

[25] **BENAISSA, A. ; MORLIER, P. ; TRAM, V.** « Le béton de sable, un matériau non fissurant »; Algérie-équipement, N°6, pp7-11, oct. 1992.

[26] **A.M. NEVILLE, (2000)**, « Propriétés des bétons », édition EYROLLES, Paris, France2000

[27] **BOULAARES. S**, « comportement d'éléments structuraux en béton de sable», mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Février 2009.

[28] **DREUX, G.J.Festa**, « Nouveau guide du béton et de ses constituants »; édition Eyrolles, France, 1986.

[29] **Jacques BARON Jean-Pierre OLLIVIER.** « Les bétons : Bases et données pour leur formulation »; édition Eyrolles, France, 1997.

[30] **R. Lanchon**, « Cours de laboratoire (1 et 2) granulats béton sols. »Edition Casteilla, Paris, 1998.)

[31] **BENAISSA, A. ; MORLIER, P. ; VIGUIER, C. ; CAUVIN, J.J.**

« Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable » ; Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics (ITBTP) N°504, juin 1992.

[32] **BENAISSA, A.** « Déformations différées d'un béton de sable » – Thèse de doctorat soutenue en novembre 1992 (Université de bordeaux) ; Laboratoire régional des ponts et chaussées.

[33] **Z.Boudaoud**, « Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda » mémoire de Magistère, université M^{ed} Boudiaf.

[34] **GUTTALA.S**, « Étude de l'influence de l'ajout de sable de dune finement broyé au ciment, sur la stabilité de béton » ; mémoire de magistère, Université de Biskra 2007.

[35] **Canovas M.F. et al. 1992**, « New economical solution for improvement of durability of Portland cement mortars reinforced with sisal fibre » .RILEM, Vol 25.

[36] **Khenfer.M, Morlier P. 1991**, « Effet de la longueur des fibres sur les propriétés mécaniques des ciments renforcés de fibres cellulosiques »; Materials and structures N° 24, pp.185 – 190.

[37] Technologie du bâtiment -Gros œuvre (ouvrage en béton armé), les éditions des FOUCHER

[38] **Albert Fuents**, « Béton armé, fissuration, flèches, redistribution d'effort et formation des mécanismes de rupture » Office de Publication Universitaire Alger, (2003).

[39] **Bengoucha F.Z** « Amélioration des propriétés de mortier à base de sable de dunes Avec ajout (sable granulé de hauts fourneaux) » Mémoire de Fin d'Etudes Ecole Nationale des Travaux Publics, 2004/2005.

[40] LA TECHNOLOGIE DU BETON, BASF Construction Chemicals France

[41] FICHES TECHNIQUES TOME 2 « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ».

ANNEXE

MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- Forme Poudre
- Couleur Grise
- Densité apparente 0,5
- Composants SiO₂ > 85(%)
..... SO₃ < 2,5 (%)
..... Cl- < 0,2 (%)
- Aire massique > 15 (m²/gr)
- Humidité par étuve à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST HP** permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la cohésion
- d'éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques
- d'obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- d'augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- d'augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (**MEDAPLAST SP, SP40**) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

DOSAGE

Le dosage du **MEDAPLAST HP** varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST HP** est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (toile de jute + arrosage ou **MEDACURE**) surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST HP** est conditionné en sacs de 2kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex
قرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

CARACTERISTIQUES

- Forme Liquide
- Couleur Marron
- PH 8,2
- Densité $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 40%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la fluidité
- d'augmenter la maniabilité
- de réduire l'eau de gâchage
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,6 à 2,5% du poids de ciment
soit 0,5 l à 2 l par 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg en fûts de 270 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

