

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi – Bord Bou Arreridj

جامعة محمد البشير الإبراهيمي «برج بوعريريج»

Faculté des Sciences et de la Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département Génie Civil

قسم الهندسة المدنية



Mémoire de fin d'études

Mémoire pour L'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux de Construction

THÈME :

Propriétés Physique et mécanique du Béton de sable compacté

Présenté par

*Deffaf fouaz
Deffaf abdelkader*

Soutenu le : 10 /11/2020

Devant le Jury Composé de :

Dr Achour Yacine

Président

Dr Belkadi Ahmad Abdraouf

Examineur

Dr Kessal Oussama

Examineur

Dr Noui Ammar

Encadreur

Dr Bouglada Mohammed Salah

Co-Encadreur

Année Universitaire 2019-2020

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Revue bibliographique	
	03
I.1. Béton de sable	
I.1.1. Introduction.....	03
I.1.2. Historique.....	03
I.1.3. Définition du béton de sable.....	04
I.1.4. Avantages et inconvénients des bétons de sable.....	04
I.1.4.1. Avantage des bétons de sable.....	04
I.1.4.2. Inconvénients des bétons de sables.....	05
I.1.5. Les Composants du béton de sable.....	05
I.1.5.1. Sables.....	05
I.1.5.2. Les fines d'ajout (filler calcaire).....	06
I.1.5.3. Fumé de silice.....	06
I.1.5.4. Les ciments.....	07
I.1.5.5. L'eau.....	08
I.1.5.6. Les adjuvants.....	08
I.1.5.7. Autres ajouts.....	08
I.1.6. Application du béton de sable.....	09
I.1.7. Propriétés des bétons de sable.....	11
I.1.7.1. Résistance et maniabilité.....	11
I.1.7.2. Granulométrie- Résistance.....	11
I.1.7.3. Durabilité.....	12
I.2. Béton compacté au rouleau (BCR)	13
I.2.1 Introduction.....	13
I.2.2. Historique du BCR.....	14
I.2.3. Définition.....	15
I.2.4. Les applications concrètes du BCR.....	16
I.2.5. Avantages et inconvénients du BCR.....	16
I.2.5.1. Avantages.....	16
I.2.5.2. Inconvénient du BCR.....	17
I.2.6. Identification des constituants du mélange du BDR.....	17
I.2.6.1. Les liants.....	17
I.2.6.2. Les granulats NF P18-101.....	18
I.2.6.3. Les additions.....	21
I.2.6.4. L'eau de gâchage.....	23
I.2.6.5. Les adjuvants.....	24
I.2.7. Maniabilité du BCR.....	25
I.2.8. Propriétés de BCR.....	26
I.2.8.1. Etat frais.....	26
I.2.8.2. Etat durci.....	27
I.2.9. Durabilité du BCR.....	28
I.3. Conclusion.....	29

Chapitre II : Méthodologie

II.1. Introduction.....	30
II.2. Matériaux utilisés.....	30
II.2.1. Les sable	30
II.2.2. Ciment.....	31
II.2.3. Filler de calcaire.....	32
II.2.4. Eau de gâchage.....	32
II.3. Essai réaliser.....	32
II.3.1. Analyse granulométrique, NF P 94-056.....	32
III.3.1.1. Généralité.....	32
II.3.1.2. Principe de l'essai.....	33
II.3.1.3. But de l'essai.....	33
II.3.1.4. Mode opératoire.....	34
II.3.2. Propriété « Equivalent de Sable ».....	34
II.3.2.1. Mode opératoire.....	35
II.3.3. Masse volumique apparente.....	36
II.3.4. Masse volumique absolue.....	36
II.3.5. Essai de Teneur en Eau, NF P 94-050.....	37
II.3.5.1. Principe de la détermination de la teneur en eau.....	37
II.3.5.2. Appareillage.....	37
II.3.5.3. Mode opératoire.....	38
II.3.5.4. Expression des résultats.....	38
II.3.6. Essai Proctor Modifier, NF P 94-093.....	38
II.3.6.1. Définition de compactage.....	39
II.3.6.2. L'objectif de l'essai.....	39
II.3.6.3. But de l'essai.....	39
II.3.6.4. Principe de la méthode.....	39
II.3.6.5. Appareillage nécessaire.....	40
II.4. Essai de résistance à la compression, NF EN 12390-3.....	41
II.4.1. Principe.....	41
II.4.2. Appareillage.....	41
II.4.3. Eprouvettes.....	41
II.4.3.1. Prescriptions.....	41
II.4.4. Mode opératoire.....	41
II.4.4.1. Préparation et positionnement des éprouvettes.....	41
II.4.4.2. Mise en charge.....	42
II.4.4.3. Evaluation des types de rupture.....	42
II.4.5. Expression des résultats.....	42
II.5. Essai de traction par fendage, NF EN 12390-6.....	44
II.5.1. Principe.....	44
II.5.2. Appareillage.....	44
II.5.2.1. Machine d'essais, Conforme à l'EN 12390-4.....	44
II.5.2.2. Gabarit de centrage (facultatif).....	44
II.5.2.3. Bandes de chargement.....	44
II.5.3. Mode opératoire.....	45
II.5.3.1. Préparation de l'éprouvette.....	45
II.5.3.2. Positionnement de l'éprouvette.....	45
II.5.3.4. Mise en charge.....	45
II.5.3.5. Examen de l'éprouvette.....	46
II.5.3.6. Expression des résultats.....	47

II.6. Absorption d'eau, ASTM C 642.....	47
II.7. Conclusion	48

Chapitre III : Résultat et discussions

III.1. Introduction.....	49
III.2. Teneur en Eau, NF P 94-050.....	49
III.3. Masse volumique apparente et absolue.....	49
III.4. Analyse Granulométrique, NF P 94-056.....	50
III.5. Equivalent de sable.....	52
III.6. Essais Proctor Modifier, NF P 94-093.....	52
III.7. Composition du mélange.....	53
III.8. Essai de la résistance à la compression.....	55
III.9. Essai de résistance en traction par fendage d'éprouvettes	57
III.10. Essai d'Absorption d'eau du béton de sable compacté.....	58
III.11. Densité du béton de sable compacté.....	59
III.12. Conclusion.....	60
IV. Conclusion générale.....	61

Résumé

L'objectif de cette étude est d'utiliser le sable dune qui est un matériau disponible en grandes quantités mais à performances limitées. Comme un constituant principal pour la formulation d'un nouveau. Ce sable est utilisé pour formuler du béton de sable compacté qui est un béton ferme.

Plusieurs essais sont réalisés au niveau de laboratoire afin de préparer ce béton : teneur en eau, masses volumique, analyse granulométrique, équivalent de sable, la résistance à la traction, et finalement la détermination de la résistance à la compression du béton de sable compacté.

Dans cette étude seront présentées les caractéristiques mécaniques des différents bétons réalisés au niveau de laboratoire.

Mots clés :

Béton de sable compacté, Résistance a la compression, Résistance a la traction.

Summary

The aim of this study is to use dunes, a material available in large quantities but with limited performance. As a major component of creating a new one. This sand is used in the formation of compressed sand concrete which is solid concrete.

Numerous tests are carried out in the laboratory in order to prepare this concrete: water content, density, particle size analysis, sand equivalent, tensile strength, and finally determination of the compressive strength of concrete compressed with sand.

In this study, the mechanical properties of the different concretes produced at the laboratory level will be presented.

Keywords :

Sand compressed concrete, compressive strength, tensile strength.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو استخدام الكتيان الرملية وهي مادة متوفرة بكميات كبيرة ولكن بأداء محدود. كمكون رئيسي لصياغة واحدة جديدة. يستخدم هذا الرمل في تشكيل الخرسانة الرملية المضغوطة وهي الخرسانة الصلب. يتم إجراء العديد من الاختبارات على مستوى المختبر من أجل تحضير هذه الخرسانة: محتوى الماء، الكثافة، تحليل حجم الحبيبات، مكافئ الرمل، مقاومة الشد، وأخيراً تحديد قوة الضغط للخرسانة الرملية المضغوطة. في هذه الدراسة، سيتم عرض الخصائص الميكانيكية للخرسانة المختلفة المنتجة على مستوى المختبر.

الكلمات الدالة:

الخرسانة الرملية المضغوطة، قوة الضغط، قوة الشد

Liste des figures

Chapitre I : Revue Bibliographique

Figure I.1.	Microstructure du fumé de silice	07
Figure I.2.	Etat du BCR frais lors de son déversement pour la préparation D'une planche d'essais (Tunisie)	14
Figure I.3.	Effet de la vibration et de la teneur en eau sur la densité du BCR (à base de ciment)	23
Figure I.4.	Application d'un produit de cure après compactage du BCR – aire Industriel – Montréal.	26

Chapitre II : Méthodologie

Figure II.1.	Sable utilise.	30
Figure II.2.	Ciment Portland Composé (CEM II, 32.5 N)	31
Figure II.3.	Filler calcaire.	32
Figure II.4.	La courbe granulométrique.	33
Figure II.5	Appareillage – essai granulométrique.	34
Figure II.6.	Essais d'équivalent de sable.	35
Figure II.7.	La masse volumique apparente du sable.	36
Figure II.8.	La masse volumique absolue de sable.	37
Figure II.9.		

	Appareillage –Teneur en eau (NF P 94-050).	37
Figure II.10.	Essai de compactage des éprouvettes.	40
Figure II.11.	Ruptures correctes d'éprouvettes cylindriques	43
Figure II.12.	Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cylindriques.	43
Figure II.13.	Essai d'écrasement (Résistance à la compression).	44
Figure II.14.	Gabarit de centrage pour essais sur éprouvettes cylindriques.	45
Figure II.15.	Positionnement des éprouvettes.	46
Chapitre III : Résultat et discussions		
Figure III.1.	Masse volumique apparente et absolue.	49
Figure III.2.	La courbe granulométrique du sable dune- Oued Souf	50
Figure III.3	La courbe granulométrique du sable dune- Boussaâda.	51
Figure III.4..	La courbe granulométrique du sable concassé.	51
Figure III.5.	Equivalent de sable.	52
Figure III.6.	Préparation et réalisation de l'essai Proctor modifier.	52
Figure III.7.	Variation de la masse volumique de BSC en fonction de teneur en eau.	53
Figure III.8.	Variation de la masse volumique de BSC en fonction de teneur en eau.	54
Figure III.9.	Variation de la masse volumique de BSC en fonction de teneur en eau.	54

Figure III.10.	Eprouvette après essai de compression.	56
Figure III.11.	Variation de la résistance à la compression.	56
Figure III.12.	Ecrasement d'éprouvette	57
Figure III.13.	Variation de la résistance à la traction.	58
Figure III.14.	L'absorption d'eau des différents éprouvettes du BSC.	59
Figure III.15.	La densité du béton des différents éprouvettes du béton de sable compacté.	59

Liste des tableaux

Chapitre II : Méthodologie

Tableau II.1.	Caractérisation du ciment.	31
----------------------	----------------------------	----

Chapitre III : Résultat et discussions

Tableau III.1.	Teneur en eau.	49
Tableau III.2.	Masse volumique apparente des trois sables.	49
Tableau III.3.	Analyse granulométrique du sable dune-Oued Souf.	50
Tableau III.4.	Analyse granulométrique du sable dune-Boussaâda.	50
Tableau III.5.	Analyse granulométrique du sable concassée.	51
Tableau III.6.	Equivalent de sable	52
Tableau III.7.	Résistance à la compression à 7 jours	55
Tableau III.8.	Résistance à la compression à 14 jours	55
Tableau III.9.	Résistance à la compression à 28 jours.	55
Tableau III.10.	Résistance en traction par fendage à 28 jours	56
Tableau III.11.	Absorption d'eau du béton de sable compacté	56
Tableau III.12.	Densité du béton de sable compacté.	57

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu notre seigneur dieu qui nous a donné la force d'achever ce travail.

Ce mémoire de master est le résultat de l'engagement de plusieurs personnes qui ont décidé de m'accompagner résolument dans cet exaltant parcours. Je voudrais profiter de cet espace pour leur exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance

Nous remercions notre promoteur Dr Noui Ammar et Co-encadreur Dr Bouglada Mohammed Salah, Nos remerciements vont aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, Enfin à tous ceux et celles qui nous a soutenues ou encouragés qu'ils y trouvent ici l'expression de nos profonde gratitude.

Nous remercions tous les travailleurs du laboratoire de génie civil et tous les professeurs qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours académique. Et un merci spécial pour Mlle Hamla Wafa pour l'aide précieuse qu'elles nous ont offerts dans l'élaboration de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants de Département de génie civil qui ont contribué à notre formation.

Aussi remercie nos chers parents pour leur soutien moral.

DEDICACE

À celui qui m'a toujours soutenu dans toutes mes décisions, qui a le plaisir de devenir à cette place, à celui qui a présenté le message le plus noble qui existe, à mon cher père.

À ma chère maman qui me garde toujours avec ses prières, et qui était toujours me soutient jusqu'à dernière souffle.

Et à tous les merveilleux professeurs qui m'ont appris tout au long de mon parcours académique, à mes amis .

Introduction générale

Introduction générale

Les bétons de sable sont une nouvelle gamme de matériaux de construction qui peuvent présenter une bonne alternative pour remplacer les bétons classiques dans la confection de certains éléments de construction. Les bétons de sable sont composés essentiellement de mélange en proportions convenables de sable (un ou plusieurs), de fines d'ajout, de ciment et d'eau. D'autres additions peuvent être incorporées : adjuvants, fibres, gravillons ...etc. (Achoura 2005 et Sablocrete 1996)

Plusieurs pays dans le monde ont commencé à utiliser le béton de sable. En France et suite aux premiers succès de cette technique, un programme national nommé Sablocrete a été lancé. Ce projet a largement introduit et développé la technique des bétons de sable. La Russie, pays riche en sable, mais pauvre en gravillons et roches massives, n'a cessé, principalement depuis 1941 à utiliser le béton de sable dans différents domaines du génie civil. L'Algérie, pays riche en sable de dune, a également introduit la technique du béton de sable. Plusieurs études et recherches ont été élaborées en Algérie afin de valoriser ce matériau.

L'idée de promouvoir la technologie et l'utilisation du béton de sable de dunes est née de plusieurs constatations :

- Abondance de la matière première : le sable dunaire est un matériau très abondant, on le trouve dans de nombreux pays en quantité quasi-inépuisable. En Algérie par exemple, il couvre environ 60% du territoire.
- Tendance pour les granulats alluvionnaires et de carrière à la raréfaction et donc au surcoût : Si on sait que les granulats entrent dans la composition du béton classique dans une proportion de 75%, on réalise nettement l'augmentation du prix de revient du béton.
- Coût du transport des granulats : dans certains pays pauvres en granulats ou ayant des ressources mal réparties, il faut parfois les transporter sur des distances très grandes.
- Economie dans l'utilisation : certaines constructions peu ou pas étagées, comme c'est le cas de celles qu'on pourrait projeter dans les sites où le sable dunaire est abondant, sont peu sollicitées mécaniquement ; le béton de sable pourrait remplacer avantageusement le béton classique onéreux.
- Esthétique : à cause de sa petite granularité, le béton de sable permet la réalisation d'effets architectoniques et donne de beaux aspects de surface. Le phare de Port-Saïd en Egypte en est une parfaite illustration.

Le travail de thèse de master présenté dans ce manuscrit a pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques du béton de sable compacte par la technique de plan d'expérience. Les recherches présentées ici consistent en une approche expérimentale qui vise à évaluer l'influence des trois sables différents (Sable dune Boussaâda, Sable Oued souf, et Sable concassé) sur les propriétés mécaniques du béton de sable compacte.

Un plan de mélange bien déterminé va être utilisé afin de développer quelques modèles qui prédisent les propriétés du composite étudié, à l'état durci afin d'optimiser sa composition. Ces modèles permettent de comprendre les rôles joués par les différents constituants et paramètres (à savoir : sable dune Boussaâda, sable dune oued souf, sable concassé) et les effets de leurs interactions sur les propriétés du béton de sable compacte. Pour atteindre ces objectifs, notre présente thèse est divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre : présent une revue bibliographique sur les particularités et les domaines d'application des bétons de sable (BS) et le béton compacte au rouleau.

Le deuxième chapitre : présente les différents résultats expérimentaux obtenus lors de la caractérisation des matériaux de base, puis l'ensemble des techniques expérimentales utilisées pour les différents essais de caractérisation.

Le troisième chapitre : fait l'objet d'une analyse et discussion des résultats trouvés à l'issu d'un programme expérimental. A partir de ces résultats, nous présentons des statistiques permettant de trier l'influence des facteurs étudiés (sable dune Boussaâda, sable dune oued souf, sable concassé) par ordre d'importance, la résistance mécanique (compression, traction) à 28 jours des BSCR préparés. Les modèles mathématiques ainsi trouvés, permettent de déceler l'effet de chaque facteur séparément et en interaction avec d'autres facteurs.

Conclusion générale : Tout cela est enfin clôturé par une conclusion générale regroupant une synthèse générale de l'ensemble des résultats obtenus, suivie d'une présentation de quelques nouvelles perspectives de recherche.

Chapitre I:

Revue Bibliographique

I.1. Béton de sable

I.1.1. Introduction

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé antérieurement au béton traditionnel. Il est tombé en désuétude, avec l'abondance des granulats du plus gros calibre permettant d'obtenir facilement des nouveaux élevés de résistances. Il retrouve cependant de nos jours un intérêt certain du fait des propriétés spécifiques de ce matériau, par rapport au béton traditionnel : excellente maniabilité et cohésion, bonne adaptation au milieu fortement ferraillés, qualités esthétiques, etc. Par ailleurs, dans certaines régions riches en sable, il peut procurer des économies par rapport au béton traditionnel.

Dans ce chapitre on présentera un aperçu général sur les BS, ou on va exposer d'abord l'historique et l'origine des bétons de sable ainsi que leur définition et la différence entre les BS et les mortiers. Ensuite, on donnera une description des constituants entrant dans la fabrication, on décrit les propriétés mécaniques et hygrométriques, puis on explique le caractère non fissurant du BS. Finalement, on met en relief les innovations et les avantages apportés par les BS et on donnera quelques exemples de réparation structurale réalisés par ce matériau.

I.1.2. Historique

Le premier grand ouvrage ayant fait appel à l'usage du béton de sable est sans doute le phare de Port Saïd construit par François à l'embouchure du canal de Suez. COIGNET utilisa du sable de mer et si le phare proprement dit n'est plus en service, l'édifice est toujours debout. Après la seconde guerre mondiale, l'URSS, riche en sable mais pauvre en granulats, et devant faire face à un très grand programme de reconstruction utilisa largement le béton de sable pour bâtir des routes, des aérodromes, des bâtiments.

Dans un article du Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (Le béton de sable en Union Soviétique, 1991, n° 174, pp. 61-69), Jean-Jacques Chauvin fait le point sur l'usage du béton de sable en Union Soviétique. Dans son introduction, il mentionne l'ouvrage de Nicolas de Rochefort publié en Russe en 1918 : « Si l'on broie en même temps clinker et sable dans un rapport d'un pour un, on obtient un produit qui, mélangé au sable naturel dans un rapport d'un pour trois (soit au total un de clinker pour 6 de sable), conduit aux mêmes résistances qu'un mélange de 1/3 de clinker broyé seul et de sable, c'est-à-dire que l'on double les performances du ciment ».

L'explication est donnée quelques lignes plus loin : « Le principe physique du phénomène semble être qu'au concassage on libère des surfaces physico chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant ».

En France, pour limiter l'extraction des ressources naturelles des lits rivières, démarra, en 1988, le projet MATERLOC qui visait à optimiser l'usage des matériaux locaux et notamment celui du sable issu du broyage des roches calcaires. Une partie de ce projet est connue sous le nom de **SABLOCRETE** dont les enjeux et les recommandations ont été publiées en 1994 aux Presses de l'ENPC : Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation.

I.1.3. Définition du béton de sable

Le béton de sable est un béton formé par mélange de sable, de ciment, d'addition(s) et d'eau. Des ajouts (adjuvants, fibres ...) peuvent également être incorporés au mélange. Il est donc principalement constitué de sable. Son dosage en ciment est du même ordre que celui des bétons classiques soit entre 250 à 400 kg/m³. Cette similitude lui vaut, entre autre, le terme de "béton". Il se distingue du mortier par, notamment, son dosage en ciment, celui d'un mortier étant de 400 à 700 kg/m³, et par son domaine d'utilisation.[1]

I.1.4. Avantages et inconvénients des bétons de sable

I.1.4.1. Avantages des bétons de sable

❖ L'ouvrabilité

Cette capacité du béton de sable à remplir le moule avec une énergie de serrage moindre, sans préjudice pour les autres propriétés du matériau, constitue un atout significatif dans bien des domaines c'est ainsi que :

- 1) Le béton de sable se révèle apte à garnir les éléments les plus fines ou les plus inaccessibles des moules.
- 2) Le béton de sable conserve sa cohésion, son homogénéité et de bonnes résistances, sans apport d'énergie de serrage.
- 3) Le béton de sable garantit un bon enrobage des aciers, même si le ferrailage est très compliqué, et même quand la vibration est impossible ou inopérante.
- 4) Les distances de pompage sont accrues.

❖ **Qualité d'aspect**

Conséquence de leur ouvrabilité et de leur faible granularité, on peut obtenir facilement avec les bétons de sable des effets architectoniques aussi variés qu'étonnants et séduisants :

- 1) Aspect très lisse, type marbre.
- 2) Aspect finement grenu, type pierre Moreau.
- 3) Arêtes parfaitement définies.
- 4) Reproduction fidèle de moules extrêmement fins.
- 5) Absence de défauts d'aspect, notamment dus à la ségrégation.

❖ **Homogénéité-cohésion**

Composition et granulométrie confèrent aux bétons de sable homogénéité et cohésion. L'intérêt essentiel en est une réduction significative de la ségrégation, et de tous les défauts qu'elle entraîne. Mais ils offrent aussi une bonne résistance au délavage et une meilleure tenue aux chocs.

I.1.4.2. Inconvénients des bétons de sable

- 1) Le retrait plus grand (évaporation de l'eau)
- 2) Le cout élevé par rapport au béton ordinaire
- 3) Le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des bétons ordinaires.

I.1.5. Les Composants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre au besoin de certain usage, d'autres Ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants...etc.

I.1.5.1. Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes **NF P 18- 540** et **NF P 18-101** il peut s'agir 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 granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même horométriques, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0 /D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

I.1.5.2. Les fines d'ajout (filler calcaire)

Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif. Son avantage est sa finesse qui peut être utilisée pour optimiser la granulométrie de mélanges de béton.

L'addition de filler calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fin, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable. Les fillers 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.

I.1.5.3. Fumé de silice

Les fumées de silice sont des résidus évacués de la chambre de combustion d'un four Destiné à produire du 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 (Photos 1), leur surface spécifique est de l'ordre de 20 à 25 m^2/g . Lorsque les Microsphères sont bien dispersées, elles vont s'empiler dans les espaces interstitiels restés vides 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. La grande finesse et surface spécifique des fumées de silice tendent à augmenter la Quantité d'eau nécessaire pour atteindre la même maniabilité qu'un béton sans fumée de silice. Cependant, en présence d'un super plastifiant et utilisées 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 chétivité du béton et diminuent donc le ressuage et la ségrégation.

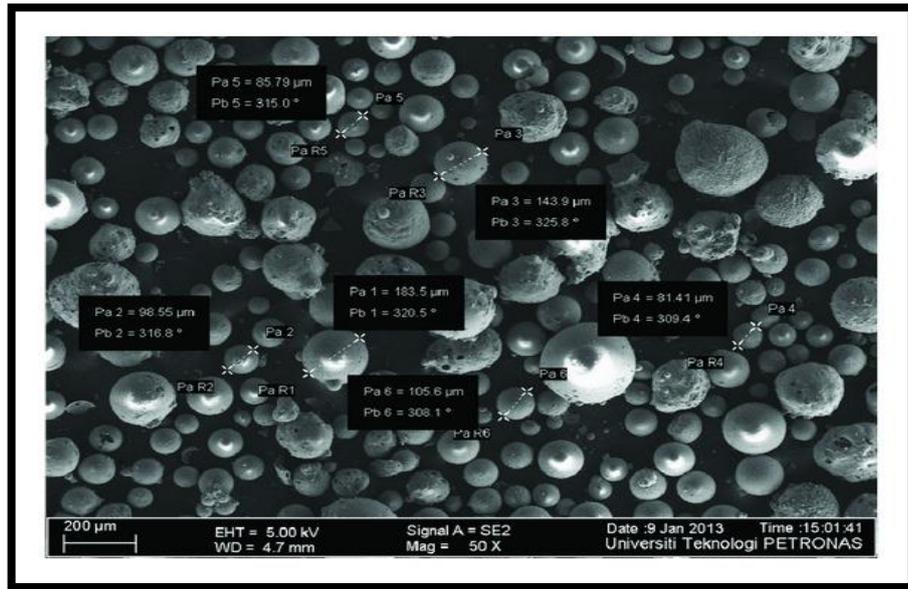


Figure I.1. : Microstructure du fumé de silice

L'utilisation de fumées de silice à des dosages de 7 à 15% 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 durable. 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. Par son effet filler et par la formation d'une phase liante, la fumée de silice contribue donc au renforcement des propriétés mécaniques du matériau durci.

Les caractéristiques des interfaces pâte- granulat (zone de transition poreuse) en sont grandement améliorées : absence de cristaux de grandes dimensions et orientés, absence de concentration de fissures, meilleure cohésion et meilleure adhérence pâte -granulat. L'augmentation de la qualité des interfaces a un impact direct sur la microfissuration initiale et le processus de fissuration. [2]

I.1.5.4. Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu...et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine.

I.1.5.5. L'eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18- 303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable D'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables.

I.1.5.6. Les adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour Modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés Mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action Principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires. On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons Traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable Privilégie toutefois l'usage du plastifiant ou super plastifiant : ils améliorent la maniabilité, le Plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et De la défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui ont été utilisés Dans cette étude. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103.

I.1.5.7. Autres ajouts

- **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. Si l'on veut améliorer la Ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe.
- **Les fibres polypropylènes** : Les fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui, une fois dans le malaxeur, se Séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus courantes varient De 10 à 50mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns. Les fibres polypropylènes améliorent la résistance aux chocs, à l'écaillage et limitent-les Risques de fissuration dus au retrait dans les premiers âges du béton. Par ailleurs leur ajout ne Diminue pas la maniabilité du béton mais au contraire aurait tendance à l'améliorer.

Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les Plus courtes étant choisies pour des micro- bétons, les plus longues pour ceux dont le « D » Est important. Les quantités à mettre en œuvre sont de l'ordre de 0.5 Kg jusqu'à un maximum De 2 Kg/m³ De béton, soit entre 0.05 et 0.2% en volume. Dans la majorité des cas les Dosages habituels sont de 600 g/m³ Ou 900g/m³ et très rarement 1200 g/m³.

- **Les gravillons :** On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et Conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a Affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste Inférieur à 0,70.
- **Les colorants :** Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être Employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier Dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une Stabilité de la teinte au cours du temps.

I.1.6. Application du béton de sable

Procéder à la construction d'une dalle en béton sablé est une opération minutieuse, qui doit absolument être réalisée par un professionnel. Le principe est le suivant : une machine à air comprimé appelée sableuse permet une éjection à forte pression directement sur la surface du béton. Ce traitement mécanique appelé sablage est appliqué après durcissement du béton, de sorte de ne pas altérer ses propriétés mécaniques.[3]

Le décapage de la dalle de béton grâce au sablage permet de décaper la surface de la dalle de béton et dans ce cas précis, de faire ressortir les granulats et de conférer un aspect uniforme et doux au béton. On estime que l'opération est terminée lorsqu'il n'y a plus d'effervescence au contact du béton. Par la suite, comptez environ 28 jours de séchage.

Les bétons de sable sont employés à grand échelle dans plusieurs domaines telle que le domaine de Préfabrication : bordures et toitures, tuyaux, mobilier urbain, voûtes en voiles minces, Caissons de plafond, cloisons et autres éléments constructifs d'immeubles, etc. et aussi dans le bâtiment, ou le BS consiste à remplacer le BO dans des structures en béton armé coulé et vibré, ou hyper compacté : (éléments horizontaux et verticaux, dalles, fondations ...etc.).

On trouve également des réalisations en béton de sable dans le domaine des chaussées Routières et aéroportuaires ainsi que dans des travaux de calage de bourrage ou d'injection, Sans oublier le plus important dans notre recherche, son utilisation dans le domaine des Réparations. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent d'avantages à ses Propriétés spécifiques par rapport au béton traditionnel, qu'a l'économie qu'il pourrait Représenter en remplaçant celui-ci. Pour mettre en évidence l'utilisation des BS dans la rénovation et réparation des Ouvrages, on peut citer quelques exemples d'applications ou on mentionnera quelques Formulations avec caractéristiques mécaniques des bétons de sable de réparation de quelques Ouvrages.[4]

❖ **Réhabilitation des silos à grains à Moscou**

Les travaux de rénovation avec Ferrailage de surface et une couche de béton de sable en 6 cm d'épaisseur.

❖ **Réhabilitation d'un réfrigérant**

Centrale thermique de LYNBERTSY (banlieue de Moscou) 1975.

❖ **Pont de CASTAGNE de sur la salat**

(Construit entre 1862 et 1867) et pont de saint MAR tory (construit entre 1724 et 1727), en France : Réparation des deux grands ouvrages d'art en 1991, le problème qui s'est posé c'est l'érosion des fondations qui ne reposent plus sur le substratum, alors la réparation se fait en réalisant des corsets et des remplissages parfaits des vides qui compte de béton de sable.

❖ **Réhabilitation structurante**

- 1) Collecteur encombré Agrippa d'Aubigné de la ville Paris.
- 2) Collecteur fortement dégradé NAUJAE de la ville Bordeaux.

❖ **Réfection de l'habillage**

Talus abrupt en bordure d'une autoroute urbaine (**A10, Lormont (France)**).

❖ **Réhabilitation d'une buse métallique**

RN 89, ARTIGUES près de Bordeaux.

I.1.7. Propriétés des bétons de sable

Un concepteur qui retient le béton de sable comme matériau pour un élément de Construction a une démarche de « pensée béton », c'est-à-dire qu'il adopte un matériau Répondant aux critères qui ont permis le succès du béton, en termes de performances et Durabilité, mais aussi d'image et de comportement. Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton Frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité.[5] La maniabilité Dépend non seulement du rapport E/C, mais aussi du module de finesse de sable, et elle Dépend surtout du type et de la teneur en fines d'ajouts. Nous avons vu qu'il nécessite plus D'eau qu'un béton classique. D'autre part, il apparaît évident que le mélange ciment- sable Présentera une porosité plus élevée que la porosité du béton traditionnel. Cet inconvénient est Compensé par l'ajout de fines de bonne nature pour améliorer la compacité. Il faut choisir Donc des sables de bonne répartition granulaire. Il s'agit de trouver un compromis entre la Maniabilité du béton et sa compacité.

I.1.7.1. Résistance et maniabilité

Les bétons de sable se situent vers les bétons dont les usages requièrent une bonne Ouvrabilité. Les bétons de sable peuvent même autoriser des ouvrabilités qu'un béton Traditionnel ne permet pas d'atteindre. Ce raisonnement reste évidemment très schématique, car il est clair que les progrès dans les techniques d'adjuvantation, de composition, de traitement et de fabrication du béton permettent aujourd'hui de proposer des bétons de gravillons à hautes performances mécaniques présentant de bonnes maniabilités. De même si on fabrique des bétons de sable très maniables possédant d'excellentes performances mécaniques. Les dosages en ciment de ces bétons sont de l'ordre de 250 à 450 Kg/m³, la compacité optimale est atteinte par adjonction des fines et de plastifiant. La résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60MPa selon la composition.

I.1.7.2. Granulométrie- Résistance

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

- **La finesse de l'addition**

Plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc en gain de résistance ; ce résultat est valable quel que soit la granulométrie du sable.

- **La nature de l'addition**

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.

- **La dimension du D max (0/D)**

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate que l'effet du diamètre D max est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité ; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulue.

I.1.7.3. Durabilité

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques...etc., c'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité.

Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

Enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la Vanne, phare de Port –Saïd en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris.[7]

I.2. Béton compacté au rouleau (BCR)

I.2.1 Introduction

Le béton compacté au rouleau est un matériau peu coûteux à mise en place rapide qui convient parfaitement aux chaussées et aires de stockage, offrant ainsi une bonne durabilité et minimisant par conséquent les frais d'entretiens. Sa résistance, sa durabilité et sa facilité d'exécution en font la bonne solution pour les travaux routiers.

Le béton compacté au rouleau (BCR) est défini comme étant un mélange raide sans affaissement de granulats inertes, de ciment et d'eau (avec éventuellement des additions) qui est mis en place par compactage à l'aide des engins de travaux publics (rouleau compresseur vibrant, plaques vibrantes...). Le dosage en ciment varie de 60 à 350 kg/m³.

Le BCR s'est développé selon deux axes différents : le BCR pour barrages et ouvrages massifs, et le BCR pour routes (pavages). La formulation, les méthodes de confection et les méthodes de mise en œuvre diffèrent en fonction du type de BCR.

Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930. La première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord date depuis 1942. Alors que la première application du BCR publiée au Canada a été construite en 1976. Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le béton compacté au rouleau en pavage en Amérique, Espagne, Chine, Australie et d'autres pays.

En Afrique, le béton compacté au rouleau (BCR) reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique et ne s'est développé que pour la construction des barrages (Photos 1 et 2) et l'utilisation de ce matériau en pavage n'est pas encore abordée.

D'autre part, la répartition et la surabondance des matériaux granulaires naturels roulés et concassés (sables et graviers), l'implantation presque uniforme des cimenteries sur les territoires, les difficultés d'approvisionnement en liants hydrocarbonés, le moindre coût et le délai de réalisation réduit du béton compacté au rouleau sont des facteurs qui nous mènent à des réflexions et à la réalisation des études afin de caractériser.



Figure I.2. Etat du BCR frais lors de son déversement pour la préparation D'une planche d'essais (Tunisie)

Des études expérimentales sont faites par Gauthier et al. (S., Richard, M., Gauthier, C., & Bouchard, C. (2010)), au centre de recherche interuniversitaire sur le béton à l'université Laval au Canada pour caractériser et évaluer des mélanges de BCR avec des dosages en ciment variant de 225 à 300 kg par m³. Généralement, on cherche à employer que des matériaux résistants, peu sensibles à l'eau, et susceptibles d'être compacté. On s'intéresse dans ce travail à l'étude de la formulation et de la résistance du BCR pour pavage (application routière) ainsi qu'une évaluation économique de ce matériau avec une composition à base de granulats de gisements locaux (Tunisie). Nous cherchons par ce-ci une éventuelle utilisation de ce matériau dans les routes urbaines et rurales.

I.2.2. Historique du BCR

L'utilisation du ciment en construction routière en 1935 avec le sol ciment ; Technique semblable au BCR, le sol-ciment constituait un mélange granulaire auquel on ajoutait une faible quantité de ciment. Pour faire un remblai qui avait une capacité portante plus élevée qu'un remblai granulaire compacté. [8]

Cette technique a été utilisée pour faire le revêtement de voies d'accès et des cours de triage pour des entreposages forestiers en Colombie Britannique. En 1942, l'USA Army Corps of ENGINEER procéda à la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord. Jérôme Raphaëlle Université of Californie and Berkeley est le premier chercheur qui a présenté les concepts de base du (BCR) lors de la conférence sur la construction rapide des barrages en béton en 1970.

Son recherche "The Optimum Gravit y Dam" proposait les concepts de mise en place et de compactage d'un remblai de sol enrichi avec du ciment à l'aide d'équipements à haute capacité de production et à forte énergie de compaction Robert W. Canon a repris l'idée de Raphaël et a proposé en 1972, la construction de barrages dont le corps est en béton compacté au rouleau et les faces amont et aval en béton de masse conventionnel. Selon lui, de tels barrages auraient la même configuration qu'un barrage en béton conventionnel. L'application du BCR date de 1974 et consistait-en des travaux de réhabilitation du barrage Tarbela au Pakistan, suite aux endommagements qu'avait subi son évacuateur lors de la première mise en eau du réservoir.

La première application au Canada eut lieu en 1976 avec la mise en place d'une aire d'entreposage de billes de bois de 25000ml de surface sur l'île Vancouver en Colombie britannique, La construction du premier barrage en BCR (Japon) a débuté en 1978 et a été complétée deux ans après. Après 1980,

Au moins dix autres pays (France, USA, Norvège, suède, Finlande, Danemark, allemande, Australie, argentine, japon) on construit chaque plus de 10 000 m² de revêtement en BCR (5) Après ce succès plusieurs projet ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, En Afrique, le BCR reste jusqu'à maintenant une nouvelle technique qui ne s'est développée que pour la construction des barrages, et l'utilisation de ce matériau en pavage n'est pas encore abordée.

I.2.3. Définition

Le B.C.R. est un béton essentiellement mis en œuvre à l'aide des matériels classiques de terrassement, à l'exclusion des matériels spécifiques aux chantiers de barrage en béton classique

Blondins, grues tours, aiguilles de vibration, souvent coûteux d'installation et difficiles à amortir sur plusieurs chantiers. Le béton est amené en vrac, à son point d'utilisation par camions ou par tapis, étendu en couches minces par bulldozer puis compacté au rouleau lourd, en général vibrant. Ces éléments, communs à tous les barrages en B.C.R., induisent un certain nombre d'autres caractères identiques mentionnés plus loin.[9]

I.2.4. Les applications concrètes du BCR

1. Aires de travail industrielles.
2. Quais.
3. Aires de stationnement.
4. Terminaux de transport.
5. Dalles de propreté.
6. Fosses de rétention de purin.
7. Routes.
8. Barrages.

I.2.5. Avantages et inconvénients du BCR

1.2.5.1. Avantages

❖ La durabilité

L'un des avantages les mieux connus du béton est sa durabilité. Cette durabilité mène à une réduction des travaux de construction et d'entretien qui entravent la circulation.

❖ Moins de travaux d'entretien

ERES indique en outre dans son rapport que les routes asphaltées exigent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contraste, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton qu'après 12 ans.

❖ Moins de déformation

Vu la souplesse du revêtement en asphalte, les véhicules de fort tonnage peuvent finir par y creuser des ornières. La poussée qu'ils exercent sur le revêtement peut aussi, à long terme, le faire plisser et lui donner l'apparence d'une tôle ondulée. La rigidité du béton empêche toutefois ce genre de déformations de se produire. D'autre part le béton ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur.

❖ Une meilleure adhérence

Les études ont démontré que le béton assure, dans l'ensemble, une meilleure adhérence et une distance d'arrêt plus courte que l'asphalte, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.

❖ Des économies de carburant (jusqu'à 20 %)

La chaussée souple fléchit davantage que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à supposer qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple. La rigidité de la chaussée en béton réduit la déflexion et diminue ainsi la consommation de carburant. Une meilleure visibilité la nuit : La chaussée en BCR assure une meilleure visibilité la nuit. Comme le béton est de couleur claire, il réfléchit mieux la lumière des phares et des lampadaires que l'asphalte, qui est foncé. Autrement dit, il y a plus de lumière visible.

1.2.5.2. Inconvénient du BCR

- ❖ La qualité et l'uni de surface des revêtements en BCR peuvent être adaptés selon les différents types d'applications visées, ils représentent le majeur inconvénient de cette technique. La texture de la surface d'un revêtement est mesurée à l'aide de l'essai de tache de sable. Cet essai détermine la profondeur moyenne de la macro -texture de la surface (ASTM E 965). Il existe également d'autres méthodes de mesure de la texture d'un revêtement telles que le laser, la stéréoscopie.
- ❖ L'uni d'une chaussée est exprimé par la variation positive ou négative des élévations de la surface d'une chaussée par rapport à une surface plane. On distingue des ondulations longitudinales des ondulations transversales. L'uni (confort au roulement) d'un revêtement en BCR a resté toujours un problème limitant relativement les applications du BCR où la vitesse des véhicules représente une caractéristique importante. L'uni de surface des revêtements en BCR est grandement influencé par les procédures de construction, par les variations du degré de compactage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les opérations de compactage.

1.2.6. Identification des constituants du mélange du BDR

1.2.6.1. Les liants :

Son utilisation répond à pas mal d'exigences parmi lesquelles la résistance mécanique, les critères de durabilité exigés ainsi que les contraintes économiques telles que : la disponibilité et le coût des ajouts, le coût du transport, etc. Le liant est de type hydraulique, fin, pulvérulent, et peut être :

Le ciment Portland : CEM I, CEM II selon les performances voulues.

Les ciments en laitier ou en cendre : CEM III, CEM III, CEM IV, CEM V. Ces ciments présentent un début de prise plus lent et un durcissement plus progressif et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du BCR. Pour la construction de revêtements de chaussées en BCR, les mélanges généralement avec des dosages en ciment variant entre 250 et 350 kg/m³, représentant une proportion totale en liant comprise entre 10 et 16% de la masse totale des constituants secs.

Les forts dosages en liants ne sont pas très rentables car une teneur en ciment trop élevée peut gonfler les coûts de production sans augmenter significativement les résistances mécaniques ou prolonger la durée de vie du revêtement. Les propriétés nécessaires des liants hydrauliques utilisés pour le BCR sont principalement :

Une faible chaleur d'hydratation :

Une prise retardée ou un temps de prise assez long, Le pourcentage C₃A doit être limité pour garantir une bonne durabilité et éviter la dégradation, Il faut noter qu'une teneur trop élevée de ciment favorise les fissures, augmente le coût de production et ne permet pas nécessairement une augmentation des performances. Une bonne résistance aux sulfates car l'eau peut contenir des agents agressifs. **Invalid source specified.** Plusieurs types de liants ont été utilisés pour le BCR, on trouve principalement le ciment normalisé du même type que ceux utilisés pour le BC, le ciment avec des additions en quantité souvent importante de cendres volantes (principalement), de laitier moulu ou de pouzzolanes, L'utilisation d'un liant à base de laitier permet d'obtenir un délai de maniabilité beaucoup plus long. Pour la construction des grands projets, la combinaison de plusieurs produits (cendres volantes, laitier moulu, pouzzolanes...) à la centrale de fabrication du BCR, permet de faire des économies très intéressantes.

I.2.6.2. Les granulats NF P18-101

Les granulats sont définis par la norme NF P18-101 comme étant l'ensemble de grains minéraux, les granulats peuvent être roulés (siliceux) ou concassé (calcaire) et de dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Le type des granulats et leur granulométrie influencent sur la qualité et les propriétés de BCR. Ils représentent un constituant essentiel et un élément permanent des mélanges de BCR. Les granulats occupent généralement entre **75 et 85%** du volume total d'un mélange de BCR.

Les granulats ont donc une influence marquée à la fois sur les propriétés du BCR à l'état frais et sur celles à l'état durci. Pour assurer un bon béton ayant des meilleures caractéristiques mécaniques et physiques ainsi qu'une durabilité idéale, il faut choisir bien Les granulats.

Ils doivent composés des particules propres, dures, résistances, durables, exemptes de tout produit chimique et non recouvertes d'argile ou de tous autres matériaux fins qui pourrait nuire à l'hydratation et l'adhérence de la pâte de ciment.

La forme et la texture des granulats influencent plus les propriétés du béton frais que celles du béton durci. Les particules plates et allongée ou surface rugueuse demandent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les particules arrondies ou cubiques.

Pour un rapport eau/ciment donnée et une maniabilité requise, il faut donc plus de ciment si l'on utilise des particules angleuses. La forme et la texture des granulats influencent plus les propriétés du béton frais que celles du béton durci.

Les particules plates et allongée ou surface rugueuse demandent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les particules arrondies ou cubiques. Pour un rapport eau/ciment donnée et une maniabilité requise, il faut donc plus de ciment si l'on utilise des particules angleuses. La porosité, la perméabilité ainsi que l'absorption des granulats influencent la résistance au gel des bétons. La porosité des granulats varie généralement entre 0% et 50%.

Pour limiter les problèmes de ségrégation et en vue d'une meilleure qualité de surface, la Dimension maximale du granulat D doit être inférieure à 20 mm. Le fuseau granulométrique Doit être divisé en plusieurs fractions (exemple : 0/3-3/8-8/15).

Toutes les fractions granulométriques doivent avoir un indice de concassage supérieur à **30%** dans le cas d'un trafic élevé. Ces granulats ont un teneur en matière organique inférieur à **0.2%**.

Il faut noter que le choix d'un D élevé a comme avantages :

1. Une économie d'énergie à la préparation des matériaux ;
2. Une résistance mécanique plus élevée à dosage de liant constant ;
3. Une amélioration du transfert de charges aux joints en l'absence de dispositif particulier.

Quant aux granulats fins, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc une bonne compacité à l'état durci. Toutefois, un pourcentage élevé de fines entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place. Certaines substances nuisibles sont présentes dans les granulats. Par exemple, une teneur trop élevée en sulfates et sulfures peut occasionner la formation gonflant dans le béton durci. Cela entraîne généralement un gonflement et la fissuration du béton. Les chlorures quant à eux peuvent perturber la prise du ciment, attaque les armatures et le ciment.[10]

- **Les granulats fins $\emptyset < 5 \text{ mm}$**

La fraction granulaire (0-5) joue un rôle important dans le remplissage de l'espace inter granulaire. La présence de cette fraction peut atteindre 40% dont elle améliore le compactage et par conséquent la compacité du mélange. Des granulats de cette classe sont issus soit directement des gîtes et des carrières, ou obtenus par concassage et broyage d'une roche. Ils peuvent aussi provenir de carrières de sable fin, ou de dépôts de silts, ou être constitués par des cendres volantes sèches ou humides.

La Compactibilité et la portance du matériau frais dépendent de la quantité de pâte et de mortier lorsqu'elle remplit juste les vides entre les grains de graviers (granulométrie "creuse") et particulièrement si les granulats sont concassés.

Par analogie au BC, un excédent de pâte et de mortier peut conduire à certains avantages tels que la limitation de la ségrégation et l'amélioration de l'étanchéité du matériau. Par contre, il est très difficile d'aboutir à une compacité maximale sur toute l'épaisseur de la couche mais on obtient un matelassage.

- **Les éléments fins $\emptyset < 80 \mu\text{m}$**

Pour les éléments fins dont le diamètre est inférieur à 0.08 mm, leur pourcentage varie entre 7 et 15 %. Cette fraction granulaire améliore considérablement le compactage. Le Projet National Français a montré qu'avec une teneur en éléments fins totale, y compris liant, variant entre 8 et 15 %, on obtient un bon comportement du BCR au compactage. Cette proportion peut contenir des fines artificielles ou naturelles provenant des granulats. En revanche, la partie des éléments fins provenant des granulats a souvent des propriétés actives (favorables ou nocives). Certains éléments fins peuvent avoir des propriétés permettant des économies par la réduction de la teneur en ciment.

Ces fines peuvent agir négativement pour réduire sensiblement les résistances en traction directe et au cisaillement lorsqu'elles sont dosées en excès, du fait des décollements pâte /granulats et de l'enrobage des éléments fins par le liant. Gauthier et Marchand ont précisé que les résultats d'une étude de laboratoire, réalisée sur le comportement mécanique et la durabilité au gel de mélanges de BCR, ont montré que l'ajout d'environ 7% de filler calcaire (particules minérales inférieures à 80 μm) par rapport à la masse totale des matériaux secs dans des mélanges de BCR peut généralement contribuer à améliorer les propriétés du béton.

L'introduction d'éléments fins, surtout s'ils sont, permet, dans la plupart des cas, une diminution de la teneur en liant, et par conséquent, provoque une réduction de la chaleur d'hydratation, un retard de la prise, une diminution du coût du liant et une augmentation du volume de pâte dans l'espace intergranulaire.[11]

I.2.6.3. Les additions

Les additions sont définies par les chercheurs comme des matériaux minéraux finement broyés et qui peuvent être ajoutés au BCR pour lui confier des propriétés particulières ou pour améliorer certaines de ses caractéristiques.

Pour obtenir une bonne cohésion et maniabilité du BCR à l'état frais et une bonne compacité et durabilité à l'état durci, une quantité d'éléments fins est nécessaire. On a recours à des additions dans le cas d'une insuffisance de fines dans la composition des éléments. Alors que l'excès d'éléments fins n'est pas favorable car ceux-ci demandent une importante quantité d'eau ce qui peut entraîner des pertes de résistance mécanique.

D'après Gagné, les études ont montré aussi que la majorité des revêtements en BCR construits ces dernières années ont été fabriqués avec des ciments hydrauliques composés avec des additions soit de fumées de silice, de laitiers ou de cendres volantes. La norme ENV 206 propose deux classes pour les additions :

- Le type I (additions quasiment inertes)
- Le type II (pouzzolanes et additions à caractères hydraulique latent) Il existe quatre additions utilisables pour le BCR :

- **Les additions calcaires [NF P 18-508]**

Les additions calcaires sont définies selon Baron et Olivier comme étant des produits secs finement broyés de densité variant entre 2,1 et 2,7. Ils sont obtenus par une fine division de roches calcaires provenant de gisement pouvant être dolomitique, massives ou meubles dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P 18-508.[12]

- **Les cendres volantes [NF EN 450]**

Les cendres volantes sont des poudres fines de densité variant entre 1,9 et 2,8 et constituées principalement de particules vitreuses de formes sphériques. Chimiquement, ces fines définies par l'ENV 197-1, ont essentiellement des propriétés hydrauliques. Le taux maximal de substitution de ciment par une cendre volante est limité à 25% par rapport à la masse totale du liant [1.1]. La contribution des cendres volantes à l'amélioration des propriétés et de la qualité du BCR est essentielle puisqu'elles permettent sa compaction complète. Selon al. Et Cao et al. Les cendres volantes peuvent apporter d'autres avantages d'ordres chimiques tels que la réduction de chaleur d'hydratation. Historiquement, depuis les années 1980, le BCR composé de cendres volantes a pris une place plus importante et remplace progressivement les mélanges usuels de béton pour la construction à coût plus réduit de plusieurs ouvrages routiers. De point de vue proportion, lorsque l'ajout de cendres de classe F dans la terminologie des Etats-Unis est faible (de l'ordre de 20 à 30 %), celles-ci participent totalement à la réaction de prise. Par contre, lorsque cette proportion est très élevée (de l'ordre de 60 %), une partie de ces fines ne participe pas à la réaction mais se présente comme des fines de remplissage. Les cendres volantes utilisées en France sont des cendres de lignite. Ces cendres sont, en fait, des bons liants hydrauliques qui peuvent faire prise de façon autonome (cendres volantes de classe C)

- **Les laitiers vitrifiés moulu de haut fourneau [NF P 18-506]**

Les laitiers vitrifiés moulus sont des additions du type II suivant la classification « ENV 206 » dont leur densité varie entre 2,85 et 2,95.[63]

Ils proviennent du broyage fin du laitiers vitrifiés (granulé ou bouleté) qui est lui-même un coproduits de la fabrication de la fonte de haut fourneau. Les particules de ces produits ont des propriétés hydrauliques en présence de calcium et d'alcalis qui peuvent provenir du ciment après hydratation.

- **Les fumées de silices [NF P 18-502]**

Ces additions sont définies, d'après Baron et Olivier, comme étant des poudres amorphes finement broyées (silice amorphe de densité spécifique de l'ordre de 2,2 à 2,25) provenant de la production d'alliages de silicium. Elles sont récupérées par le système de captage après être entraînées par les gaz, depuis la zone de combustion des fours. Elles sont considérées comme des additions de type II selon la classification « ENV 206 » et substituables au ciment.[14]

I.2.6.4. L'eau de gâchage

La quantité d'eau dans un mètre cube de BCR, sert d'abord pour l'hydratation du ciment et le mouillage des granulats.[15] Elle permet au BCR d'avoir les qualités de plasticité et d'ouvrabilité, qui sont contrôlées, en général, par des essais et des mesures appropriées. Une partie de cette eau peut être absorbée par les granulats alors qu'un autre reste libre et ceci en fonction de leur porosité (NF EN 1008).

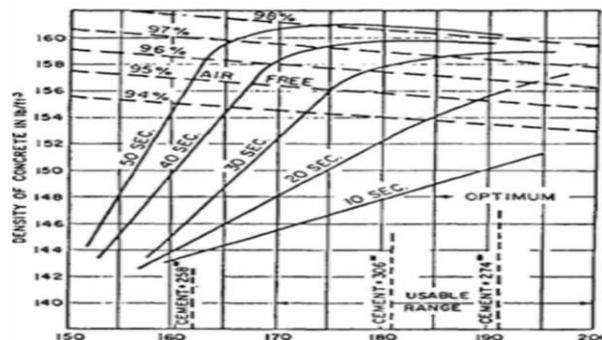


Figure I.3. Effet de la vibration et de la teneur en eau sur la densité du BCR (à base de ciment)

La plage de variation de la teneur en eau, qui est le pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs, est comprise entre 4,5% et 6%. Ce dosage en eau, considéré relativement faible par rapport à celui du BC, permet d'obtenir un béton sec à affaissement nul. Alors que si on considère la teneur en eau efficace définie par la norme EN 206, cette teneur représente la différence entre la quantité d'eau totale introduite dans le béton frais et la quantité d'eau absorbée par les granulats. On définit alors la quantité d'eau totale comme étant la quantité d'eau ajoutée, y compris l'eau déjà contenue dans les granulats, ainsi que la quantité d'eau mélangée avec les adjuvants. D'autre part, la quantité optimale d'eau à employer permet d'obtenir des résistances maximales.

Expérimentalement, cette quantité d'eau est dosée en fonction du mode et des moyens de serrage disponible sans être influencée par les autres conditions telles que les moyens de transport, moyens de malaxage. Pour la détermination de la quantité d'eau de gâchage, plusieurs formules peuvent être appliquées, nous citons quelques-unes :

- Formule de FERET
- Formules de BOLOMEY
- Formule d'ABRAMS

I.2.6.5. Les adjuvants

Un adjuvant est défini comme étant un produit chimique qui est additionné au béton selon une proportion n'excédant pas 5% de la masse totale du ciment et ceci dans le but d'améliorer ou de modifier certaines de ses propriétés. Il est incorporé au cours du malaxage ou au cours d'un malaxage complémentaire avant la mise en œuvre du béton. Les adjuvants sont distingués par leur caractère chimique, différent de celui des autres minéraux utilisés dans la fabrication du BCR. Ils sont organiques ou inorganiques selon leur composition chimique. Gauthier et Marchand, ont indiqué que la plupart des adjuvants chimiques employés pour la fabrication des BC peuvent être employés pour le BCR. Le dosage des adjuvants nécessaire à la fabrication des BCR est largement supérieur à celui du BC afin d'améliorer ces performances. En effet, puisque les revêtements en BCR ne contiennent pas d'armatures alors les faibles teneurs en ions chlorures en solution dans certains adjuvants chimiques n'ont pas d'effets néfastes. Cependant, il faut prendre des précautions car certains des adjuvants accélèrent ou retardent la prise du BCR comme c'est le cas pour les plastifiants.

- **Les entraîneurs d'air**

On opte couramment à l'utilisation des entraîneurs d'air malgré que la formation de vides d'air sphériques par l'emploi de ces agents dans les mélanges de BCR est plus difficile à produire que dans le cas des BC.

Cette difficulté est expliquée par l'insuffisance de la quantité d'eau nécessaire pour entourer les bulles d'air formées dans un mélange de BCR. L'action recherchée par des agents entraîneurs d'air est de faciliter la formation des bulles en diminuant la tension de surface de l'eau et en fixant les bulles d'air formées durant le malaxage.

Par analogie avec l'idée de Baron et Olivier, un BCR courant sans ajouts d'agents entraîneurs d'air, contient couramment une quantité de bulles d'air dont le diamètre est généralement supérieur à un millimètre.

Ces bulles d'air formées dans le BCR durci constituent le phénomène d'air occlus. En effet l'air occlus formé n'est pas comparable aux petites bulles qui sont fixées par l'ajout des entraîneurs d'air. Généralement, un BCR à air entraîné contient un volume de 5 à 6% d'air

- **Les retardateurs de prise**

En général, les retardateurs ralentissent l'action de prise de la pâte. Ils n'altèrent ni la nature ni la composition des éléments et des produits d'hydratations. Ces agents permettent d'allonger le délai de prise afin de procéder à la mise en œuvre du BCR.

Ainsi, les délais normalement spécifiés pour la fabrication, la mise en œuvre et la réalisation des joints horizontaux et verticaux peuvent être prolongés aussi. [16]

- **Les accélérateurs de durcissement**

Les agents accélérateurs de durcissement sont à base des sels minéraux. Le plus employé est le chlorure de calcium (CaCl_2). Ce produit favorise la formation et la croissance du silicate de calcium hydraté C-S-H.

D'autres produits comme les sels de magnésium comme des accélérateurs dont leurs effets sont identiques à ceux du chlorure de calcium. Ce dernier demeure l'accélérateur de durcissement le plus employé car il est le plus puissant et le plus économique.

Par contre, pour des zones connues par des températures élevées, ces accélérateurs sont caractérisés par un dégagement de chaleur d'hydratation très important qui peut faire fissurer le BCR.

I.2.7. Maniabilité du BCR

A l'état frais, la maniabilité est la principale propriété du BCR, elle est définie comme étant l'indice de l'effort qui doit être fourni pour bien consolider un matériau frais. Elle représente aussi l'énergie de compactage nécessaire pour consolider adéquatement le matériau frais. Expérimentalement, la maniabilité d'un mélange de BCR est mesurée en déterminant le temps requis pour compacter avec une énergie normalisée une certaine quantité de BCR. La caractéristique de maniabilité du BCR est principalement fonction du dosage en pâte (eau et ciment). La bibliographie montre que la maniabilité du BCR doit être généralement comprise entre 40 et 90 secondes (temps VEBE) au moment de la mise en place.

I.2.8. Propriétés de BCR

I.2.8.1. Etat frais

- **Teneur en air**

La détermination de la teneur en air du BC est réalisée à l'aide d'un appareil appelé aréomètre. Cette méthode d'essai n'est pas généralement employée pour le BCR qui est relativement plus sec à l'état frais. Sous cette forme, le BCR ne possède pas la déformabilité et la plasticité nécessaire à la réalisation de cet essai. Le faible dosage en eau et l'état sec obtenu limite la plasticité de la matrice et favorise un contact étroit entre les granulats.

- **Cure du BCR**

Pour minimiser les retraits de séchage pendant la mise en place, il est important de maintenir l'humidité superficielle des surfaces exposées afin de ralentir le phénomène de séchage par les procédés suivants :

1. Retardateur d'évaporation
2. Vaporisation d'eau en bruine
3. Application d'un produit de cure pigmenté blanc juste après le compactage final du BCR.



Figure I.4. Application d'un produit de cure après compactage du BCR - aire Industriel – Montréal.

- **Masse volumique**

Elle permet de déterminer le volume d'une masse donnée et sert de moyen de vérification de l'uniformité du BCR. Sa connaissance est importante pour un bon compactage du matériau puisqu'elle nous renseigne sur le degré de compactage sur le terrain. Elle est déterminée au laboratoire au cours de l'essai Proctor modifié.

- **Ségrégation**

C'est la ségrégation des différents composants lors de la mise en place et elle a pour conséquence une perte d'homogénéité et de résistance. A cause du faible volume d'eau, le BCR est très sensible à la ségrégation.

Cette dernière est fonction de la granulométrie, de la Grosseur maximale du gros granulat et des caractéristiques de la pâte.

Pour pallier cette ségrégation, des précautions doivent être prises lors de la fabrication et du Transport Lors de la mise en place, les zones sensibles à la ségrégation comme les joints frais et les joints de reprises doivent être réalisées avec précaution.

Le passage des équipements de compactage sur les zones de ségrégation doit être précédé de l'ajout de matériaux de dimension inférieure à 5 mm tamisés à partir du BCR frais.

I.2.8.2. Etat durci

- **Etat de la surface**

La fermeture de la surface de roulement du pavage en BCR représente un paramètre très important dans le choix des granulats et le processus de formulation des mélanges. En effet, l'uni d'une chaussée en BCR est fortement influencé par les procédures de mise en œuvre, par les variations de l'indice de serrage, par l'uniformité de la mise en place du finisseur et par les engins et le mode de compactage. Le confort au roulement est influencé par l'uni d'un revêtement en BCR qui reste, comme on l'a mentionné avant, un facteur limitatif pour des applications du BCR où la vitesse des véhicules est un élément très important telle que pour les voies express et les autoroutes.

- **Résistances à la compression et à la traction**

Il faut réaliser des essais en laboratoire sur le BCR pour déterminer les caractéristiques de matériau au point de vue physique et mécanique. Ces essais permettent aussi de fixer les propriétés du matériau, ceci soit dans le cas des charges d'exploitation normales. Les propriétés de la matrice cimentaire et des inclusions granulaires expliquent les résistances à la compression élevées de ces mélanges. La résistance est influencée par la compacité du mélange. Le faible dosage en ciment et en eau de ces dernières produit une matrice cimentaire peu poreuse, due à une bonne résistance. Aussi les caractéristiques mécaniques du BCR influencées par deux composants, la pâte de ciment hydratée et les granulats.

- **La résistance à la flexion**

Pour dimensionner une chaussée en BCR, la résistance à la flexion de ce matériau est le paramètre le plus important. Cette résistance est généralement plus élevée que celle des BC si les mélanges sont formulés adéquatement en optimisant leur squelette granulaire.

La bonne performance du BCR en flexion est directement influencée par la compacité du mélange dans lequel les granulats sont parfaitement en contact les uns contre les autres. En effet, la compacité granulaire s'oppose à la propagation des fissures qui nécessitera une énergie plus forte pour se propager. Couramment, l'estimation de la résistance à la flexion du béton à partir de la résistance à la compression est déterminée par la relation suivante :

$$F_f = 0,6 \cdot \sqrt{F_c}$$

Dans laquelle F_f est la résistance à la flexion et F_c est la résistance à la compression. Par contre, les travaux de recherche d'Ouellet ont permis d'établir la relation (6) qui est une relation empirique entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion des BCR à 28 jours.

$$F_f = (F_c) \cdot 0,459$$

1.2.9. Durabilité du BCR

En se basant sur des études faites, on peut comprendre que l'évaluation de la durabilité du BCR est notablement très intéressante pour la compétitivité de ce matériau. Cette caractéristique est démontrée par sa robustesse qui est la plus apparente au printemps, pendant le dégel.

Le BCR a montré aussi une bonne résistance au ramollissement que subit sa couche de forme sous l'action du dégel et qui affecte sensiblement les revêtements en BB. Les études faites par L'American Association of State High way and Transportation Official ou l'AASHTO a démontré que près de 61 % des revêtements en BB subissent des dommages notables pendant cette période, comparativement à 5,5 % seulement des chaussées rigides en BCR ou en béton. ERES indique aussi dans son rapport que les routes en BB exigent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contre, on ne commence à faire des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton qu'après 12 ans. Du point de vue sécurité, l'expérience a montré que les conducteurs préfèrent la rigidité du BCR sur la souplesse du BB. En outre, les études faites par l'Université de l'Illinois, surtout celle intitulée, a démontré que la chaussée rigide assure, dans l'ensemble, une bonne adhérence et une distance d'arrêt plus courte que les revêtements en BB, surtout en cas de revêtements mouillés. De point de vue énergie, les expériences menées par le motoriste Detroit Diesel qui a fait entrer le type de chaussée dans le calcul du rendement énergétique des véhicules simulés par son logiciel Spec Manager, ont montré que l'estimation de la consommation de carburant d'un camion dans le cas d'une chaussée rigide est inférieure de 8 % à celle qu'on obtient dans le cas d'une chaussée en BB froid et de 17,5 % à celle d'une chaussée en BB chaud à 100 km/h. Le principe du logiciel c'est qu'il attribue un facteur correspondant au type de revêtement égal à 1 pour le type rigide, 1,2 pour type souple froid et 1,5 pour type souple chaud en maintenant toutes les autres variables constantes.[17]

I.3. Conclusion

Nous avons donné un concept général sur le BS et le BCR. Et d'après la description des constituants du béton de sable, on a pu les définir, ensuite décrire leurs propriétés spécifiques (maniabilité et granularité fine), et on a expliqué ce qui différencie le BSCR d'un mortier.

En effet le béton de sable est un matériau non fissurant, cette hypothèse est expliquée par l'absence des gros granulats et du faible module d'élasticité, de plus son uniformité du séchage, et aussi par la porométrie et l'homogénéité de ce matériau BS. Tous ces facteurs déterminant cette absence de fissures sont confirmés. Le béton compacté au rouleau est un béton très ferme (d'affaissement nul composé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, dont la mise en place nécessite un compactage externe pour être bien consolidé. Ce béton raide, n'est pas armé et sa compacité très élevée Le BCR présente une grande résistance et une bonne durabilité donc, est bien adapté aux charges des équipements lourds.

Chapitre II :

Méthodologie

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés pour élaborer les mélanges de béton de sable compacté au rouleau ont été rapportés, ainsi que les essais réalisés pour l'identification des matériaux et la fabrication du béton.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Les sable

Le sable est une matière solide granulaire constituée de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale (essentiellement des roches) ou organique (coquilles, squelettes de coraux, etc.) dont la dimension est comprise entre 0,063 mm (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie.

Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths, etc.) ainsi que des débris calcaires.

Nous avons utilisé dans cette étude trois types du sable, sable dune de deux emplacements différents et sable concassé :

- ❖ **Sable dune 01** : Le sable dune qui nous avons utilisé destiner à Oued Souf.
- ❖ **Sable dune 02** : Le sable dune qui nous avons utilisé destiner à Boussaâda.
- ❖ **Sable concassé** : Le sable dune qui nous avons utilisé destiner à Sétif.



Figure II.1. Sable utilise.

II.2.2. Ciment

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.

Les ciments utilisés dans cette recherche sont des ciments portlands composites (Mâtine) classe 32.5 N qui présentent des performances mécaniques et des caractéristiques physicochimiques conformes à la norme **NA 442, EN 197-1** et à la norme **NF P 15-301194** provient de la Lafarge de m'silla. Les essais sont réalisés selon les normes ci-dessous :

Tableau II.1. Caractérisation du ciment.

Consistance normale (%)		27
La Surface spécifique Blain (cm²/g)		3200
Temps de prise (min)	Début	150
	Fin	250
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	10
	28 jours	32.5



Figure II.2. Ciment Portland Composé (CEM II, 32.5 N)

II.2.3. Filler de 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 fillers 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.



Figure II.3. Filler calcaire.

II.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de BBA. L'eau sert d'une part à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte. Dès que l'eau entre en contact avec le ciment anhydre, elle réagit pour se combiner et former les hydrates de ciments.

II.3. Essai réaliser :

II.3.1. Analyse granulométrique, NF P 94-056

III.3.1.1. Généralité

L'essai granulométrique est une manipulation de laboratoire qui permet de classer les grains d'un sable en fonction de la taille des grains. Pour cela on utilise des tamis, de tailles de mailles différentes, empilés. Celui qui a la maille la plus grande est au-dessus.

Une quantité de sable est mise en partie supérieure, l'ensemble est remué. Les grains passent à travers les mailles et sont arrêtés par une maille plus petite que leur taille. La quantité passée s'appelle "**tamisât**". La quantité retenue s'appelle "**refus**". Puis on pèse chaque refus (Cet essai sera prochainement vu en laboratoire). Ces données sont traitées pour obtenir une courbe.

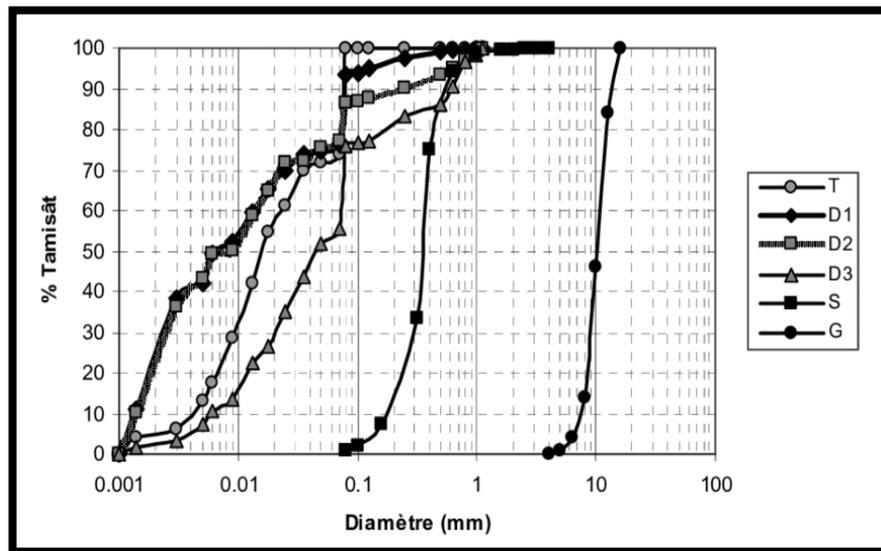


Figure II.4. La courbe granulométrique.

Les dimensions des tamis correspondant à d_{10} , d_{30} et d_{60} sont interpolées graphiquement sur la courbe. A partir de ces résultats on peut calculer le facteur de courbure C_c et le facteur d'uniformité (coefficient de Hazen) C_u .

II.3.1.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

II.3.1.3. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

- ❖ Une série de tamis normalisés avec couvercle et fond pesés préalablement.
- ❖ Une balance.

- ❖ Un Tamiseur électrique.
- ❖ Un Etuve.



Figure II.5. Appareillage – essai granulométrique.

II.3.1.4. Mode opératoire

- 1- Préparer les tamis d'ouvertures nécessaire
- 2- Peser ces tamis vide
- 3- Dresser la colonne des tamis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. Le fond étanche et le couvercle sont disposés respectivement en bas en haut de la colonne.
- 4- Peser deux kilogrammes de sable.
- 5- Verser le sable en haut de colonne de tamis puis fermer le couvercle
- 6- Procéder manuellement puis automatiquement à l'agitation de la colonne pendant environ 5 min.
- 7- Peser les tamis avec les refus partiels en commençant par le tamis supérieur (la masse perdue lors du tamisage ne doit pas dépasser 1% de la masse de la prise).

II.3.2. Propriété « Equivalent de Sable »

Il permet de mesurer la propriété de la quantité d'éléments fins contenus dans le matériau sans aucune distinction de nature. L'équivalent de sable est le rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres, il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique, plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston selon la norme **NF-I8-598** qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

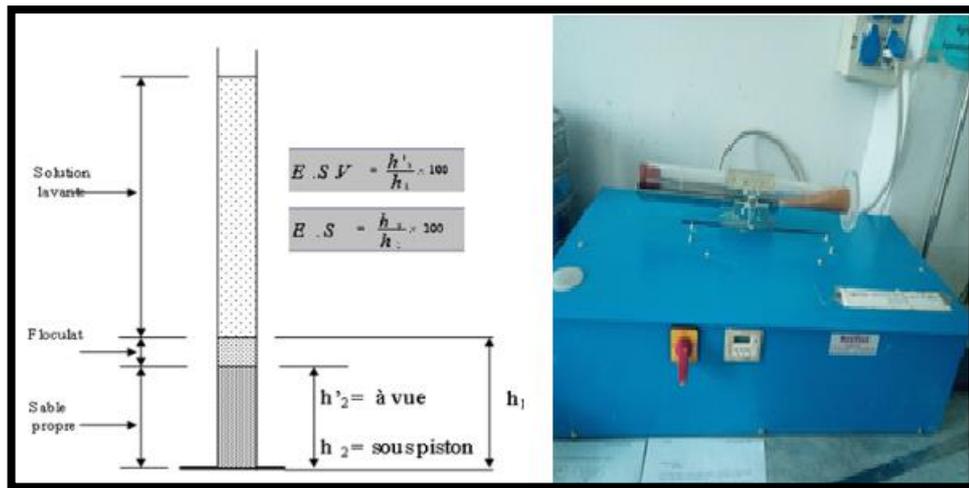


Figure II.6. Essais d'équivalent de sable.

II.3.2.1. Mode opératoire

- ✚ Remplir les éprouvettes avec la solution lavant, jusqu'au premier trait (trait inférieur).
- ✚ A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de 120 ± 1 g dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- ✚ On laisse la prise d'essai reposer 10 min.
- ✚ Après le repos, on bouche l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc, puis on la fixe horizontalement sur l'agitateur qui le fait remuer 90 cycles (Allers retours en 30 secondes).
- ✚ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution lavant au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- ✚ Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage. Après 20 min de dépôt, on mesure à l'aide d'une règle les hauteurs h_1 et h_2 .
- ✚ h_1 : la hauteur entre le niveau supérieur du floculat et le fond de l'éprouvette.
- ✚ h_2 : hauteur entre le niveau de la couche inférieure et le de l'éprouvette, Et on calcul ES_v .

$$ES_v = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

- ✚ On détend lentement le piston taré jusqu'à ce qu'il repose sur le sable sédiment, puis on le fixe grâce au manchon, et on retire, après ; on lit la hauteur h_2 au niveau supérieur du manchon, et on calcul ES_p .

$$ES_p = \frac{h'2}{h1} \times 100$$

Avec :

h₁: hauteur du sable plus flocculat.

h'₂: hauteur du sable.

II.3.3. Masse volumique apparente

On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide du récipient de capacité 1 litre pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente de sable pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

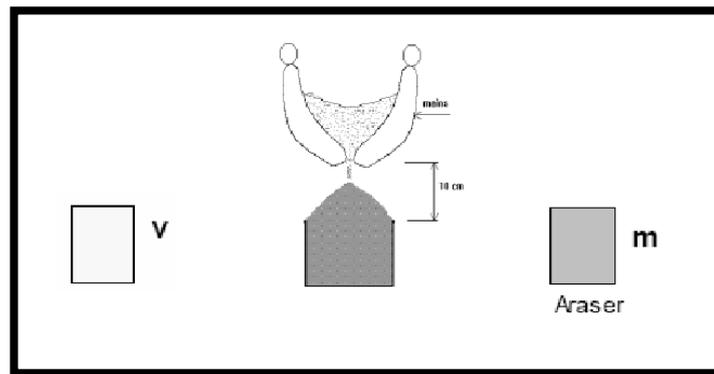


Figure II.7. La masse volumique apparente du sable.

La masse volumique apparente est donnée par : $\rho_{app} = \frac{M}{V}$

L'essai est répété 5 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

II.3.4. Masse volumique absolue

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide d'un éprouvette graduée de capacité 1000 ml. On prend trois (03) échantillons de masse 300 g. On place l'échantillon dans l'éprouvette de capacité 1000 ml et on y verse 300 ml d'eau préparé préalablement dans deuxième récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable- eau soit (V_2) ce volume. Sachant que le volume (V_1) d'eau ajouté est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

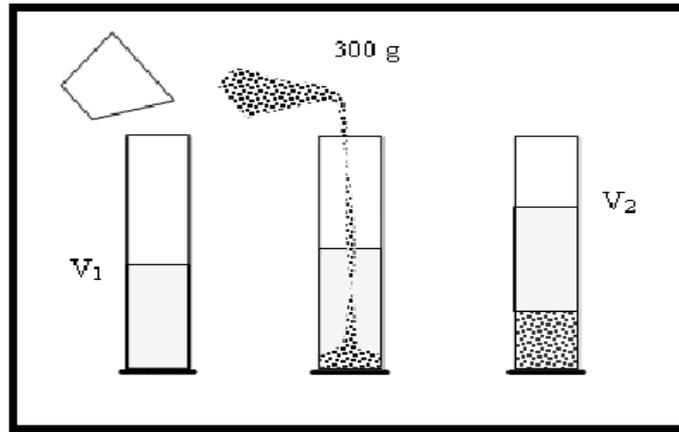


Figure II.8. La masse volumique absolue de sable.

La masse volumique apparente du sable est donnée par : $\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$

II.3.5. Essai de Teneur en Eau, NF P 94-050

II.3.5.1. Principe de la détermination de la teneur en eau

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

II.3.5.2. Appareillage :

- ❖ Etuve réglable à 50°C et à 105°C ;
- ❖ Balance permettant les pesées avec une incertitude maximale de 1/1000 de la pesée ;
- ❖ Des capsules en métal ;



Figure II.9. Appareillage –Teneur en eau (NF P 94-050).

II.3.5.3. Mode opératoire

1. Prélever un échantillon de sable représentatif, sa masse est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient.
2. Placer le prélèvement sur une capsule.
3. Peser immédiatement, soit P_h .
4. Mettre à l'étuve à 105°C pour les matériaux insensibles à la chaleur et à 50°C pour les matériaux sensibles à la chaleur (les matériaux gypsifères, latéritiques ou s'ils contiennent des matières organiques), jusqu'à dessiccation complète et poids stable (la durée totale de séchage peut donc varier entre quelques heures et plusieurs jours).
5. Peser l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve, ou après refroidissement dans un dessiccateur, soit P_s .

II.3.5.4. Expression des résultats

$$\omega (\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

ω : teneur en eau (exprimée en %).

P_h : poids de sable humide en (g).

P_s : poids de sable sec en (g).

II.3.6. Essai Proctor Modifier, NF P 94-093

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés).

Le protocole de l'essai Proctor suit la norme **NF P 94-093** (détermination des références de compactage d'un matériau). Les valeurs obtenues par l'essai sont notées ω_{OPN} pour la teneur en eau optimale, et γ_{OPN} pour la masse volumique sèche optimale.

Une autre référence peut être déterminée pour une énergie supérieure (notamment pour des couches de chaussées granulaires), il s'agit de l'optimum Proctor modifié (OPM).

II.3.6.1. Définition de compactage

Le sol est utilisé comme matériau pour la construction d'ouvrage en terre (corps de remblai, des couches de formes et d'assise de chaussées). Il est bien connu, la résistance d'un sol est d'autant plus forte et sa déformabilité est d'autant plus faible que les grains de ce sol sont serrés et rapprochés. Pour détenir un remblai de bonne qualité (résistant et peu déformable) on a recours au compactage du sol. On appelle compactage, l'opération qui consiste à accroître la densité en place du sol par des moyens mécaniques appropriés. On dit que l'opération de compactage augmente la compacité du sol, resserre la texture des grains, réduit la déformabilité et augmente la résistance du sol. L'expérience montre que pour un sol donné, la compacité obtenue lors d'une opération de compactage varie avec la teneur en eau de compactage et avec l'intensité ou l'énergie de compactage.

II.3.6.2. L'objectif de l'essai

Le compactage d'un sol vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols, Il est fonction de quatre principales variables :

- ✚ La masse volumique du sol sec.
- ✚ La teneur en eau. L'énergie de compactage.
- ✚ Le type de sol (étalement granulométrique, présence de minéraux argileux, etc.).

II.3.6.3. But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

II.3.6.4. Principe de la méthode

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage l'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau.

On définit ainsi plusieurs points d'une courbe (γ_d ; ω), on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.

II.3.6.5. Appareillage nécessaire

- ✚ Compacteur électrique.
- ✚ Dame Proctor modifié.
- ✚ Règle à araser.
- ✚ Disque d'espacement.
- ✚ Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau.
- ✚ Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon).
- ✚ Truelle, spatule, pinceau, etc...
- ✚ Eprouvette graduée.
- ✚ Tare (mesures des teneurs en eau).
- ✚ Balance portée 20 kg, précision ± 5 g.
- ✚ Balance de précision 200 g, précision $\pm 0,1$ g.
- ✚ Etuve $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.
- ✚ Burette à huile.



Figure II.10. Essai de compactage des éprouvettes.

II.4. Essai de résistance à la compression, NF EN 12390-3

II.4.1. Principe

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

II.4.2. Appareillage

Machine d'essai de compression, conforme à l'EN 12390-4.

II.4.3. Eprouvettes

II.4.3.1. Prescriptions

L'éprouvette doit être un cube, un cylindre ou une carotte conforme aux EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 et EN 12504-1. Si les dimensions de l'éprouvette ne sont pas conformes aux tolérances spécifiées dans l'EN 12390-1.

NOTE II : ne convient pas de soumettre à l'essai des éprouvettes endommagées ou qui présentent des nids de cailloux importants.

II.4.4. Mode opératoire

II.4.4.1. Préparation et positionnement des éprouvettes

Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai. Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.

Enlever tout appareillage, autre que les plateaux auxiliaires ou éléments d'espacement, (**voir l'EN 12390-4**), entre l'éprouvette et les plateaux de la machine d'essai.

Positionner les éprouvettes cubiques de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.

Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de ± 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou du diamètre pour les éprouvettes cylindriques.

Si des plateaux auxiliaires sont utilisés, les aligner avec la face supérieure et la face inférieure de l'éprouvette.

Avec des machines d'essai à deux colonnes, il convient de placer la surface moulée des éprouvettes cubiques en face de l'un des montants.

II.4.4.2. Mise en charge

Sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage 0,2 MPa/s (N/mm².s) à 1,0 MPa/s (N/mm².s).

Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante sélectionnée $\pm 10 \%$ jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

En cas d'utilisation de machine d'essai commandée manuellement, compenser, lorsque la rupture d'éprouvette est proche, toute tendance au ralentissement de la vitesse sélectionnée de charge, par un réglage approprié des commandes.

La charge maximale obtenue doit être enregistrée.

II.4.4.3. Evaluation des types de rupture

Des exemples de rupture d'éprouvettes montrant des essais s'étant déroulés correctement sont donnés dans la Figure 11 pour les cylindres.

Des exemples de rupture incorrecte d'éprouvettes sont donnés dans la Figure 12 pour les cylindres.

Toute rupture incorrecte doit être enregistrée en faisant référence à la forme de rupture donnée par les Figures 12 et correspondant au mieux à l'observation.

NOTE : Les ruptures incorrectes sont généralement dues à :

- une attention insuffisante portée au mode opératoire, en particulier le positionnement de l'éprouvette ;
- une erreur due à la machine.

Pour les éprouvettes cylindriques, la rupture du produit de surfaçage des extrémités avant celle du béton est une rupture incorrecte.

II.4.5. Expression des résultats

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

f_c : est la résistance en compression, exprimée en mégapascals (Newtons par millimètres carrés);

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons.

A_c : est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette (**voir l'EN 12390-1**), exprimée en millimètres carrés.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm²) près.

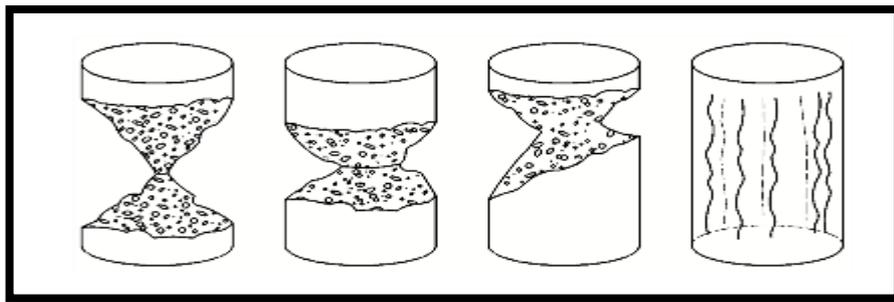


Figure II.11. Ruptures correctes d'éprouvettes cylindriques

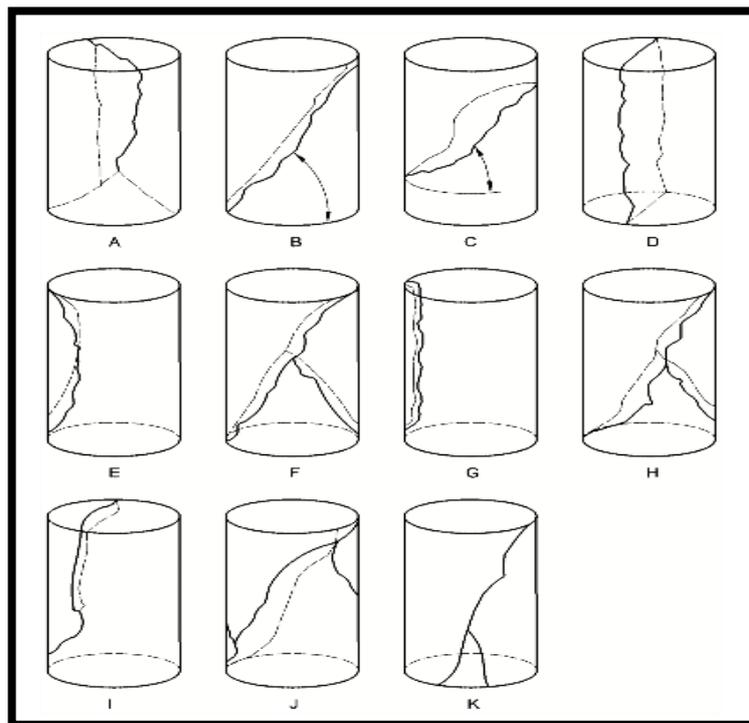


Figure II.12. Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cylindriques.



Figure II.13. Essai d'écrasement (Résistance à la compression).

II.5. Essai de traction par fendage, NF EN 12390-6

II.5.1. Principe

Une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction.

II.5.2. Appareillage

II.5.2.1. Machine d'essais, Conforme à l'EN 12390-4

NOTE : Les plateaux plans classiques peuvent être remplacés par des pièces d'appui hémicylindriques lorsque les essais sont réalisés sur des éprouvettes cubiques ou prismatiques.

II.5.2.2. Gabarit de centrage (facultatif)

Il permet de positionner l'éprouvette et les bandes de chargement. Il ne doit pas s'opposer à la déformation de l'éprouvette au cours de l'essai.

NOTE : La figure II.14 présente un gabarit de centrage adapté aux éprouvettes cylindriques.

II.5.2.3. Bandes de chargement

Bandes de chargement Elles doivent être conformes à l'**EN 316**, en matériau dur, d'une masse volumique supérieure à 900 kg/m^3 , d'une largeur (a) de $(10 \pm 1) \text{ mm}$, d'une épaisseur (t) de $(4 \pm 1) \text{ mm}$, et d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette. Les bandes de chargement ne doivent être utilisées que pour un seul essai.

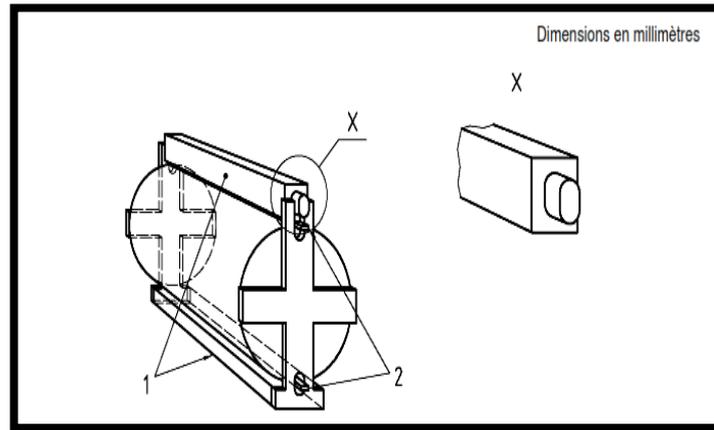


Figure II. 14. Gabarit de centrage pour essais sur éprouvettes cylindriques.

Légende :

1. Pièce d'appui en acier
2. Bande de chargement

II.5.3. Mode opératoire

II.5.3.1. Préparation de l'éprouvette

Si l'éprouvette a été conservée dans l'eau, l'essuyer avant de la placer sur la machine d'essais pour éliminer l'humidité en excès. Essuyer les surfaces d'appui du gabarit de centrage, des bandes de chargement, des pièces d'appui et des plateaux. Nettoyer la surface de l'éprouvette qui sera en contact avec les bandes de chargement et en éliminer toute particule ou corps étranger.

II.5.3.2. Positionnement de l'éprouvette

Centrer l'éprouvette dans la machine, éventuellement au moyen d'un gabarit de centrage. Positionner soigneusement les bandes de chargement et les pièces d'appui, le cas échéant, le long des parties supérieure et inférieure du plan de chargement de l'éprouvette. S'assurer que le plateau supérieur est parallèle au plateau inférieur au cours de la mise en charge.

II.5.3.4. Mise en charge

Vérifier que l'éprouvette demeure centrée au début de la mise en charge soit par un gabarit de centrage soit par des supports temporaires. Sélectionner une vitesse de chargement constante dans la plage de 0,04 MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \times \text{s}$) à 0,06 MPa/s ($\text{N}/\text{mm}^2 \times \text{s}$).

Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue, à la vitesse constante sélectionnée 1 %, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

NOTE : La vitesse d'accroissement de la force requise est donnée par la formule suivante :

$$R = \frac{S \times \pi}{2 \times L \times d}$$

Où :

R : est la vitesse d'accroissement de la force, en newtons par seconde ;

L : est la longueur de l'éprouvette, en millimètres (Voir la figure II.14) ;

d : est le diamètre nominal de l'éprouvette, en millimètres ;

S : est la vitesse d'accroissement de la contrainte, en méga pascals par seconde ou en newtons par millimètre carré par seconde.

En cas d'utilisation d'une machine d'essais à commandes manuelles, corriger, par un réglage approprié, toute tendance à la diminution de la vitesse de chargement sélectionnée, qui se manifeste à l'approche de la rupture de l'éprouvette.

En cas d'utilisation d'une machine d'essais à commandes automatiques, vérifier régulièrement que la vitesse de chargement est constante.

Noter la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

II.5.3.5. Examen de l'éprouvette

Examiner l'éprouvette rompue et l'aspect du béton dans la surface de rupture, et noter toute anomalie.

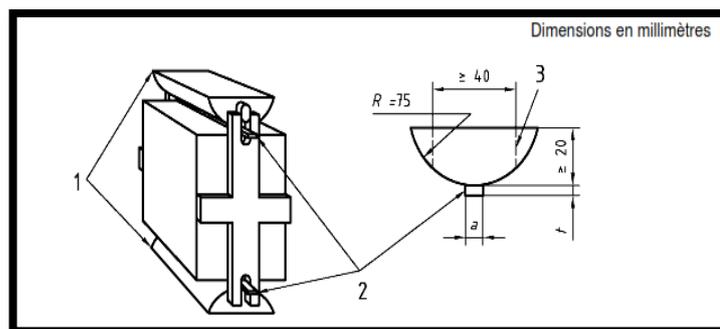


Figure. II. 15. Positionnement des éprouvettes.

Légende :

1. Pièce intercalaire en acier
2. Bandes de chargement
3. Pièce hémicylindrique ajustable

II.5.3.6. Expression des résultats

La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

f_{ct} : est la résistance en traction par fendage, en mégapascals ou en newtons par millimètre carré ;

F : est la charge maximale, en newtons ;

L : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en millimètres ;

d : est le diamètre nominal de l'éprouvette, en millimètres ;

NOTE : En cas d'écart sur les dimensions de l'éprouvette par rapport à la méthode normalisée, le calcul de la résistance en traction par fendage peut être fondé sur les dimensions réelles de l'éprouvette.

Exprimer la résistance en traction par fendage à 0,05 MPa (N/mm²) près.

II.6. Absorption d'eau, ASTM C 642

Les éprouvettes ont été immergées dans de l'eau à une température de 25 °C pendant vingt-quatre (24) heures. Par la suite, les échantillons ont été égouttés avec une serviette pendant dix (10) minutes pour éliminer l'absorption / absorption d'eau a été déterminée à l'aide de l'équation

suivant :

$$\frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100$$

W_1 : Poids de l'échantillon avant immersion dans l'eau.

W_2 : poids de l'échantillon après immersion dans l'eau.

Trois échantillons ont été testés pour chaque mélange de béton afin d'obtenir une valeur moyenne fiable.

II.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'identification des matériaux désirés pour cette étude qui sont : sable dune oued souf, sable dune Boussaâda, sable concassé. Il contient tous les essais effectués au niveau de laboratoire de l'université de Bordj Bou Arreridj.

Chapitre III:

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à présenter l'ensemble des résultats des essais effectués sur les différents échantillons du sable utilisé pour la fabrication du béton de sable compacté. Les essais sont agencés comme suit : Essais d'identification (Teneur en eau, Analyse granulométrique, Masse volumique, Equivalent de sable) et essais mécaniques (Proctor modifier, Résistance à la compression, Résistance en traction). Ces résultats sont représentés sous forme de tableaux et de courbures.

III.2. Teneur en Eau, NF P 94-050

$$\omega (\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Tableau III.1. Teneur en eau.

Sable dune -B	Sable dune -O	Sable concassée
2.10%	1.03%	1.05%

III.3. Masse volumique apparente et absolue :

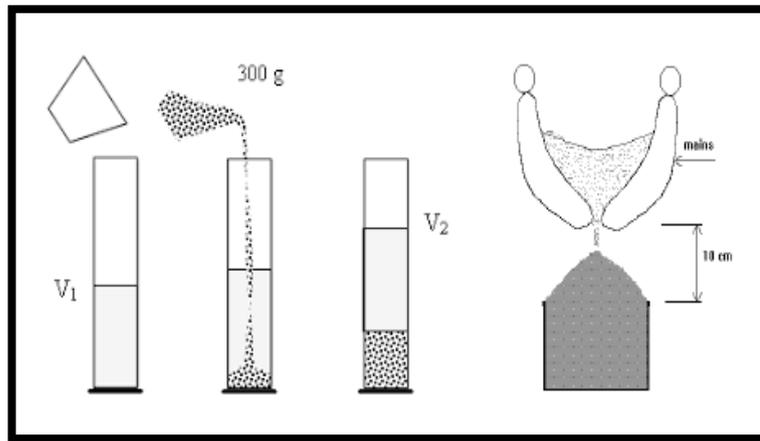


Figure III.1. Masse volumique apparente et absolue.

Tableau III.2. Masse volumique apparente des trois sables.

Type de sable	Sable dune -B	Sable dune -O	Sable concassée
Masse volumique apparente	1.64	1.50	1.56
Masse volumique absolue	2.60	2.60	2.60

III.4. Analyse Granulométrique, NF P 94-056

Tableau III.3. Analyse granulométrique du sable dune-Oued Souf.

Tamis (mm)	Refus Partielle R_p (g)	Refus cumulés R_c (g)	Refus cumulés R_c (%)	Tamisat (%)
5	34	34	1,7	98,3
2,5	59	93	4,7	95,4
1,25	226	319	16,0	84,1
0,63	467	786	39,3	60,7
0,315	882	1668	83,4	16,6
0,16	312	1980	99,0	1,0
0,08	14	1994	99,7	0,3
Fond	6	2000	100,0	0,0

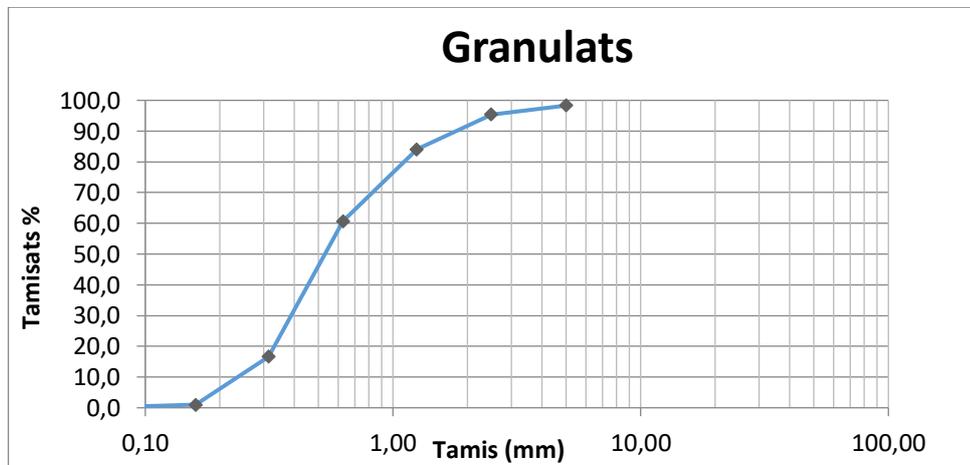


Figure III.2 : La courbe granulométrique du sable dune- Oued Souf

Tableau III.4. Analyse granulométrique du sable dune-Boussaâda.

Tamis (mm)	Refus Partielle R_p (g)	Refus cumulés R_c (g)	Refus cumulés R_c (%)	Tamisat (%)
5	237	237	11,9	88,2
2,5	91	328	16,4	83,6
1,25	50	378	18,9	81,1
0,63	79	457	22,9	77,2
0,315	392	849	42,5	57,6
0,16	884	1733	86,7	13,4
0,08	235	1968	98,4	1,6
Fond	32	2000	100,0	0,0

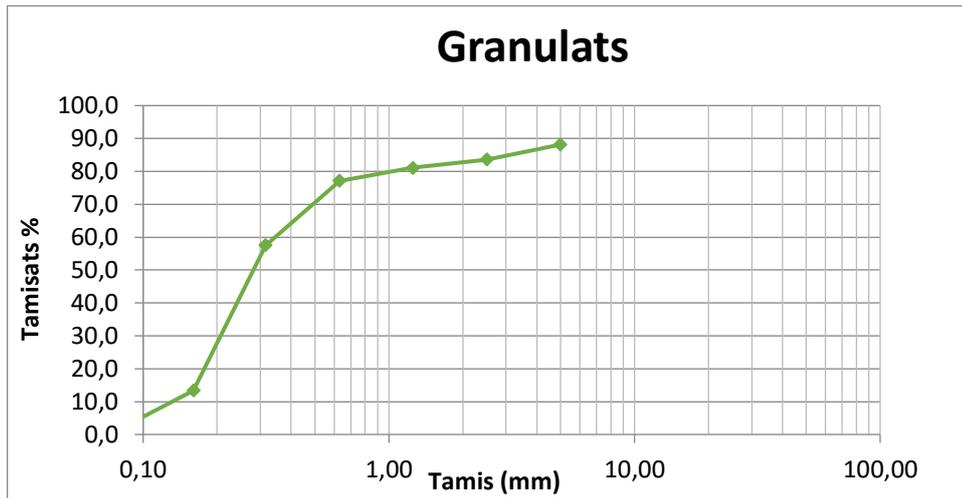


Figure III.3. La courbe granulométrique du sable dune- Boussaâda.

Tableau III.5. Analyse granulométrique du sable concassée.

Tamis (mm)	Refus Partielle R_p (g)	Refus cumulés R_c (g)	Refus cumulés R_c (%)	Tamisat (%)
5	6	6	0,3	99,7
2,5	242	248	12,4	87,6
1,25	620	868	43,4	56,6
0,63	401	1269	63,5	36,6
0,315	285	1554	77,7	22,3
0,16	187	1741	87,1	13,0
0,08	122	1863	93,2	6,8
Fond	137	2000	100,0	0,0

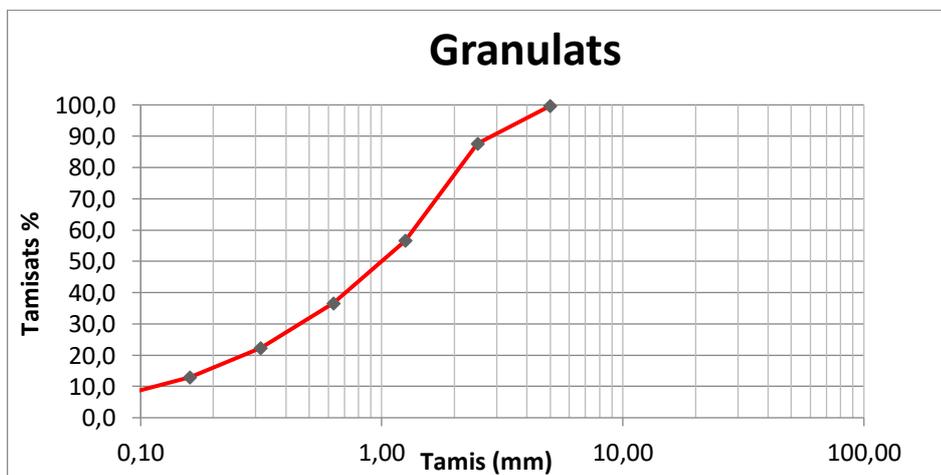


Figure III.4. La courbe granulométrique du sable concassé.

III.5. Equivalent de sable



Figure III.5. Equivalent de sable.

Tableau III.6. Equivalent de sable

Types de sable	SD-O	SD-B	SC
ES _v (%)	91	38	63
ES _p (%)	88	34	64

III.6. Essais Proctor Modifier, NF P 94-093

La compactibilité d'un matériau est définie par son aptitude au compactage, celui-ci peut être considéré comme un effet statique ou dynamique qui s'exerce sur le matériau pour réduire son volume des vides en réarrangement les éléments. Le tableau suivant résumé les tous les mélanges préparés et les teneurs en eau qui le correspondent résultats obtenus au niveau de laboratoire.



Figure III.6. Préparation et réalisation de l'essai Proctor modifier.

III.7. Composition du mélange

Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement au béton de sable compacté :
Notre programme expérimental a permis de comprendre le rôle joué par les différents paramètres séparément (SD- Oued Souf, SD-Boussaâda, Sable concassé) sur les propriétés de et les performances du béton.

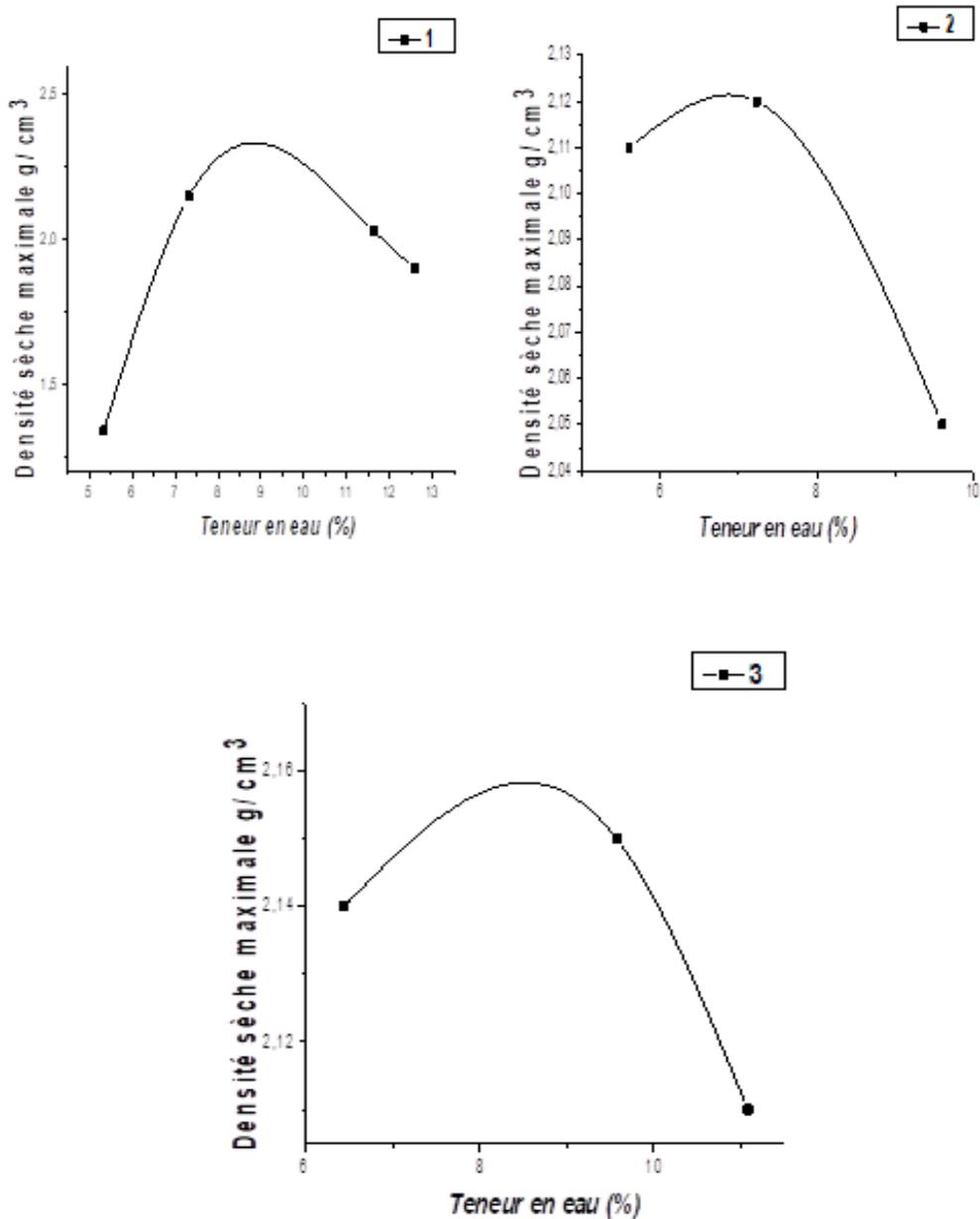


Figure III.7. Variation de la masse volumique de béton de sable compacté en fonction de teneur en eau.

Le résultat obtenu de l'essai Proctor de trois l'échantillon du sable utilisé, sont différent soit pour La teneur en eau nécessaire pour le compactage soit pour la densité sèche maximal. On remarque que le premier mélange est de la plus grande densité sèche entre les trois mélanges autant que le troisième mélange donne une teneur en eau assemblable de ce dernier avec une densité sèche plus faible

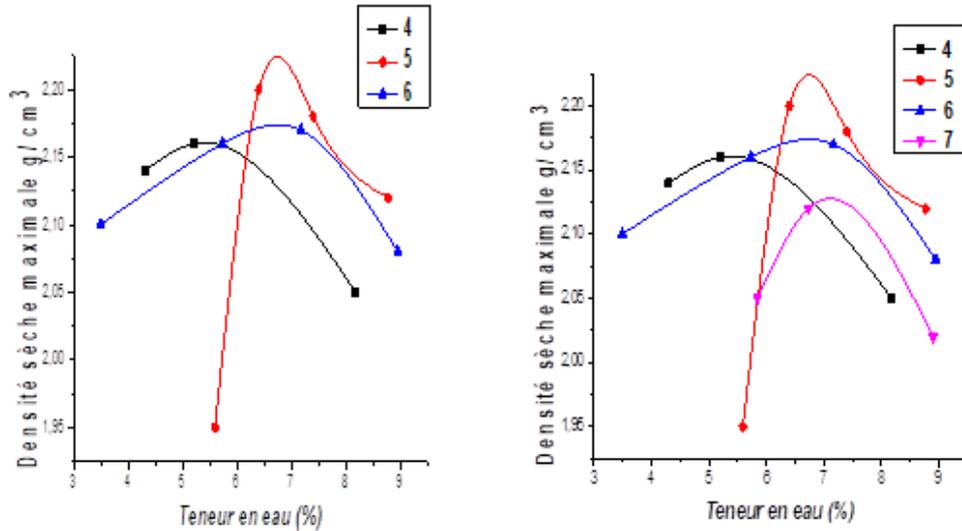


Figure III.8. Variation de la masse volumique du béton de sable compacté en fonction de teneur en eau.

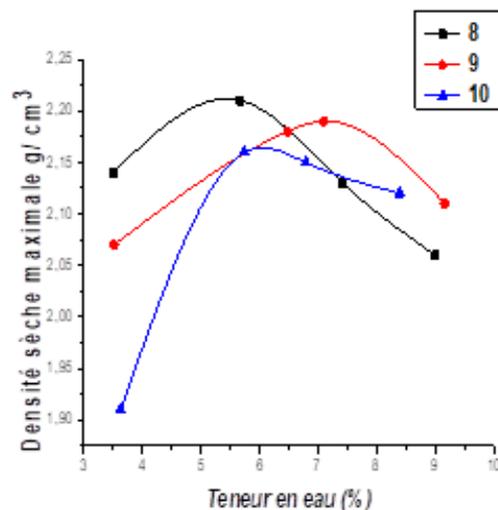


Figure III.9 : Variation de la masse volumique du béton de sable compacté en fonction de teneur en eau.

La densité spécifique sèche de Proctor modifier et la teneur en eau est influer par le type du sable utilisé et le pourcentage de ce dernier ; A partir des résultats présentés dans les graphes ci-dessus il est clair que la densité spécifique sèche des différents mélanges du béton de sable compacté augmente lorsque diminue la quantité des fines .

La réduction de la teneur en eau initial prouve le réarrangement inter granulaire radical des granulats.

III.8. Essai de la résistance à la compression

On a utilisé les moules cylindriques de **PROCTOR** pour faire les éprouvettes du béton de sable compacté, avec D= 15.5 cm, H= 11.5 cm.

Tableau III.7. Résistance à la compression à 7 jours.

Eprouvette	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Rc_{7j} (MPa)	10.31	14.60	13.65	8.84	17.22	12.35	15.65	17.16	14.22	11.30

Tableau III.8. Résistance à la compression à 14 jours.

Eprouvette	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Rc_{14j} (MPa)	14.29	16.33	13.66	14.50	19.60	18.99	17.55	18.29	18.56	13.66

Tableau III.9. Résistance à la compression à 28 jours.

Eprouvette	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Rc_{28j} (MPa)	19.20	25.12	16.36	15.65	21.33	26.33	24.12	21.60	22.30	19.15

✚ Etat des eprouvette après écrasement



Figure III.10 : Epreuve après essai de compression.

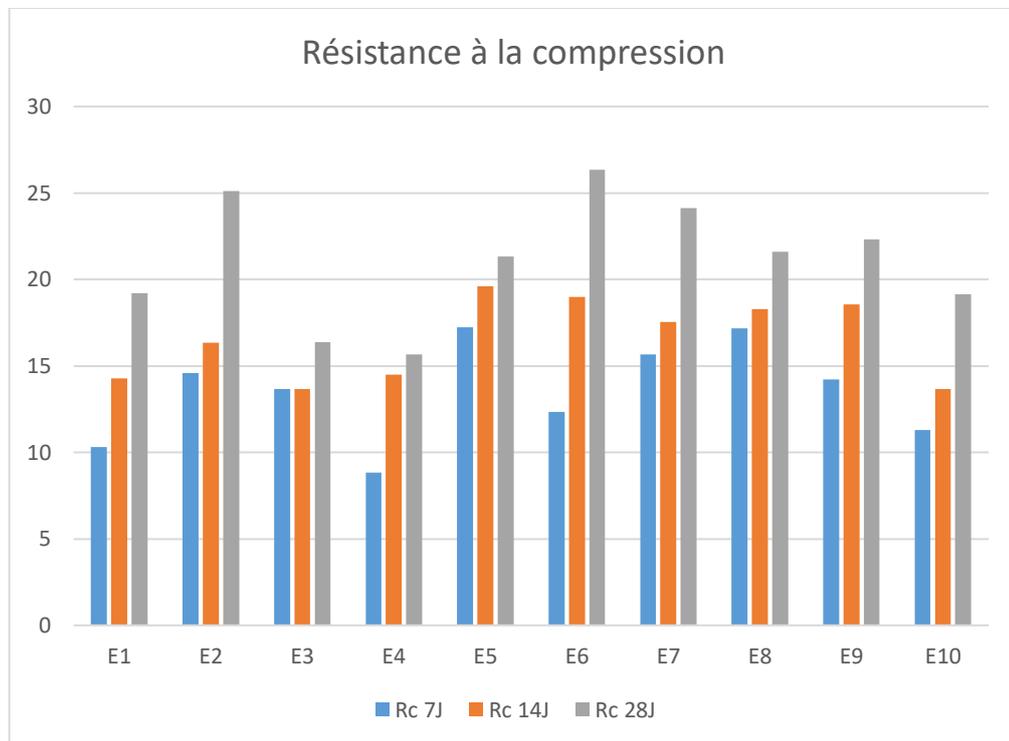


Figure III.11 : Variation de la résistance à la compression.

La résistance mécanique du béton préparé après durcissement dépend de l'activité du ciment, du rapport eau/ciment (E/C) et de la qualité et quantité du sable utilisé. Les résultats de la résistance à la compression à l'âge de 7, 14 et 28 jours les éprouvettes sont encourageant pour un béton qui contient juste des fines.

III.9. Essai de résistance en traction par fendage d'éprouvettes

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique ou cubique à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la traction par fendage.



Figure III.12 : Ecrasement d'éprouvette.

Tableau III.12. Résistance en traction par fendage à 28 jours

Eprouvette	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
R_{t28j} (MPa)	1.55	1.86	1.68	1.45	2.03	1.65	1.88	1.63	1.65	0.85

Le béton de sable compacté présente une bonne résistance à la traction au 28 jours, les valeurs de cette dernière sont entre 1.45 et 2.03 MPa.

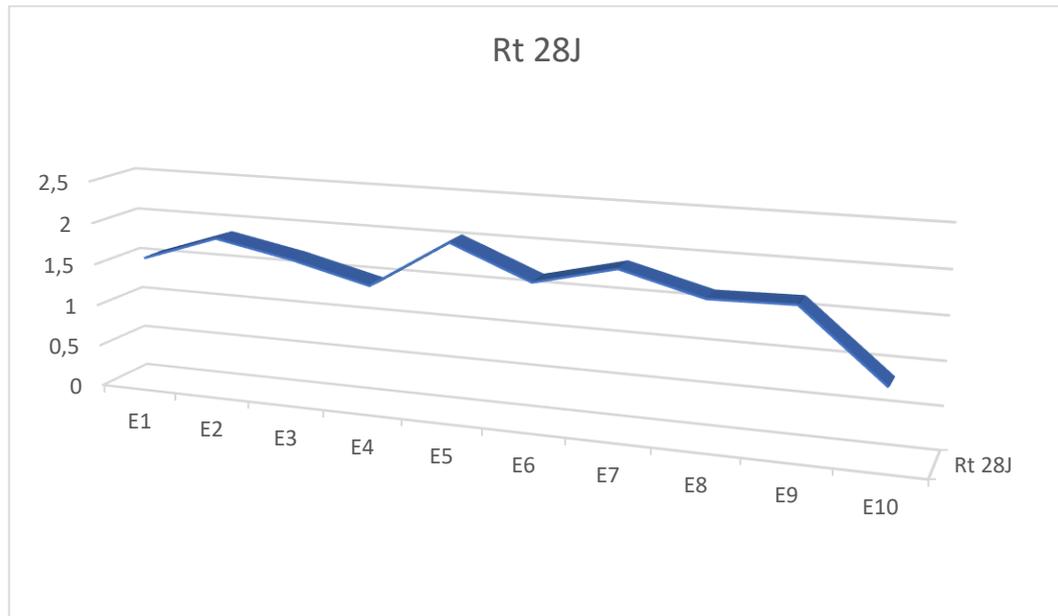


Figure III.13 : Variation de la résistance à la traction.

III.10. Essai d’Absorption d’eau du béton de sable compacté

Tableau III.11. Absorption d’eau du béton de sable compacté.

Mélange	E1	E2	E3	E4	E5	E6	7	E8	E9	E10
Poids sec	4508	4673	4771	4456	4641	4746	4799	4665	4529	4600
Poids humide	4683	4785	4883	4762	4807	4935	4958	4919	4808	4827
Abs (%)	3.73	2.34	2.29	6.24	3.45	3.82	3.20	5.16	5.80	4.70

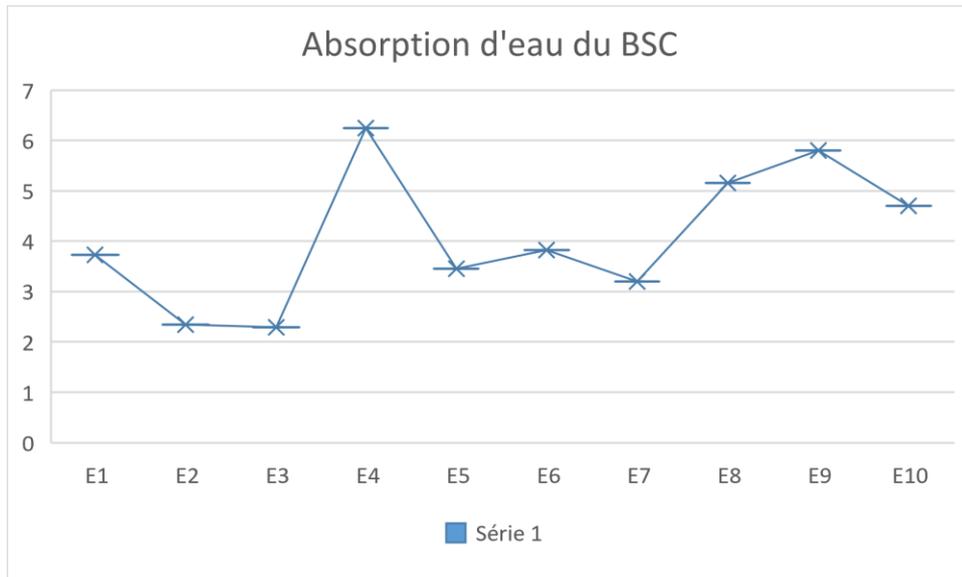


Figure III.14 : L'absorption d'eau des différentes éprouvettes du béton de sable compacté.

La capacité d'absorption d'eau d'un béton donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du béton durci. Plus le béton est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche.

A partir des résultats présentés dans la figure III.14 (faible absorption d'eau pour la majorité des éprouvettes réalisées) on peut valider que le béton est bien compacté.

III.11. Densité du béton de sable compacté

Tableau III.12. Densité du béton de sable compacté.

Mélange	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
Masse (g)	4571	4666	4796	4549	4827.3	4672.6	4733.3	4716	4633	4451
Volume(cm ³)	2169.9									
Densité	2.10	2.15	2.2	2.09	2.22	2.15	2.18	2.17	2.13	2.05

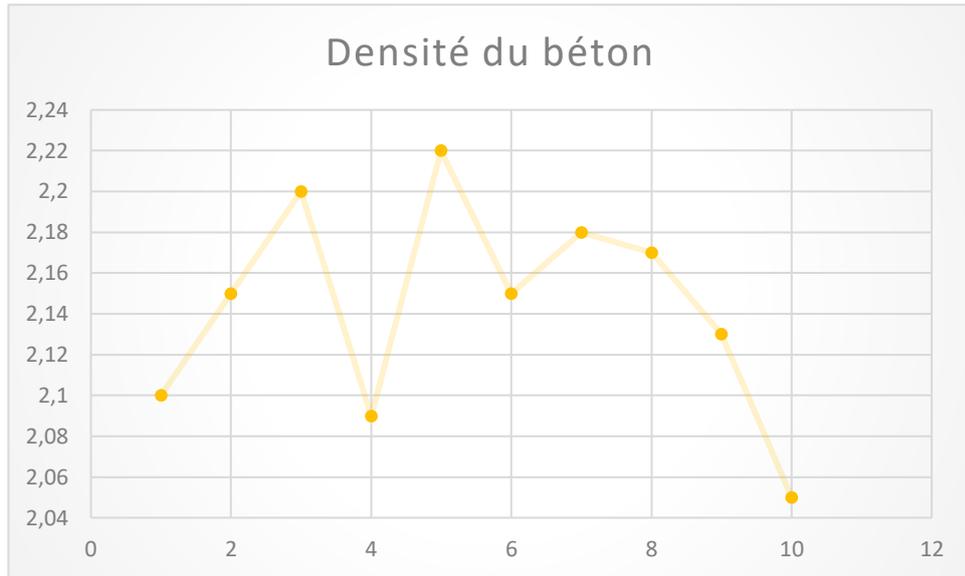


Figure III.15 : La densité du béton des différents éprouvettes du béton de sable compacté.

En analysant les résultats représentés sur la figure III.15, on constate généralement une baisse de la densité du béton de sable compacté cela peut être dû principalement à cause du faible rapport E/C utilisé.

III.12. Conclusion :

Les résultats obtenus montrent que L'introduction du différent sable conduit à une amélioration considérable des résistances mécaniques (résistance à la compression) à moyen et long terme.

Le béton de sable compacté a présente une bonne résistance à la traction et à la compression à l'âge de 28 jour.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est présenté en deux parties : une partie consacrée à une recherche bibliographique et une deuxième consacrée à l'étude expérimentale. L'étude bibliographique a montré que les bétons de sable pourraient remplacer les bétons ordinaires dans certains domaines de construction, en raison de l'élévation du coût des matériaux traditionnels et la raréfaction des gros granulats d'une part, et la facilité d'utilisation du béton de sable, ainsi que la tendance à l'exploitation des matériaux locaux, d'autre part.

La caractérisation des matériaux utilisés nous permet de tirer les principaux résultats initiaux du sable dune utilisée pour la formulation de béton de sable compacté :

- La teneur en eau 2.06% ;
- La masse volumique absolue 2.62 g/cm^3 ;
- La masse volumique apparente 2.6 g/cm^3 ;
- L'équivalent de sable Esp % moy = 87.8 ;
- Module de fines MF= 1.13.

Cette étude a évalué l'utilisation potentielle du sable dune dans la conception du mélange de béton de sable compacté. Plusieurs essais (résistance à la compression, résistance à la traction et l'absorption d'eau) ont été effectués sur le mélange de béton de sable compacté.

Les résultats trouvés ont montré que, globalement, l'introduction des divers types de sable dans le mélange du BSC joue un rôle bénéfique en améliorant les résistances mécaniques à moyen et long terme.

Perspectives

- Réalisation de l'essai : résistance à la Fatigue et le retrait ;
- Étude de la durabilité du béton fabriqué ;

Références Bibliographiques

Références

- [1] Sablocrete. Béton de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1994.
- [2]. K. Cisse¹, M. Laquerbe¹, A. Gaye, M. Diene « Characterisation of compacted road sandcrettes: Study applied to Senegal » Materials and Structures/ Vol. 32, March 1999, pp 151-157
- [3] SAID Aissa - BOUGUERRA Walid « Etude du comportement d'un béton compacté au Rouleau(BCR) à base des granulats recyclés ». Mémoire de Master - Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2018
- [4] BOUGUERRA Rafik - KASRI Mounir « Performance d'un béton compacté au rouleau(BCR) dans un climat chaud ». Mémoire de Master - Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2017
- [5] OUANANI Hicham « Caractérisation d'un béton routier À base Des matériaux locaux ». Mémoire de Master - Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2016
- [6] GAGNE, Richard « Méthode de formulation et d'optimisation des mélanges de BCR ». CRIB 2004.
- [7] GAGNE, Richard « Les bétons compactés au rouleau- principes, application et Nouveau développement BCR », CRIB 2004.
- [8].Mustapha ZDIRI, Mongi BEN OUEZDOU, Jamel NEJI & Mohamed Ridha EL OUNI « Formulation et simulation des bétons compactes au Rouleau: application aux matériaux de gisements locaux » Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005
- [9] ASSOCIATION CANADIENNE DU CIMENT: Conception et réalisation des revêtements en BCR 2001.
- [10] Planetoscope, Statistiques mondiales en temps réel, www.planetoscope.com

[11]M. Martin-Morales, M.Zamorano, A. Ruiz_MoyanoI. Valverde-Espinosa, «Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, Constr. Build. Mater., 25 (2) (2011) 742-748

[11] Benamrane Toufik Amine, « caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et essai direct (ED)d'un béton recyclé adjuvanté à base des matériaux locaux », mémoire master, Juin 2015.

[12] GEORGE DREUX, JEAN FESTA, «Nouveau guide du béton et de ses constituants», Edition eyrolles 1998, pp, 8 :20.Association technique de l'industrie des liants hydrauliques,Eyrolles Paris, pp. 20-149.

[13] Douara T.H., Benhouna M., Nezergui B., » Caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels », Actes du 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries ENSET Oran, 2009.

[14]Saloua EL EUCH KHAY, Jamel NEJI et Amara LOULIZI « Proposition d'un nouveau matériau pour les chaussées: le béton de sable compact »Conférence: Journées Scientifiques Franco-Maghrébines : Novembre 2014

[15] Gauthier P. et Marchand J., (2004), « Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec », Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.

[16] Site web de Ciment de Québec, <http://www.BCR.CC.html>

[17] <http://www.barrages-cfbr.eu/Beni-Haroun.html>.