

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et Hydraulique
Référence :...../ 2024



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع...../2024

Mémoire de Master

2ème année

Option : Matériaux en Génie civil

THEME

**Caractérisation physico-mécanique du
béton de sable avec des déchets
industriels (plastique et caoutchouc)**

Etudiant

Krarcha Abdelhak

Encadrant

Dr Gadri Karima

Promotion: 2024

DEDICACE

Grâce à Dieu Tout-Puissant, et ensuite grâce à mon modèle dans cette vie, au propriétaire de la biographie parfumée et à l'esprit éclairé, qui a joué un rôle primordial dans mes études supérieures, je tiens à exprimer ma profonde gratitude.

À *mon père* bien-aimé, que Dieu prolonge sa vie, qui m'a guidé sur le chemin de la vie et a veillé sur moi jusqu'à ce que je grandisse. À *ma chère mère*, que Dieu prolonge sa vie, je leur dédie ce travail avec amour et respect.

Je dédie également ce travail à ma généreuse famille et à mon *cher frère*, que Dieu les protège et les garde.

Enfin, j'étends ma dédicace à tous mes amis et collègues qui m'ont été d'un grand soutien.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu Tout-Puissant, qui m'a donné la force, la volonté et la patience pour mener à bien ce travail. Je remercie sincèrement ma chère famille pour son soutien constant et sa patience.

Je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à mon encadrante, **Dr. Karima Gadri**, pour la confiance qu'elle m'a accordée, son soutien continu, ainsi que ses précieux conseils tout au long de ce travail. Je n'oublie pas tous les enseignants du Département de Génie Civil et Hydraulique, notamment le chef du département, **M. Issam Abdelssalam**, pour toutes les connaissances acquises au cours de mes études.

Mes remerciements vont également à **M. Abdel Mounime**, ingénieur du laboratoire des matériaux de construction du département de génie civil, pour son aide précieuse qui a permis la réalisation de mon projet de mémoire pratique dans les meilleures conditions.

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail, ainsi qu'à tous mes amis et collègues. Une mention spéciale à mon collègue et ami **Taleb Babouche Mourad**, de qui j'ai beaucoup appris.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont participé, de quelque manière que ce soit, à la réalisation de ce mémoire.

Resumé

Ce projet vise à développer un béton de sable plus léger en utilisant du filler calcaire comme matériau de base. Deux séries de bétons ont été élaborées : dans la première série, le filler calcaire a été intégré au béton de sable à différents pourcentages (10 %, 12,5 %, 15 %) pour améliorer la compacité, réduire les vides et augmenter la résistance. La formule optimale, désignée BSF1, a été déterminée comme référence. Pour la deuxième série, trois pourcentages différents de poudre plastique et/ou de poudre de caoutchouc (25 %, 50 %, 75 %) ont été introduits dans le béton de référence en remplacement du filler calcaire.

Après des essais de caractérisation physique à l'état frais et mécanique à l'état durci, il a été observé que le pourcentage de 25 % de poudre plastique a permis d'obtenir des résultats favorables, contribuant à la diminution de la masse volumique, à un faible taux d'absorption d'eau et à une bonne qualité globale du béton de sable.

Mots clés : béton de sable ; compacité, filler calcaire ; poudre de plastic ; caoutchouc.

هذا المشروع يهدف إلى تطوير خرسانة رملية أخف باستخدام مادة الحشو الجيري كمادة أساسية. تم تصميم سلسلتان من الخرسانات: في السلسلة الأولى، تم دمج الحشو الجيري في الخرسانة الرملية بنسب مختلفة (10%، 12.5%، 15%) لتحسين الكثافة، وتقليل الفراغات، وزيادة المقاومة. تم تحديد التركيبة الأمثل، التي تم تسميتها BSF1، كمرجع. في السلسلة الثانية، تم إدخال ثلاث نسب مختلفة من مسحوق البلاستيك و/أو مسحوق المطاط (25%، 50%، 75%) في الخرسانة المرجعية بدلاً من الحشو الجيري.

بعد إجراء اختبارات التوصيف الفيزيائي عند الحالة الطازجة واختبارات الميكانيكا عند الحالة المتصلبة، لوحظ أن نسبة 25% من مسحوق البلاستيك ساهمت في الحصول على نتائج إيجابية، من خلال تقليل الكثافة الظاهرية، وتقليل معدل امتصاص الماء، وتحسين الجودة العامة للخرسانة الرملية.

كلمات مفتاحية: خرسانة الرمل - الكثافة - الحشو الجيري - مسحوق البلاستيك - المطاط

SOMMAIRE

| | |
|------------------------------------------------------------|-----|
| Remerciements | I |
| Dédicaces | II |
| Résumé (ملخص) | III |
| Liste des Figures | V |
| Liste des Tableau | VI |
| Introduction Générale | 1 |
| Chapitre I: Revue Bibliographique | |
| Partie I:Généralité sur les bétons de sable | |
| I.1.Introduction | 3 |
| I.2.Définition | 3 |
| I.3.Historique | 4 |
| I.4.compositions du sable | 5 |
| I.4.1.Le sable | 5 |
| I.4.1.a. Classification des sables selon leurs provenances | 6 |
| I.4.2.Le ciment | 6 |
| I.4.2.b. Les constituantes des ciments courantes | 6 |
| I.4.3.Les fines d'ajoutes (filler calcaire) | 7 |
| I.4.4.Fillier calcaire | 9 |
| I.4.5. L'eau | 10 |
| I.4.6.Les Adjuvants | 10 |
| I.5. Intérêts et limites des bétons | 10 |
| I.5.1.I Intérêts du béton de sable | 10 |
| I.5.2.Limites du béton de sable | 11 |
| I.5.2.a. Raisons économiques | 11 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.5.2.Retrait | 11 |
| I.6.Domains d’application | 12 |
| I.7.Formulation de béton de sable | 13 |
| I.7.1.Principe de formulation | 14 |
| I.7.2.Exemple théorique de formulation de béton de sable | 14 |
| I.7.3.Méthode expérimentale de formulation | 15 |
| I.7.3.a. Les différentes étapes de la formulation | 16 |
| I.8. Propriétés des bétons de sable | 16 |
| I.8.1.Les propriétés du béton de sable frais | 17 |
| I.9.Les propriétés du béton de sable durci | 20 |
| I.9.1.Les propriétés mécaniques | 22 |
| I.9.2.Les propriétés physiques | 22 |
| I.10.Le domaine d’emploi de béton de sable | 22 |
| PARTIE II:Généralité sur les déchets plastiques et caoutchouc | |
| I.1.Le plastique | 24 |
| I.1.1..Définition | 24 |
| I.1.1.Le déchet plastique dans les domaines de génie civil | 25 |
| I.1.2.Evaluation des propriétés du mortier /bétons à base des agrégats plastiques | 26 |
| I.12.Le caoutchouc | 26 |
| I.12.1.Pneu usage (PU) | 26 |
| I.12.2.Pneu usage non Rechapage | 27 |
| I.12.3.Valorisation des déchets pneumatiques | 27 |
| I.12.4.Impact environnemental des déchets pneumatiques | 28 |
| I.12.5 .déchet pneumatiques broyés | 29 |
| I.12.6.utilisations des pneus usagés en Algérie | 29 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.12.7.valorisations des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers | 29 |
| I.12.8.Effet de G.C sur les propriétés des ètons à l'Etats frais | 30 |
| I.12.9.Effet G.C sur les propriétés des déchets a l'Etats durci | 30 |
| I.13.Conclusion | 31 |
| Chapitre II : Caractérisations des Matériaux et procédures | |
| II.1.Introduction | 32 |
| II.2.caractéristiques des matériaux utilisés | 32 |
| II.2.1.Sable | 32 |
| 2.1. Analyse granulométriques (NF P18-304) | 32 |
| II.2.2.Ciment | 33 |
| II.2.3.L'eau de gâchage | 33 |
| II.2.4.Super plastifiant | 33 |
| II.2.5.Filler calcaire | 34 |
| II.2.6.La Poudre de caoutchouc | 34 |
| II.2.7.Poudre de Plastique | 35 |
| II.3.Formulation du béton de sable | 35 |
| II.4.Les mélangées | 36 |
| II.5.Essais Réalisés sur béton | 37 |
| II.5.1. Etat Frais (ouvrabilités) | 38 |
| II.5.2.Essais sur béton durci | 38 |
| II.2.a. Résistances mécaniques à la compression (NF EN 196-1) | 38 |
| II.5.2.b. Résistance à la traction par flexion | 39 |
| II.5.3.Propriétés physiques | 40 |
| II.5.3.b. Vitesse du son (ultrason) | 40 |
| II.5.3.c. Absorption totale | 41 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| II.6. Malaxage et conservation des éprouvettes | 42 |
| II.7.conclusion | 44 |
| Chapitre III: Présentations et discussion des Résultats | |
| III.1.Introduction | 45 |
| III.2.Propriétés physique des bétons de sable à l'état frais | 46 |
| III.2.1.l'ouvrabilité | 46 |
| III.2.1.2.Béton de sable avec la poudre de plastique et /ou caoutchouc | 46 |
| III.3.Propriétés mécaniques des bétons de sable à l'Etat durci | 47 |
| III.3.1.Résistance mécaniques a la compression | 47 |
| III.3.2.Résistance mécaniques a la flexion | 49 |
| III.4.Propriétés physiques des bétons de sable à l'Etat durci | 51 |
| III.4.1.La masse volumique | 51 |
| III.4.2.L'Absorption d'eau totale | 53 |
| Conclusions | 54 |
| Conclusions Générale | 56 |
| Références | 58 |

Liste des Tableaux

| Les Tableaux | Page |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Chapitre I: Revue Bibliographique | |
| Tableau I.1: Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment | 8 |
| Tableau I.2: Propriétés des plastiques couramment utilisés et les composants du béton | 25 |
| Chapitre II: caractérisation des matériaux Et procédures D'essais | |
| Tableau II.1: Propriétés Physiques du sable concassé | 33 |
| Tableau II.2 : Caractéristiques Physiques du Filler calcaire | 34 |
| Tableau II.3: Composition chimique du filler calcaire (%) (fiche Technique) | 34 |
| Tableau II.4 : Les caractéristiques physiques de la poudre de caoutchouc | 34 |
| Tableau II.5 : Les caractéristiques Physiques de la Poudre de plastique | 35 |
| Tableau II.6 : Composition des bétons de sable avec et sans poudre de Plastique et / ou caoutchouc | 36 |
| Tableau II.7 : Valeurs usuelles d'étalement | 38 |
| Tableau II.8 : évaluation de la qualité du béton en fonction de Vitesse de son | 38 |

| Les Figures | page |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Chapitre I: Revue Bibliographique | |
| PARTIE I: Généralité sur les bétons de sable | |
| Figure I.1 : le béton de sable en projection | 13 |
| Figure I.2: le béton de sable coulé | 13 |
| Figure I.3 : Maniabilité en fonction de module de finesse | 18 |
| Figure I.4: Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité | 18 |
| Figure I.5: Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la Résistance | 20 |
| Figure I.6: Effet ou dosage e, filler calcaire sur la Résistance à la compression (GADRI, GATTALA 2017) | 21 |
| Figure I.7: Effet du dosage en super plastifiant sur la Résistance à la compression | 21 |
| Figure I.8: Effet du rapport E/C sur la résistance a la compression | 22 |
| PARTIE II: Généralité sur les déchets plastiques et caoutchouc | |
| Figure I.9: Fumée toxique qui se dégage en brûlant des pneus | 27 |
| Figure I.10: Aspect du déchet de caoutchouc | 28 |
| Figure I.11: coupeaux de pneus déchiquetés | 28 |
| Figure I.12 : Influence de G.C sur l'affaissement | 30 |
| Figure I.13: Variation de la masse volumique du béton incorporant | 30 |
| Figure I.14 : Effet du caoutchouc sur la résistance à la compression | 31 |
| Figure I.15 : Effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion | 31 |
| Chapitre II: caractérisation des Matériaux Et procédures D'essais | |
| Figure II.1: La courbe granulométrique du sable concassé | 33 |
| Figure II.3: Table d'Etalement | 34 |
| Figure II.4: Appareil d'essai de compression | 34 |

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II.5: Appareil de Traction par flexion | 34 |
| Figure II.6 : Instrument de mesure le vitesse du son dans le béton | 35 |
| Figure II .7: Malaxeur à mortier | 36 |
| Figure II.8:Eprouvettes confectionnées | 38 |
| Chapitre III : Présentation et discussion des Résultats | |
| Figure III.1.Effet des filler calcaire sur l'étalement | 46 |
| Fguire III.2.Effet des poudres plastiques /caoutchouc sur l'étalement | 47 |
| Figure III.3.Effet des filler calcaire sur la résistance à la compression | 48 |
| Figure III.4.Effet de la poudre plastique /caoutchouc sur résistance a la compression | 48 |
| Figure III.5.Effet des filler calcaire sur la résistance à la flexion | 49 |
| Figure III.6.Effet de la poudre plastique /caoutchouc sur la résistance à la flexion | 49 |
| Figure III.7.Effet des calcaire sur la vitesse de son | 50 |
| Figure III.8.Effet de la poudre plastique /caoutchouc sur la vitesse de son | 51 |
| Figure III.9.Effet des filler calcaire sur la masse volumique | 52 |
| Figure III.10. Effet de poudre plastique /caoutchouc sur la masse volumique | 52 |
| Figure III.11. Effet des filler calcaire sur l'absorption d'eau totale | 53 |
| Figure III.12.Effet de la poudre plastique /caoutchouc sur l'absorption d'eau totale | 53 |

Introduction générale

La récupération des déchets est une opération très intéressante de nos jours. Cette opération à deux impacts très importants, l'impact environnemental et l'impact économique. L'utilisation des matériaux locaux et naturels dans la construction est actuellement une solution intéressante aux problèmes économiques et écologiques des pays. Les bétons de sable aussi font partie des matériaux de génie civil permettant de valoriser des ressources naturelles locaux comme le sable (dunaire, alluvionnaire ou de carrières). Le béton de sable est considéré comme un matériau qui précède le béton classique, c'est un béton sans granulats très pratique et esthétique se caractérise par son faible coût ; et qui peut être réalisé dans des domaines spécifiques tels que l'installation de trottoirs, l'aménagement d'aires de loisirs, le pavage de parkings, etc.

Vers un béton de sable plus allégé possédant un poids inférieur à celui d'un béton de sable ordinaire ; l'incorporation des granulats issus des déchets plastique et pneus usagés comme une substitution du sable et filler est très intéressant.

Ce travail consiste donc à récupérer des déchets plastiques, plus précisément matière Forex issus du PVC expansé. Il s'agit d'un matériau recyclable très utilisé pour les panneaux d'affichage et en signalisation. Aussi dans cette étude on a utilisé la poudre de caoutchouc issu du broyage des pneus usagé. Ces déchets sont ajoutés dans la masse du béton de sable par substitution. Etudier son effet sur les propriétés des bétons de sable réalisés à l'état frais et à l'état durci : la maniabilité, la résistance à la compression et à la traction, la vitesse de son, la masse volumique et déduire le module d'élasticité, ainsi l'absorption totale. Les différentes compositions sont analysées et comparées aux bétons de sable témoin respectifs.

Objectif du travail

Fabriquer un béton de sable avec des granulats légers et le valoriser dans les structures légères.

Ce travail est partagé en trois chapitres :

Chapitres I: Composé de deux parties

Partie 1 : Une recherche bibliographique des connaissances sur le béton de sable

Partie 2 : généralité sur les déchets plastiques et caoutchouc

Chapitres II: Présente une identification des matériaux et méthodes d'essais. Regroupe les caractéristiques des matériaux utilisés et les procédures de confection des mélanges, ainsi que les différents essais effectués dans le cadre de cette étude et en fin formulation et composition du béton de sable.

Chapitres III : présentations et discussion des résultats. Étude de l'effet de l'ajout des déchets de plastique et caoutchouc dans la confection du béton de sable sur les propriétés physiques et mécaniques

En fin l'étude se termine par une conclusion générale.

Partie I

Généralités sur les bétons de sable

I. 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 ferrailés, 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.2 Définition

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué

d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø.

Une question pourrait se poser : quelle est la différence entre le béton de sable et le mortier?

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton où le gros granulat est le sable ($D_{max} = 5\text{mm}$), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m³ de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimale étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400 à 600) Kg/m³.

I.3 Historique

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

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

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

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

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

A partir des années quatre-vingt, après le succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, et qui ont

trouvé un écho auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a enregistré un projet national appelé SABLOCRET, pour la promotion et le développement de ce matériau.

Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre.

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

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

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

I.4 Composants des bétons de sable

I.4.1 le sable

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 holométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un O/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

Les sables sont classés en:

Sable fin de 0.03 à 0.315mm

Sable moyen de 0.315 à 2mm

Sable gros de 2 à 5mm

I.4.1.a Classification des sables selon leurs provenances

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

- Sable de rivière : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- Sable de mer : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- Sable de carrière : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.
- Sable artificiel : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.
- Sable de dune : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara. [3]

I.4.2 le ciment

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.4.2.b Les constituants des ciments courants

Tous les ciments courants ont pour constituant de base le clinker qui assure la fonction liante grâce à laquelle on passe d'un état initial de fluide modulable à un état final de solide mécaniquement résistant; la norme NF P 18-301 spécifie que le clinker doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium. Le clinker est accompagné de

sulfate de calcium (le gypse) nécessaire pour régulariser la prise (le ciment reste coulable pendant une période suffisamment longue afin de permettre sa mise en place).

Les quatre principaux constituants du clinker sont :

- Le silicate tricalcique : C3S.
- Le silicate bi calcique : C2S.
- L'aluminate tricalcique : C3A.
- L'alumino-ferrite tétra calcique : C4AF.

Suivant le type, les ciments courants peuvent contenir d'autres constituants comme les laitiers granulés de haut fourneau, les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes siliceuse sou calciques, les schistes calcinés, les calcaires et les fumées de silice... ces constituants sont définis et spécifiés par « la norme NF P 15 301 ».

I.4.3 les fines d'ajouts (fillers)

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont :

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

La différence entre le béton classique et le béton de sable réside principalement dans la différence granulométrie .L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes regardons le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros (10 à 20 mm) ; ils créent des macros vides que l'on peut remplir par des sables et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et le dosage en ciment se traduit par la règle bien connue de :

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

Tableau I.1: Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment

| Granularité | \sqrt{D} | $550 \sqrt{D}$ | $700 / \sqrt{D}$ | |
|-------------|------------|----------------|------------------|---------|
| 0/25 | 1,904 | 290 | 370 | Béton |
| 0/20 | 1,821 | 300 | 385 | |
| 0 /16 | 1,741 | 315 | 400 | |
| 0/8 | 1,516 | 360 | 460 | |
| 0/6 .3 | 1,445 | 380 | 480 | Mortier |
| 0/4 | 1,320 | 415 | 530 | |
| 0/2 | 1,149 | 480 | 610 | |
| 0/1 | 1,000 | 550 | 700 | |

Lorsque la valeur de D diminue ($\leq 6\text{mm}$), et c'est le cas du béton de sable, lorsque le dosage en ciment devient très élevé ($> 400 \text{ kg/m}^3$). En effet, les vides d'un sable sont plus petits, plus nombreux et, globalement, plus importants que ceux d'un granulat d/D ($D > 6 \text{ mm}$). Il faut donc davantage de ciment pour les remplir : techniquement et économiquement cette règle n'est plus applicable ; il n'y a plus concordance entre dosage en fine et en ciment.

Dans le cas du béton de sable, on comble d'abord une partie des vides du sable par un filler, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels. Dans ces conditions, la règle en \sqrt{D} 5 peut encore s'appliquer, en première approximation, non plus au dosage en ciment seul mais à l'ensemble : ciment + fines.

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

On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fumé de silice, pouzzolanes broyées...) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives...).

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

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

Le rôle principal des fillers est celui de charges minérales, ils présentent cependant une certaine activité physico-chimique. Ils jouent tout d'abord un rôle de site de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker, qu'ils accélèrent. Cet effet n'est cependant notable qu'au jeune âge. A long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique, alors qu'en présence d'aluminates, les fillers calcaires conduisent à une formation rapide de composés appelés carbo-aluminates, ayant un certain pouvoir liant.

En tant que produits industriels, les fillers présentent de bonnes caractéristiques de régularité. D'autres parts, leur couleur généralement claire les rend favorables à l'obtention de parements architectoniques.

Nous citerons trois types de fines (fillers): les fillers calcaires (fines inertes), la fumée de silice (fines actives) et les cendres volantes.

I.4.4 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 filler peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton.

I.4.5 l'eau

Pour le béton de sable, on doit veiller à réduire le dosage en eau et par conséquent le rapport E/C afin d'augmenter sa résistance. Le choix du filler a aussi une influence sur le dosage en eau.

I.4.6 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à une dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et /ou à l'état durci.

La plus part des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquide. Certains adjuvants existent en poudre, afin de réduire le cout de transport (cas des chantiers à l'export). Dans ce cas il faut généralement les délais avant l'emploi : la dispersion homogène d'une petite quantité de poudre dans un malaxeur de centrale à béton est en effet moins certaine que celle d'un liquide.

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de substituer aux règles de la bonne technique.

I.5 Intérêts et limites des bétons de sable

Le béton de sable, comme tous les autres matériaux, à des intérêts et des limites :

I.5.1-Intérêts du béton de sable :

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

- ✓ **la maniabilité** : le béton de sable, éliant plus maniable, permet de faciliter la mise en œuvre, de diminuer l'énergie de la mise en place et d'augmenter les longueurs de pompage
- ✓ **La cohésion et l'absence de ségrégation** : le béton de sable assure une assez bonne cohésion et une absence de ségrégation qui est due à la variation peu importante entre les dimensions des grains

- ✓ **Le poids plus faible** :c'est une propriété recherchée dans les travaux de réhabilitation de la structure ancienne ou pour le remplissage des structures neuves
- ✓ **Faible granularité** :ce qui rend le béton de sable utile dans les travaux d'injection et pour le bétonnage d'un milieu fortement ferrailé
- ✓ **Bel aspect de surface** : le béton de sable permet la réalisation d'effet architectonique tant sur la forme que sur l'aspect

Ajoutons à tout ceci l'abondance de la matière première dans certaines régions et la raréfaction des gros granulats

I.5.2 Limites du béton de sable

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

I.5.2.a Raisons économiques

L'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le cout dans la mesure où ce béton n'apporte pas « un plus » dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte locale en matière de granulats et de l'usage envisagé En ce qui concernée notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquelles nous pouvons tirer des fillers .IL existe règlementes fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

I.5.2 .b Raisons techniques

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

I.5.2 Retrait :

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de

dessiccation des deux bétons (béton de sable et béton ordinaire), en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondants globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48. En Conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage). Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire

S'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire.

Les mortiers et les bétons subissent des variations importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varie.

Immédiatement après le gâchage, a lieu une première réduction de volume irréversible.

Après le durcissement de mélange et son exposition à l'air commence une nouvelle réduction de volume qui est partiellement réversible au ré humidification.

La première réduction de volume due au séchage irréversible s'appelle contraction plastique et la réduction de volume due au séchage réversible s'appelle retrait. La contraction plastique est provoquée par l'hydratation des composants minéralogiques du ciment, tandis que le retrait est dû surtout à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores.

On distingue les retraits suivants: - le retrait d'hydratation ;

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

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

I.6 Domaines d'application

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles tiennent davantage à ses propriétés spécifiques. Les figures suivantes illustrent ces applications :

- La préfabrication : Le béton de sable peut être utilisé dans la préfabrication pour des murs architecturaux, pour des mobiliers urbains, en bâtiment et en voirie.

- La projection : Le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments

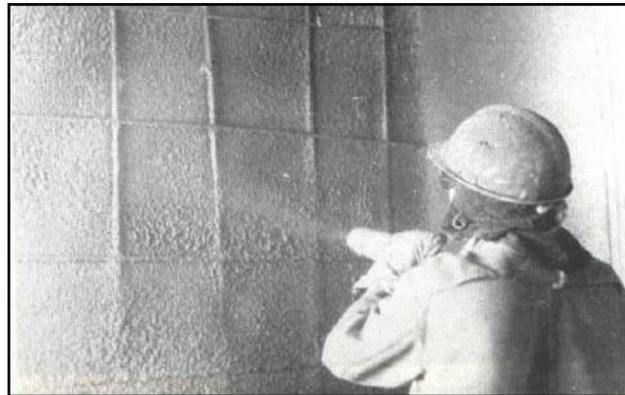
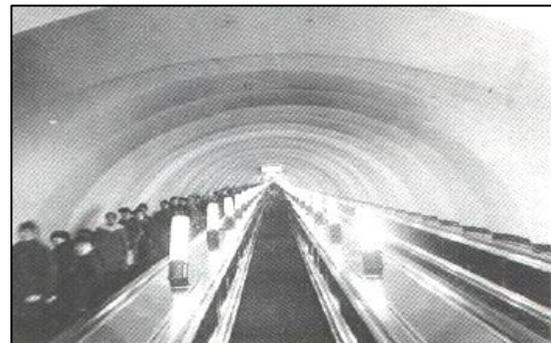


Figure I.1 : Le béton de sable en projection

- Béton de sable coulé : Il peut être coulé sur place dans les routes et autoroutes, dans les aérodromes et en bâtiment.



A/ Réalisation d'une piscine



B/Tunnel d'accès au métro de Leningrad

Figure I.2 Le béton de sable coulé.

I.7 Formulation de béton de sable

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants permettant de satisfaire à un cahier des charges, répondant à des critères techniques et économique.

Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème.

Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchés successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique. A ce titre il y a lieu de présenter deux

types de formulation, dont l'une est théorique et l'autre expérimentale, en se basant sur les deux critères principaux des bétons structuraux.

- La résistance mécanique.
- La maniabilité qui est la facilité de la mise en œuvre.

I.7.1 Principe de formulation

Le béton de sable, à la différence des mortiers, utilise un dosage en ciment proche des bétons ordinaires (300 à 400 kg/m³). Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement en l'emploi de granulats de faible diamètre ($\Phi \leq 5\text{mm}$), une adjonction de gros granulats est cependant possible mais dans un rapport massique G/C inférieur à 1. Les dosages en ciment ont été possibles grâce au remplissage des vides du sable par un filler d'augmenter la compacité par création d'une étendue granulaire continue. Les fillers utilisés, en général, sont de nature calcaire grâce à leur grande réactivité avec les hydrates. La grande surface spécifique obtenue par l'emploi d'une grande fraction de particules fines nécessite un mouillage important d'où l'utilité d'un réducteur d'eau, dans le but d'augmenter les performances et d'atténuer les déformations différées. (A.BENAISSA et al, 1992).

I.7.2 Exemple théorique de formulation de béton de sable

A titre d'exemple théorique, nous allons envisager la formulation de différents bétons de sable selon la méthode exposée précédemment.

Cas le béton de sable [D =5mm] avec un ciment CPJ55 (classe vraie 60 MPa), super• plastifié. Nous reprenons le cas de formulation précédent avec pour seule différence, une défloculation des fines par le biais d'un adjuvant super plastifiant.

La qualité de fines est inchangée, à savoir:

$$[\text{Fines}] = 166 \text{ l/m}^3$$

Avec un mélange dé floclé, nous estimons la taille des plus petites particules, pour une finesse de Blaine moyenne de 3000 cm² /g pour le ciment (nous admettons que la finesse du filler est inférieure à celle du ciment) :

$$d = 0,0064 \text{ (mm)}$$

Soit :

$$[\text{Eau} + \text{vides}] = 211 \text{ (l/m}^3 \text{)}$$

Et avec $k = 0,2$ on aura :

$$[\text{vides}] = 35 \text{ (l/m}^3\text{) soit } 3,5 \%$$

$$[\text{Eau}] = 176 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

Finalement, le dosage en sable est de :

$$[\text{Sable}] = 623 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

Soit avec une densité de **2.7**, un dosage de 1680 (kg/m³).

Nous estimons alors la résistance en compression avec la formule de Ferret modifiée en partitionnant les fines pour une utilisation optimale des fillers, soit un rapport [filler/ciment] d'environ 0,8. Nous obtenons à nouveau:

$$\text{Ciment} = 268 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{et} \quad \text{Filler} = 215 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

D'où avec $KF = 5$ et $K2 = 0,2$

$$RC = 32,6 \text{ MPa}$$

Nous constatons que la simple défloculation des fines peut permettre d'obtenir des performances mécaniques très satisfaisantes, de l'ordre de 40% supérieures au cas non défloculé, en maintenant le même dosage en ciment. Acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

I.7.3 Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixe, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum. Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au Maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple: le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction.

I.7.3.a Les différentes étapes de la formulation :

❖ Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

a) Dosage en ciment : Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m³).

b) Dosage en eau : A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m³), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 230 litres d'eau pour 350 Kg de ciment.

❖ Détermination du dosage en sable :

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 µm en extrait sec), qui permettra de dé flocler les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, V_{air}, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton; on aboutit à la relation suivante:

$$\mathbf{V_{air} + V_c + V_E + V_{adj} + V_{sable} = 1\ 000 \text{ (En litres).}$$

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule de un mètre cube du béton S (Kg/m³).

I.8 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. 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.

II.8.1 Les propriétés du béton de sable Frais

A/ Maniabilité

Le béton de sable se traduit par des valeurs E/C (eau /ciment) supérieures à 0.5, ce rapport Généralement varie entre 0.6 et 0.7. Cette valeur élevée est due à une surface spécifique plus importante du mélange. La maniabilité des bétons de sable dépend aussi du module de la Finesse de sable (Figure I.3); la nature, le dosage en fine et le taux de gravillon dans le béton de Sable. Le module de finesse de sable influence les propriétés du béton à l'état frais et le Comportement mécanique du durci. La dimension des particules d'un sable à béton peut être Évaluée d'après l'analyse granulométrique et son module de finesse (MF). Plus MF est élevé Plus le sable est grossier et moins le béton est ouvrable. Pour un béton normal : plus-les Granulats sont fins, plus il y aura des vides dans le mélange. Or ces vides doivent être remplis Par la pâte de ciment. Par conséquent, le mélange sera moins économique pour un rapport E/C Constant. Plus les granulats sont rugueux moins ils sont maniables mais plus ils sont résistants Car ils offrent une meilleure adhérence.

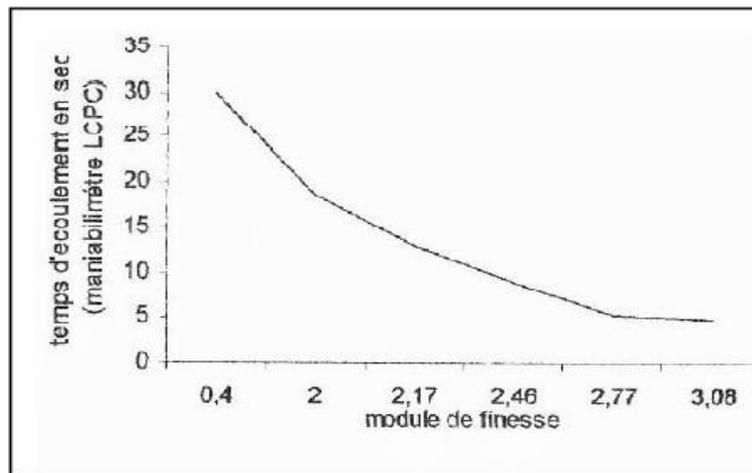


Figure I.3 Maniabilité en fonction de module de finesse (SBLOCRETE, 1994)

La granulométrie (dimension et distribution) et la nature des particules (forme, texture, Porosité ...etc.) Sont deux caractéristiques essentielles pour le choix d'un granulat à béton. Le module de finesse est élevé lorsque le sable est riche en éléments gros ce qui implique une amélioration de la maniabilité.

La nature et le dosage en fines (additions minérales) influencent de façon significative la Maniabilité des bétons de sable (Figure I.4). La maniabilité est améliorée lorsque le rapport E/C est Augmenté et pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend du dosage en additions fines (ASBLOCRETE, 1994).

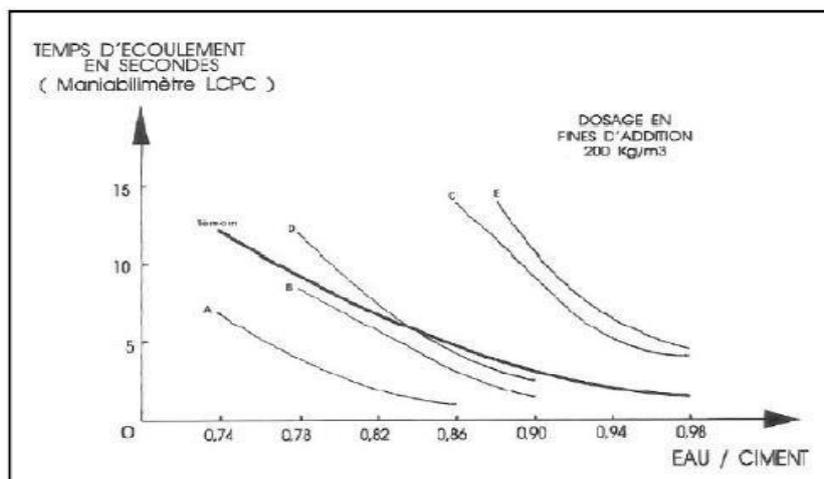


Figure I.4 Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité (ASBLOCRETE, 1994)

B/La compacité du béton de sable

Il s'agit maintenant d'optimiser la compacité globale du mélange sable - pâte. En pratique, Cette approche ne peut pas être dissociée de la notion d'ouvrabilité du béton. En effet, l'optimisation de la compacité relève plutôt d'une démarche visant à minimiser la quantité d'eau à ajouter au mélange des constituants secs pour atteindre une ouvrabilité fixée.

Par suite, les grandeurs relatives à la résistance et à la durabilité sont également optimisées au Regard du dosage en ciment retenu. Pour ce faire, nous choisissons arbitrairement une quantité de ciment et de filler calcaire et nous en déduisons la quantité de micro filler pour Constituer la pâte. Ensuite, en faisant varier la quantité de sable, nous cherchons pour chaque Mélange la quantité d'eau nécessaire pour assurer la maniabilité fixée. Nous obtenons alors une courbe d'iso maniabilité qui présente un optimum correspondant au dosage de sable Désiré.

C/Granulométrie

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 (Figure 1.5) que l'effet du diamètre Dmax 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 voulu.

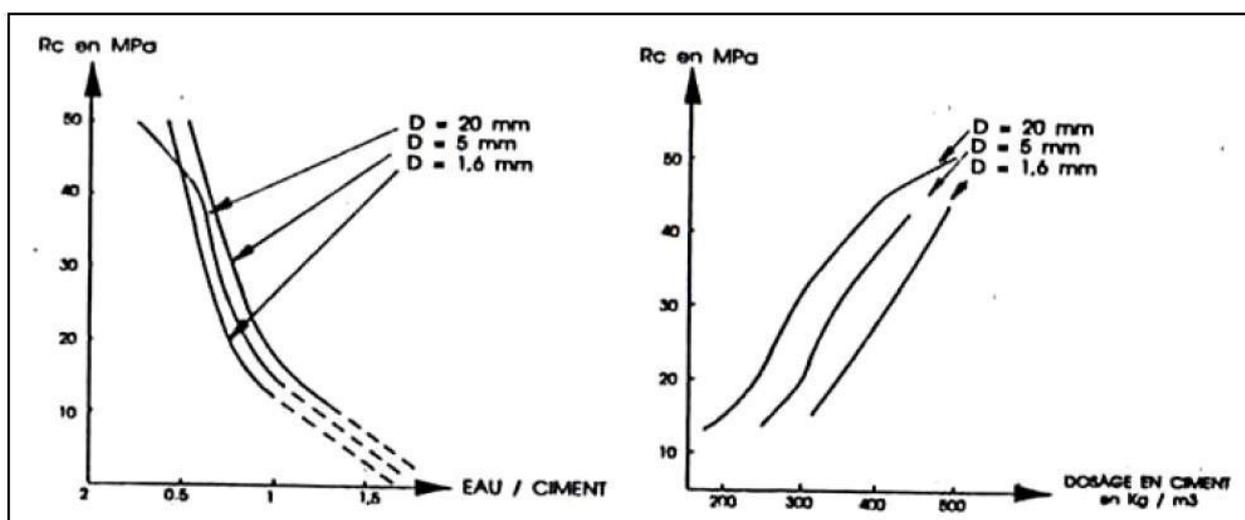


Figure I.5 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance

II.9 Les propriétés du béton de sable durci

II.9.1- les propriétés mécanique

Généralement la résistance à la compression du béton sable est faible par rapport au béton ordinaire, Dans une étude menée par Karima Gadri et Abdelhamid Guettala sur trois séries de béton de sable avec variation le dosage de l'ajout filler calcaire ou addition super plastifiant Variation le rapport E/C, il montré l'effet de ces facteurs sur la résistance à la compression de béton de sable .

En première étape série 01 : étudié variation de la teneur de filler calcaire. Amélioration de la résistance à la compression est constatée en fonction d'ajout du filler calcaire.

Les résultats solen la figure I.6 ; On a remarqué que l'augmentation du taux de filler calcaire au-delà de 180 Kg/m³ a un effet négatif sur la résistance. Qui conduit à une diminution de 21% par rapport à la résistance optimale. Cette diminution est Due à la chute de la densité du mélange causé par l'occupation des filler la place des grains de sable, qui ont diminué leur Proportion dans le mélange.

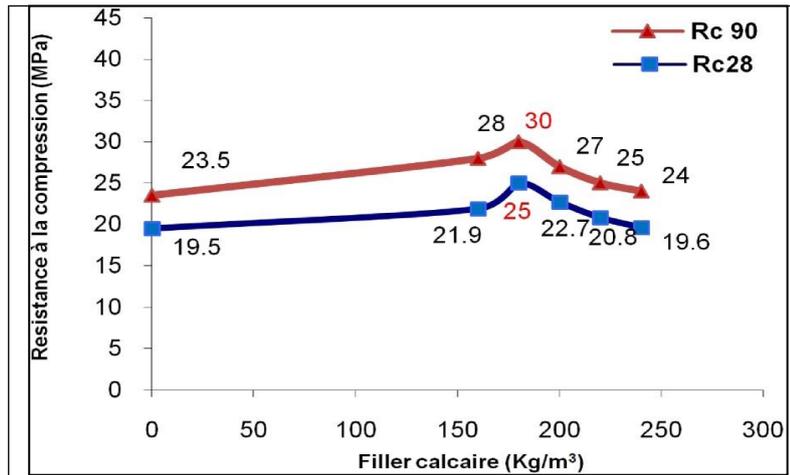


Figure I.6 Effet du dosage en filler calcaire sur la résistance à la compression.

(GADRI, Guettala 2017)

En deuxième étape série 02 : l'objectif est d'obtenir des gains de résistance appréciables avec une meilleure maniabilité. De ce fait, un ajout du super plastifiant est indispensable

Les résultats solent la fig : On remarque une augmentation des résistances en fonction du super plastifiant. La meilleure résistance à la compression Enregistrée à l'âge de 28 et 90 jours est obtenue par une teneur de 2% du super plastifiant, Cela peut être expliqué par l'effet principal des super plastifiants, qui offre une meilleure Distribution des grains de ciment, et par conséquent d'une meilleure hydratation.

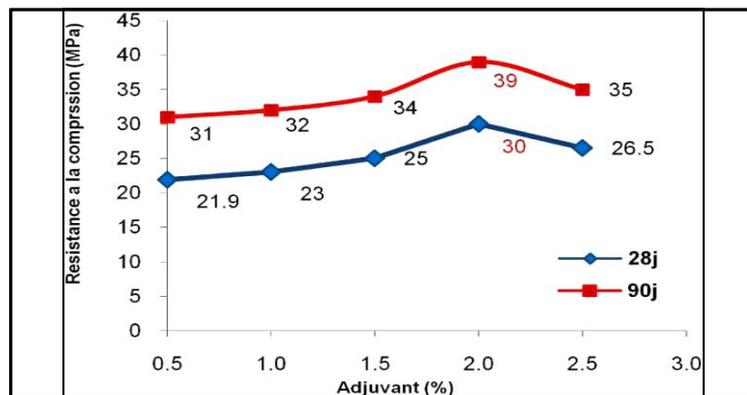


Figure I.7. : Effet du dosage en super plastifiant sur la résistance à la compression.

(GADRI, GUETTALA ,2017)

En dernière étape série 03 : on a réduit le dosage en eau et on a fixé le dosage en super plastifiant à 2% afin d'améliorer la résistance à la compression et réduire la porosité.

Les résultats solent la figure I.7:On enregistre une résistance optimale à la compression avec le même rapport (E/C= 0,6) pour les deux âges 28 et 90 jours; ce rapport désigne la

quantité d'eau nécessaire et suffisante pour l'hydratation. Mais au-delà de ce rapport, l'excès d'eau reste sans aucun doute le principal paramètre influençant la fluidité du béton, faisant toute fois chuter la résistance. En fait, l'addition de l'eau peut diminuer les contraintes de cisaillement dues à la cohésion et au frottement interne dans le béton et rend, par conséquent, sa viscosité plus faible. (.GADRI, GUETTALA ,2017)

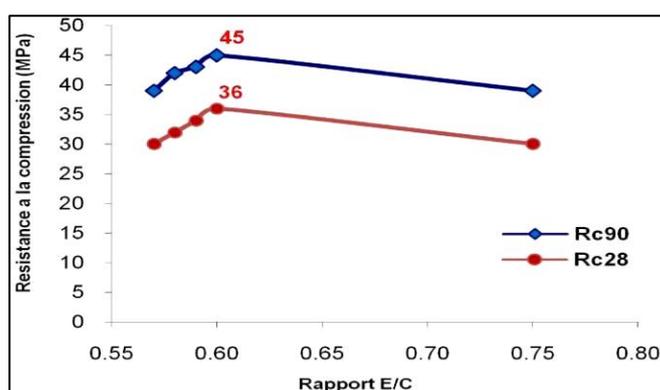


Figure I.7 : Effet du rapport E/C sur la résistance à la compression.

(GADRI, GUETTALA ,2017)

I.9.2 Les propriétés physiques

Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est en fonction directe avec les conditions atmosphériques Ambiantes. Pendant et après la Prise du béton. Le travail de Benaissa et al (Benaissa et al, 1993) montre que les bétons de sable développent une cinétique de déformation deux fois plus rapide pendant les deux premiers mois, au-delà desquels on assiste à un ralentissement donnant des vitesses très proches de celles des bétons classiques.

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisées pour étudier l'effet des ajouts minérales sur la Cinétique du retrait des bétons en particulier les bétons de sable. (Gadri et Guettala, 2017) montrent que les retraits des dessiccations des bétons de sable diffèrent en fonction du type de sable, type et dosage en fine d'ajouts.

I.10 Le domaine d'emploi de béton de sable :

Le domaine d'emploi actuel du béton de sable est sensiblement équivalent à celui du béton traditionnel. D'ailleurs, l'usage du béton de sable est plus ancien et s'il a été délaissé, c'est qu'il a été possible d'obtenir à moindres frais des résistances élevées avec des granulats de plus gros diamètres. En définitive:

- ou bien, dans l'usage envisagé, le béton de sable apporte un "plus" technique par rapport au béton classique, et même à coût équivalent il est plus intéressant; dans cette éventualité Le coût du sable n'est pas obligatoirement une donnée plus importante qu'elle ne l'est d'ordinaire.

- ou bien, si l'usage envisagé n'exige pas de propriétés particulières, le béton de sable utilisé en remplacement du béton classique peut conduire à des économies là où les sables sont abondants; cette éventualité exige un sable bon marché.

Toutefois, le béton de sable ne peut prétendre au remplacement systématique du béton traditionnel. En effet, d'un point de vue économique, la nécessité des ajouts pour obtenir un Même niveau de résistance est susceptible de générer des surcoûts: l'usage concerné et le contexte local en matière d'exploitation de granulats et de disponibilité en sable et filler sont déterminants.

En outre, aux questions qui se posent encore sur le retrait, le fluage et la durabilité des bétons de sable, les actions menées dans le cadre de programmes de recherche devraient

Apporter des réponses pertinentes et utiles. Enfin, dans le cadre du projet national SABLOCRETE.

En France, beaucoup de réalisations pilotes ont été faites dans les domaines des routes (dalles de chaussées rigides, bordures caniveaux), du bâtiment (dallage parpaings, poutres en

Béton Précontraint I et des ouvrages d'art (pieu foré à la tarière creuse, pieu foré sous bentonite). En outre, nous notons des réalisations quasi centenaires en Union Soviétique Pont de Chernavskif, l'aérodrome militaire de Pevek ...). (ndiaye, 1993).

Parti 2

Généralité sur les déchets plastiques et caoutchouc

I.11Le Plastique

I.11.1 Définition

Le terme plastique est dérivé de plastikos, un mot grec signifiant apte au moulage ce terme fait référence à la plasticité ou malléabilité d'un matériau qui permet sa coulée le plastique forme une classe de matériaux relativement moderne synthétisé pour la première fois en 1862 par Alexander parkes dans le but de produire un substitut à l'ivoire pour la fabrication de boules de billard

Les plastiques sont des matériaux déformables les peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud et sous pression leur facilité de mise en forme résistance aux chocs, aux variations de température, à l'humidité, aux détergents les rendent utiles dans tous les domaines : emballage, bâtiment, automobile, élasticité, etc. Il existe un grand nombre de plastiques aux propriétés différents, on les classe en trois grandes catégories : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

I.11.2 Le déchet plastique dans les domaines de génie civil

Comme les matériaux de construction traditionnels d'origine naturelle sont confrontés, à terme et à l'épuisement provenant des déchets l'utilisation des matériaux plastiques dans le mortier et le béton a fait l'objet de nombreuses recherches, les plastiques teint principalement utilisés dans le béton sous deux formes de :

- Granulats plastiques qui remplaçant les granulats naturels
- fibres plastiques, utilisés dans le béton fibré

Les propriétés des granulats plastiques, pour être utilisés comme un agrégat dans les préparations des bétons et mortiers telles que la distribution granulométrique, la densité apparente, et l'Absorption de l'eau ont été généralement évaluées dans la majorité des études publiées. L'évaluation de la distribution granulométrique des agrégats en plastique a été faite en générale par des méthodes classiques de tamisages, et on peut affirmer que les procédures standards utilisés pour évaluer les propriétés telles que la densité absolue et l'Absorption d'eau des granulats naturels peuvent être utilisées pour évaluer les propriétés des agrégats en plastiques avec des légères modifications.

Tableau I.2: Propriétés des plastiques couramment utilisés et les composants du béton

| Matériaux | ft (Mpa) | E(Gpa) | k(k/m.k) |
|----------------------------------|------------|---------|-----------|
| PET (Polyéthylène tèrephthalate) | 55-80 | 2,1-3,1 | 0,15 |
| PVC (polychlorure de vinyle) | 50-60 | 2,7-3,0 | 0,17-0,21 |
| PS (polystyrène) | 30-55 | 3,1-3,3 | 0,105 |
| PP (polypropylène) | 25-40 | 1,3-1,8 | 0,12 |
| PE (polyéthylène) | 18-30 | 0,6-1,4 | 0,33-0,52 |

I.II.3 Evaluation des propriétés du mortier /bétons à base des agrégats plastiques

la résistance à la compression diminue presque linéairement avec l'augmentation du niveau de substitution, respectivement, à un âge de durcissement de 28 jours l'augmentation continue de la résistance mécanique avec le temps due à l'hydratation du ciment au cours du temps ce qui provoque l'évolution de la compacité, mais on constate également une diminution de la résistance mécanique en fonction de l'augmentation du pourcentage des granulats plastique dans les mortier ou les bétons

- l'Absorption d'eau et la porosité d'un mortier ou un béton augmentent en fonction du pourcentage des granulats plastiques en remplacement du sable
- l'Absorption d'eau et la porosité du béton contenant des agrégats du déchet plastique augmentent, car les agrégats plastiques et naturels ne se mélangent pas suffisamment dans la matrice du béton, ce qui donne une matrice poreuse
- l'incorporation du plastique peut réduire la densité, les paramètres de durabilité
- l'utilisation des déchets plastique conduits à une moindre résistance au feu matériaux cimentaires composites par rapport aux ceux classiques

I.12 - Le caoutchouc

Les professionnels du secteur du pneumatique distinguent deux types de pneus usages :

I.12.1 Pneu usage (PU)

C'est un pneu usage qui peut avoir une deuxième ou une troisième vie après rechapage (une nouvelle bande de roulement) le cas des pneus n'ayant pas atteint la limite d'usure autorisée (surtout le peu du poids lourd) des traces de vieillissement , peuvent apparaitre sur les pneus elles que l'usure de la bande de roulement ou des fissures ces pneus usagés pouvant être:Rechapés ou commercialisé sur le marché de l'occasion

I.12.2 Pneu usage non Rechapage (PUNR)

Ce terme désigne un pneu qui ne peut plus assurer la mobilité d'un véhicule en respectant les normes de sécurité, c'est ces derniers qui sont effectivement des déchets.

I.12.3 Valorisation des déchets pneumatiques

Le stockage et l'élimination des pneumatiques usagés sont devenus des préoccupations graves pour l'environnement à travers le monde. Des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans les États-Unis et de nombreux autres pays à travers le monde, chaque année. Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1439514 unités, soit 25918 tonnes par an (3500000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8,4 millions de véhicules, d'après les déclarations du Ministre du Transport en septembre 2016 au journal El Moudjahid. Les filières classiques de valorisation des pneus usagés qui nécessitent souvent une technologie avancée, sont généralement concentrées dans les pays riches. Le développement de nouvelles filières de valorisation de pneus usagés, reste cependant toujours en grande demande partout dans le monde.

Il y a quatre origines de déchets pneumatiques être signalées

- Les déchets de caoutchouc industriel
- Les déchets de fabrication de pneumatique.
- Les pneumatiques usagés

- Les déchets de rechapage.

I.12.4 Impact environnemental des déchets pneumatiques :

La priorité de l'homme pour la protection de son environnement devant l'agressivité de l'effet de serre est un engagement important pour les générations futures, puisque il est considéré comme une source importante d'alimentation des différents aspects de pollution.

Malgré tous les inconvénients que les pneumatiques usagés possèdent, ils ne sont pas catégorisés comme déchets toxiques ou dangereux, car ils ne sont pas biodégradables, mais sont nuisibles pour l'environnement et santé en cas d'incendie.

Ces derniers une fois bruler, dégagent des fumées hautement dangereuses, par sa teneur en gaz toxique (Figure I.9) sont composés par des hydrocarbures chlorés et des pléromatiques et des dioxines causant ainsi chaque année des maladies et des allergies tel que l'allergie cutanée. Ils produisent aussi une vapeur toxique (possédant des composants de silice de carbone). Les épaisses fumées se répandant dans l'atmosphère en cas d'incendie peuvent causer beaucoup de maladie respiratoire.



Figure I.9 Fumée toxique qui se dégage en brulant des pneus.

I.12.4 Déchets pneumatiques broyés :

➤ **Poudrettes** : Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2 mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes (Figure I.10) sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines



Figure I.10 :Aspect des déchets de caoutchouc (caddie, tondeuses, brouettes ...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface) ...etc.

➤ **Granulés** : Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines , colorés ou non , et permettent , par moulage , de réaliser facilement des feuilles ou des plaques, comme exemple d'utilisation , on a aires de jeux , les pavés antidérapants , les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples , diminution des nuisances sonores) D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la mécanique), ou la Pyrolyse –Thermolyse. Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone ... etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre.



Figure I.11 Coupeaux de pneus déchiquetés.

I.12.5 Utilisations des pneus usagés en Algérie :

Le gisement Algérien de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre pour les véhicules poids lourds de 200000 tonnes /an (19. Millions de pneus). Mais les quantités valorisées sont très limitées, nous notons quelque type d'utilisation :

- Utilisées en agriculture pour renforcer les petits barrages et comme Siège dans les jardins traditionnels.
- Applications de résidus de copeaux de pneus en structure sous chaussée.
- Pour la Stabilité d'un talus.
- Rechapage pneus usagés à El Eulma.
- Utilisation pour couvrir les conducteurs électriques.
- Pneu sol, déjà utilisé dernièrement à Alger par une société Italienne.
- Stabilité d'un glissement de terrain.

I.12.6 Valorisation des déchets pneumatiques dans les bétons et les mortiers

La possibilité de valorisation des déchets pneumatiques dans le béton sous forme de granulats a été l'objet de nombreuses recherches expérimentales. Ces recherches ont eu pour finalité que l'incorporation des déchets pneumatiques dans les bétons effectuent leurs propriétés aussi bien à l'état frais que à l'état durci.

I.12.7 Effets de G.C. sur les propriétés des bétons à l'état frais

A/ Ouvrabilité :

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant. D'après l'étude réalisée par Khaloo et al. le béton incorporant des G.C. à une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition. Néanmoins, leurs résultats montrent que la procédure ordinaire pour évaluer l'affaissement n'est pas appropriée à ce composite cimentaire. Ils ont donc suggéré qu'il fallait chercher d'autres méthodes pour mesurer correctement l'affaissement du béton incorporant des granulats en caoutchouc (Figure I.12).

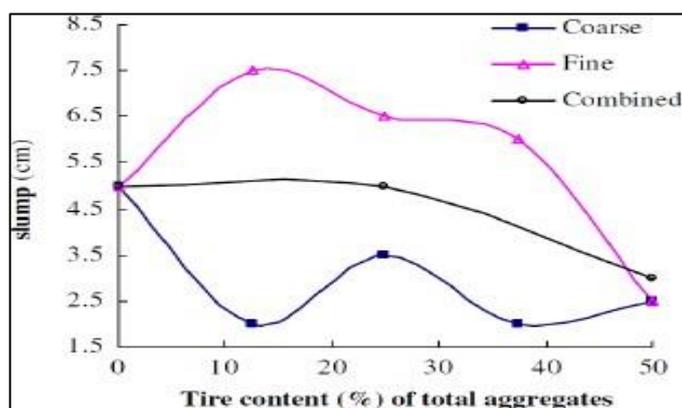


Figure I.12 : Influence de G.C. sur l'affaissement

B/ Masse volumique

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire.

C/ Teneur en air

Concernant la teneur en air occlus, Khatib et al. ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure I-8 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des G.C. fins

et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C. (Figure I.13)

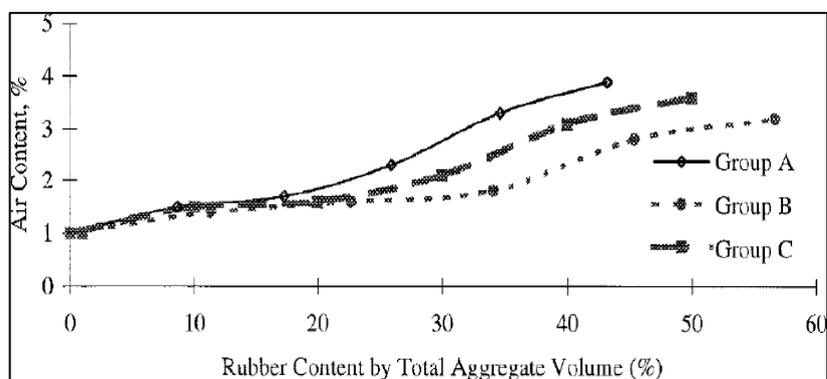


Figure I.13: Variation de la masse volumique du béton incorporant des G.C.

I.12.6 Effets de G.C. sur les propriétés des bétons à l'état durci

A/ Caractéristiques mécaniques

Plusieurs recherches sont réalisées pour étudier les caractéristiques mécaniques, les principales conclusions tirées à parti de ces études c'est que l'incorporation des particules des caoutchoucs diminue la densité et les paramètres de résistance du béton et augmenter la ductilité de ces matériaux.

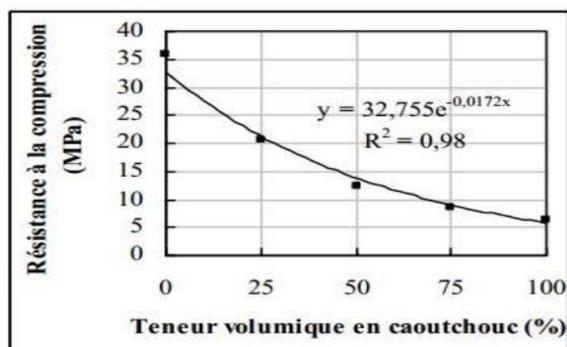


Figure I.14: effet du caoutchouc sur la résistance à la compression

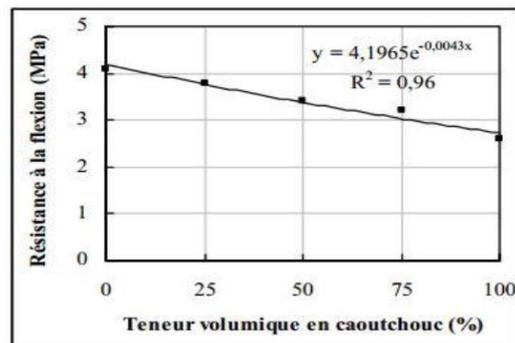


Figure I.15: effet du caoutchouc sur la résistance à la flexion

I.13 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les concepts généraux du béton de sable, ainsi que de passer en revue les dernières études et développements sur le béton de sable.

Présentation de deux méthodes, la méthode théorique et la méthode expérimentale Qui est basé sur d'essai d'optimisation.

Ont également été présentées Certaines études montrant l'effet des composés de béton de sable sur les propriétés mécaniques et physiques.

Nous pouvons dire que les bétons de sable pourront remplacer les bétons classiques dans Certains éléments porteurs. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès. Pour avoir une maniabilité convenable.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux et Procédures d'essais

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons exposé les propriétés des matériaux utilisés dans ce projet de recherche, les méthodes de malaxage utilisées pour fabriquer nos mélanges, ainsi que les divers essais expérimentaux pour évaluer les mélanges à l'état durci.

II.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

II.2.1 Sable

Nous avons employé un sable concassé provenant d'Ain-Touata(wilaya de Batna), qui se trouve à 80 km de la ville de Biskra.

2-1- Analyse granulométrique (NF P18 -304):

Grâce à l'analyse granulométrique, il est possible d'évaluer la répartition en poids des différents éléments qui composent le sable utilisé dans notre étude. Les résultats obtenus sont représentés aussi sous forme d'un tracé d'une courbe granulométrique (Figure II.1) et les Propriétés physique présentés dans le tableau II.1

Tableau II.1 propriétés physiques du sable concassé

| Propriétés physique | Valeurs |
|---------------------------------------------------|---------|
| La masse volumique apparent (g/cm ³) | 1,45 |
| la masse volumique absolue (g/cm ³) | 2,47 |
| Module finesse | 2,6 |
| Compacité (%) | 58,7 |

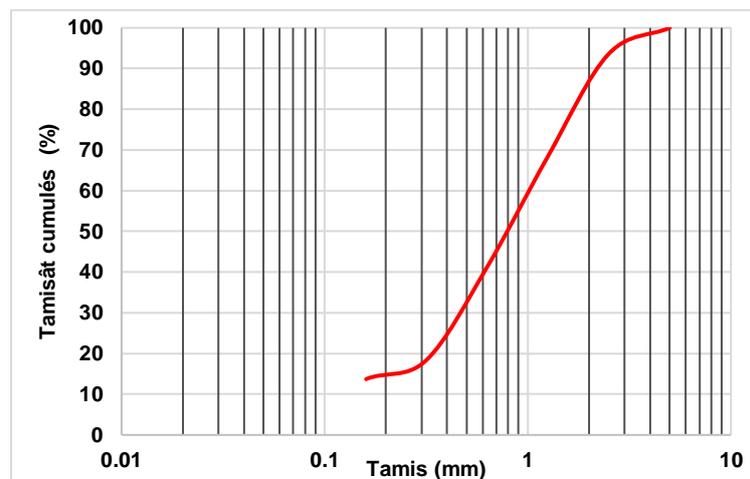


Figure II.1. La courbe granulométrique du sable concassé.

II.2.2 Ciment

Tous les mélanges ont été fabriqués avec un seul type de ciment (CPJ-CEM II/A 42.5) provenant de la cimenterie (SCIMAT) de Aïn-Touta. La masse volumique apparente de ce ciment est de **0,97 g/cm³**, sa masse volumique absolue est **3,1 g/cm³**

II.2.3 L'eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet de génie civil de l'Université de Biskra. Nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (NF EN 1008) en matière de béton.

II.2.4 Super plastifiant

Le "Sika "viscoCrete" TEMPO-6" est un super plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération, qui se présente sous forme liquide, d'une couleur brun clair, avec une densité de $1,060 \pm 0,010$, un pH de $4,0 \pm 1,0$ et une teneur en chlore inférieure à 0,1 %. Selon

les performances recherchées, la plage de dosage recommandée varie de 0,2 à 3 % du poids de liant.

II.2.5 Filler calcaire :

Il s'agit de roches calcaires broyées, disponibles dans la majorité des Carrières d'Algérie. Le filler calcaire utilisé dans cette étude provient De la carrière d'Oum Settas (El Khroub), de diamètre moyen 23 μ m.

Tableau II.2 :Caractéristiques physiques du filler calcaire

| Densité apparent (g/cm ³) | Densité absolue (g/cm ³) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1,09 | 2,7 |

Tableau II.3: Composition chimique du filler calcaire(%) (Fiche technique)

| % | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ | Cl- | L.O.I |
|-----------------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|-----------------|-------|-------|
| filler calcaire | 0,01 | 55,88 | 0,01 | 0,01 | 0,14 | 0,01 | 0,01 | 0,11 | 0,005 | 43,9 |

II.2.5La poudre de caoutchouc

La poudre de caoutchouc issu du broyage des pneus usagés est ajoutée au béton de sable en remplaçant partiellement le filler calcaire par de la poudre de caoutchouc. Les particules de caoutchouc ayant une taille inférieure à 0.5 mm.

Les caractéristiques physiques de la poudre de caoutchouc sont présentées dans le Tableau II.4 ci-dessous

Tableau II.4 Les caractéristiques physiques de la poudre de caoutchouc

| | |
|---------------------------------------------------|------|
| La masse volumique apparente (g/cm ³) | 0,5 |
| La masse volumique absolue (g/cm ³) | 0,9 |
| Compacité (%) | 0,55 |

II.2.6 La poudre de plastique

La poudre plastique utilisée est issue du PVC Expandé est souvent appelé "Forex", en référence à la marque bien connue. Les particules de plastiques ayant une taille inférieure à 0.3 mm.

Les caractéristiques physiques de la poudre de plastique sont présentées dans le Tableau II.5 ci-dessous

Tableau II.5 Les caractéristiques physiques de la poudre de

| | |
|--------------------------------------------------------|-------------|
| La masse volumique apparente (g/cm³) | 0,36 |
| La masse volumique absolue (g/cm³) | 0,5 |
| Compacité (%) | 72 |

II.3 Formulation du béton de sable

La composition du béton de sable est préparée selon une formulation fondamentale appuyée sur une approche expérimentale (Chauvinet Grimaldi 1988; SABLOCRETE 1996; Benaissa et al. 2008). Cette méthode est basée sur le critère d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Partant d'une composition de base avec un choix fixe du dosage de ciment (C) à 350 kg/m³ (Chauvin et Grimaldi 1988), la quantité de sable est évaluée par un coefficient de compacité (γ) du mélange (George et Jean 1998).

Le coefficient de compacité (γ) correspond au pourcentage de solides dans un volume absolu de 1000 litres.

- Le coefficient de compacité (γ): est égale à 0,770 ce qui correspond à un concassé avec $D_{max} = 5\text{mm}$, une consistance plastique par de vibration normale
 - Le dosage du sable étant déterminé selon la formule suivant :

$$V_S + V_C = 1000\gamma$$

V_C = volume absolue pour le ciment

V_S = volume absolue pour le sable

$1000\gamma =$ volume totale absolue

- Le dosage de l'eau :

Le rapport E/C = 0,65

- Le dosage du superplastifiant: Le dosage de super plastifiant est 2 % par rapport le dosage de ciment

Tableau II.6 Composition des bétons de sable avec et sans poudre de plastique et /ou caoutchouc

| Béton de sable | Ciment (kg/m ³) | Sable (kg/m ³) | filler calcaire (kg/m ³) | Poudre plastique (kg/m ³) | Poudre caoutchouc (kg/m ³) | filler calcaire (%) | granulats plastique (%) | granulats caoutchouc (%) | E/C | sup (%) |
|----------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|------|---------|
| BS0 | 350 | 1549 | / | / | / | / | / | / | 0,65 | 2 |
| BS1 | 350 | 1379 | 170 | / | / | 10 | / | / | 0,65 | 2 |
| BS2 | 350 | 1337 | 212 | / | / | 12,5 | / | / | 0,65 | 2 |
| BS3 | 350 | 1304 | 245 | / | / | 15 | / | / | 0,65 | 2 |
| BSP1 | 350 | 1379 | 127,5 | 42,5 | / | 75 | 25 | 25 | 0,65 | 2,5 |
| BSP2 | 350 | 1379 | 85 | 85 | 42,5 | 50 | 50 | 50 | 0,65 | 2,5 |
| BSP3 | 350 | 1379 | 42,5 | 127,5 | 85 | 25 | 75 | 75 | 0,65 | 2,5 |
| BSC1 | 350 | 1379 | 127,5 | / | 127,5 | 75 | / | / | 0,65 | 2,5 |
| BSC2 | 350 | 1379 | 85 | / | 42,5 | 50 | / | / | 0,65 | 2,5 |
| BSC3 | 350 | 1379 | 42,5 | / | / | 25 | / | / | 0,65 | 2,5 |
| BSCP | 350 | 1379 | 170 | 42,5 | / | 50 | 25 | 25 | 0,65 | 2,5 |

BS0 : Béton de sable sans filler calcaire

BS1 : Béton de sable avec 10% de filler calcaire (du volume de sable)

BS2 : Béton de sable avec 12,5% de filler calcaire (du volume de sable)

BS3 : Béton de sable avec 15% de filler calcaire (du volume de sable)

BSP1 : Béton de sable avec 25% de la poudre plastique + 75% filler calcaire

BSP2 : Béton de sable avec 50% de la poudre plastique + 50% filler calcaire

BSP3 : Béton de sable avec 75% de la poudre plastique + 50 % filler calcaire.

BSC1 : Béton de sable avec 25% de la poudre caoutchouc+ 75% filler calcaire

BSC2 : Béton de sable avec 50% de la poudre caoutchouc+ 50% filler calcaire.

BSC3 : Béton de sable avec 75% de la poudre caoutchouc+ 25% filler calcaire

BSCP : Béton de sable avec 25% de la poudre caoutchouc+ 25% de la poudre plastique + 50% filler calcaire.

II.4 Les mélanges

En laboratoire, nous avons fabriqué trois types de béton de sable mélangé à du calcaire, du caoutchouc et du plastique, selon des proportions différentes pour chaque composition de béton.

Pour cette raison, nous avons classé la composition selon un tableau, et nous l'avons classée en trois compositions selon des proportions différentes :

La première composition : béton de sable à base de calcaire selon différentes proportions (10%, 12,5%, 15%) substituées du volume de sable dans la composition de base.

Sable = 1549 Kg/m³, Ciment = 350Kg/m³

Deuxième composition : béton de sable à base de la poudre de plastique selon différentes proportions (75%, 50%, 25%) substituées du volume de filler calcaire de la composition optimale (BSF1)

Troisième composition : béton de sable à base de la poudre de caoutchouc selon différentes proportions (75%, 50%, 25%) substituées du volume de filler calcaire de la composition optimale (BSF1)

Quatrième composition : béton de sable mélangé entre plastique et caoutchouc, malaxé selon différentes proportions (25% plastique et 25% caoutchouc).

II.5 Essais réalisés sur béton

II.5.1 Etat frais (ouvrabilité)

L'essai qui contrôle l'ouvrabilité est l'essai d'étalement selon la norme EN 12-358 La conduite de l'essai :

- Humecter la table (**Figure II.2**); y placer le moule tronconique.
- Remplir le moule de béton en 2 couches seulement. Nettoyer la surface libre de la table ; ôter le moule.
- Imprimer (rotation régulière) 15 secousses en 15 secondes.
- Il s'est produit un étalement : mesurer le nouveau diamètre D.

- En déduire le pourcentage d'étalement
- Il y a eu une extension : évaluer le nouveau diamètre D.
- En calculant le taux d'expansion : $\varepsilon\% = \left(\frac{D-d}{d}\right) \times 100$.

Evaluation de l'ouvrabilité selon le pourcentage d'étalement (Tableau II.7).

Tableau II.7 valeurs usuelles d'étalement

| Etalement (%) | Ouvrabilité |
|---------------|-------------|
| 10 à 30 | Très ferme |
| 30 à 60 | Ferme |
| 60 à 80 | Normal |
| 80 à 100 | Mou |
| Plus 100 | Très mou |



Figure II.3 Table d'étalement

II.5.2 Essai sur béton durci

II.5.2.a La Résistance mécanique à la compression : (NF EN 196-1)

La caractérisation du comportement en compression est effectuée sur des éprouvettes demi prismatiques de (4X4X16 cm³) mûries à l'eau, conformément à la norme NFP18-406. Les résultats de la résistance à la compression sont obtenus à l'âge de 28 jours. Chaque valeur de résistance est la moyenne de trois essais de compression par échéance et par matériau (**Figure II.4**). La résistance à la compression est donnée par la formule :

La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = F_c / S \text{ (MPa)}$$



Figure II.4 : Appareil d'essai de compression

F_c : la charge appliquée (KN)

S : surface de contact (mm^2)

II.5.2.b Résistance à la traction par flexion :(NF EN 12390-5)

On évalue la résistance mécanique à la traction par flexion à trois points (Figure II.5) en utilisant des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, conformément à la norme NF EN 12390-5. On obtient les résultats de la résistance à la flexion au bout de 28 jours. Chaque valeur de résistance correspond à la moyenne de trois essais effectués par échéance et par matériau.

Il est possible de calculer la résistance à la flexion en utilisant l'équation suivante :

$$RT = \frac{3}{2} \times \frac{FL}{bd^2}$$

L : est l'écartement entre les rouleaux d'appui, en millimètres.

F : la charge maximale appliquée, en newtons.

b, d : sont les dimensions latérales de l'éprouvette, en millimètres (mm)



Figure II.5 :Appareil de traction par flexion.

II.5.3 Propriétés physique

II.5.3. a La masse volumique

La densité, appelée masse volumique, est une caractéristique physique des corps qui exprime la relation entre le volume unitaire et la masse unitaire d'une substance ou d'un corps. La masse volumique d'un corps est égale à sa masse totale divisée par son volume total et est donnée par la relation : $M_v = M/V$

M : La masse totale

V : Le volume total.

La masse est déterminée par des pesées de l'éprouvette (4x4x16) cm

Le volume est déterminé par mesures des dimensions de l'éprouvette (4x4x16) cm à l'aide du pied de coulis

II.5.3.b Vitesse du son (Ultrasonique)

Le principe de cette méthode, appelée essai aux ultrasons, est de déterminer le temps nécessaire pour que les ondes longitudinales (de compression) se propagent à une distance donnée, et donc on obtient la vitesse de propagation de cette onde dans le béton (Figure II.6).



Figure II.6 : Instrument de mesure la vitesse du son dans le béton

La qualité du béton est déterminée selon l'importance de vitesse (Tableau II.8).

Tableau II.8 Evaluation de la qualité du béton en fonction de vitesse de son

| Qualité | Vitesse de propagation (m/s) |
|---------------|------------------------------|
| Excellente | Supérieur à 4200 |
| Bonne | 3700 - 4200 |
| Douteuse | 3200 - 3700 |
| Mauvaise | 2500 - 3200 |
| Très mauvaise | Inférieure à 2500 |

Le module d'élasticité dynamique peut être déterminé par l'équation :

$$E_d = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \gamma' V^2$$

γ' : masse volumique du béton (expérimentale)

ν : 0.2 (coefficient de Poisson)

V : vitesse du son [Km/s]

II.5.3.c Absorption totale

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

$$A\% = \frac{M_h - M_s}{P_s} \times 100$$

Mh : la masse humide

MS : la masse sèche

II.6 Malaxage et conservation des éprouvettes :

Le malaxage a fait selon les étapes suivantes :

- Malaxage à sec des constituants (ciment+sable+filler)
- Ajout des particules de plastique et/ ou caoutchouc
- Malaxage l'ajout de l'eau de gâchage +malaxage
- Introduction de l'adjuvant mélangé dans un 1/3 de l'eau de gâchage restant
- Malaxage jusqu'à l'homogénéisation du mélange

Le malaxage est fait dans un malaxeur à mortier a été utilisée pour les éprouvettes de dimensions (4x4x16) cm.



Figure II. 7 Malaxeur à mortier

On a fait quatre (4) compositions différente du béton de sable et pour chaque une et on a confectionné neuf éprouvettes pour chaque composition, figure(II.8). Les éprouvettes ont été coulées dans des moules préalablement huilés, le béton frais est placé en deux couches vibrées pendant 10 secondes à l'aide de la table vibrante. Une fois le moule est rempli, le surplus du béton a été arasé et la surface a été égalisée à la truelle.



Figure II. 8 épreuves confectionnées

Les étapes de conservation des épreuves sont les suivantes :

- La première étape consiste à maintenir les épreuves dans leur moule pendant les 24 premières heures, après avoir été recouvertes d'un tissu de nylon plaque sur la face libre afin d'éviter leur perte de liquidité. Les épreuves sont détruites après 24 heures.
- Dans la seconde étape, on procède à la conservation en immergeant les épreuves dans un bac de conservation galvanisé rempli d'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ afin de maximiser l'hydratation (Figure II.9).



Figure II.9: Conservation des épreuves

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, une présentation des caractéristiques des matériaux utilisés dans notre projet ainsi que des procédures expérimentales ont été présentées, ce qui nous permettra d'analyser plus efficacement les résultats et de mieux comprendre le comportement des bétons de sable.

Nous avons effectué des essais pendant notre recherche afin d'évaluer les principales caractéristiques des mélanges fabriqués.

Chapitre III

Présentation et discussion des résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés sur plusieurs séries de bétons de sable, qui ont été fabriqués en incorporant la poudre de plastique et le caoutchouc comme substitution du calcaire. Ces essais ont été effectués en laboratoire selon un programme expérimental détaillé dans le deuxième chapitre de cette étude.

L'objectif principal de ce travail est de comparer les différents types de bétons de sable réalisés avec les matériaux mentionnés ci-dessus par rapport au béton de référence. Ce dernier est un béton de sable classique contenant du calcaire, pouvant être substitué partiellement par du caoutchouc ou du plastique selon des proportions spécifiques de la composition de béton à fabriquer (75 %, 50 %, 25 %).

Les essais réalisés sur les divers mélanges sont divisés en deux parties distinctes :

1. Essais à l'état frais : Ils évaluent la maniabilité du béton, c'est-à-dire sa facilité de mise en œuvre et d'application.

2. Essais à l'état durci : Ils mesurent les propriétés mécaniques et physiques du béton après durcissement, comprenant notamment :

- Résistance à la compression
- Résistance à la flexion
- Vitesse de propagation du son
- Masse volumique
- Absorption totale d'eau

III.2 Propriété physique des bétons de sable à l'état Frais :

III.2.1 L'ouvrabilité

D'après la figure III.1 présentée ci-dessous, on remarque l'effet améliorant du filler calcaire de l'étalement à un pourcentage de 10% donné par la composante BSF1, au-delà ce pourcentage ; on a une diminution de l'étalement qui présente une ouvrabilité moins importante. Le choix de la composante optimale été opté pour BSF1 qui sera le béton de référence dans tout les étapes qui suivent.

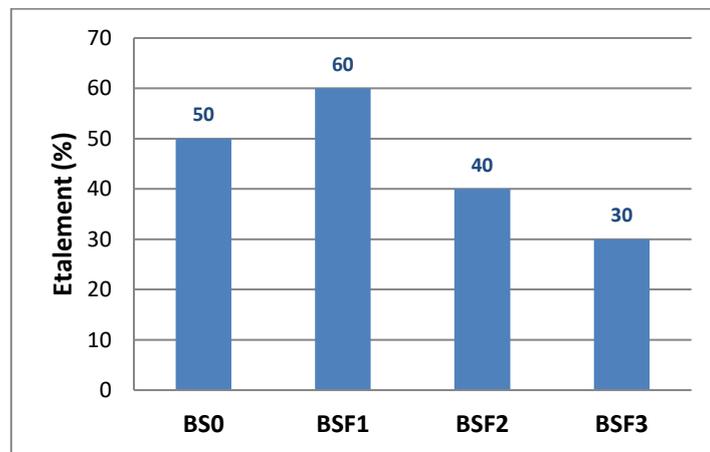


Figure III.1 : Effet des filler calcaire sur l'étalement

III.2.1.2 Béton de sable avec la poudre de plastique et / ou caoutchouc

Dans cette partie la comparaison se fait avec les trois bétons ensemble avec la poudre de plastique et caoutchouc contre le béton de référence BSF1 (10% de filler calcaire).

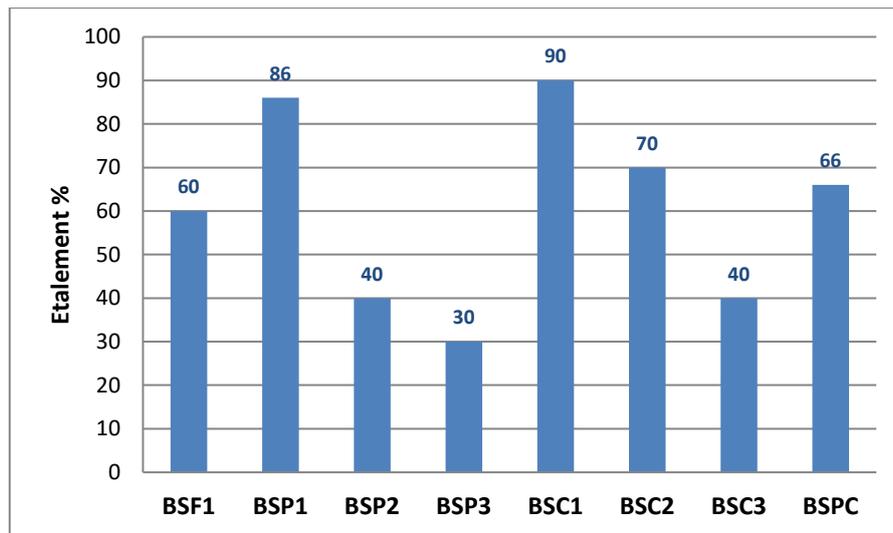


Figure III.2: Effet des poudres plastique/ caoutchouc sur l'étalement

D'après la figure III.2, on remarque une augmentation de l'étalement avec les deux types de poudre (PL et CT) à un pourcentage de 25%. Cette augmentation est de 26% et de 30% donnés par BSP1 et BSC1 successivement. Au-delà, une diminution est remarquable de l'ouvrabilité.

Un étalement de 66% présente une ouvrabilité normale correspondant à un béton plastique est donnée par BSPC (25% PL+25% CT + 50% calcaire), ce qui présente une augmentation de 6% par rapport au témoin.

III.3 Propriétés mécaniques des bétons de sable à l'état durci

III.3.1 Résistance mécanique à la compression

La résistance à la compression est déterminée à l'âge de 28 jours pour tous les bétons. La figure III.3 montre les trois mélanges qui sont dans le même palier de résistance à la compression ; avec une différence légère d'une moyenne de 1 MPa qui peut être considérée comme négligeable. Par contre ; on remarque une amélioration de la résistance par rapport au béton témoin (BS0) avec le filler calcaire. La composante BSF1 reste l'idéale comme béton de référence.

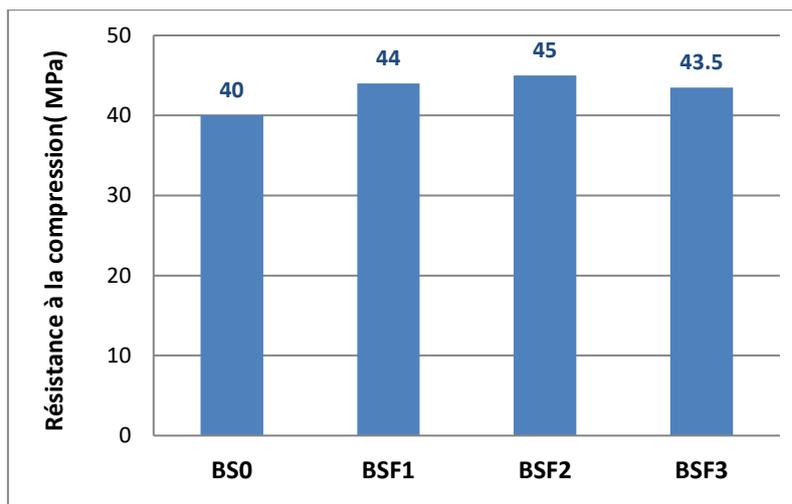


Figure III.3: Effet des filler calcaire sur la résistance à la compression

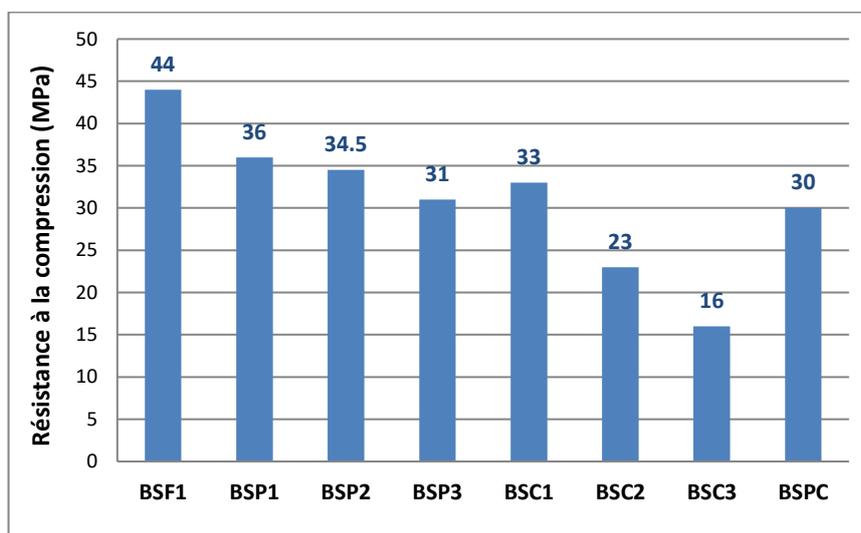


Figure III.4: Effet de la poudre plastique/ caoutchouc sur la résistance à la compression

- D'après la figure III.4, on remarque une diminution de la résistance à la compression en fonction de l'ajout de la poudre plastique et caoutchouc. Les meilleures valeurs sont données par BSP1 et BSC1 à 25% de la poudre (PL et CT). Avec la poudre plastique on a enregistré les plus importantes résistances. La plus faible valeur constatée est de 16 MPa donnée par BS3 (75 de caoutchouc) qui présente une diminution de 63,6 MPa par rapport au BSF1.

Avec la composition BSFC (25% PL+25 CT + 50% calcaire) on a obtenu une résistance inférieure à celle du béton de référence BSF1 égale 32% et de 9 % par rapport au BSC1 et de 13% par rapport au BSP1.

III.3.2 Résistance mécanique à la flexion

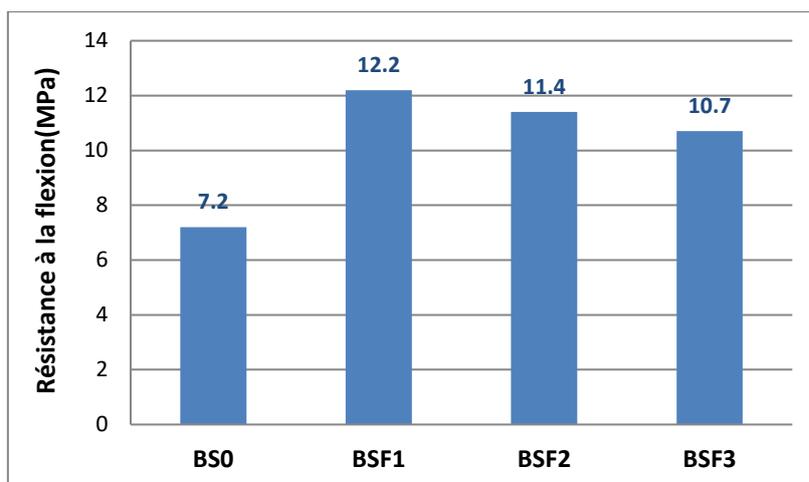


Figure III.5 : Effet des filler calcaire sur la résistance à la flexion

On remarque d'après l'histogramme présenté sur la figure III.5 une amélioration de la résistance à la flexion par rapport BS0 béton de référence en fonction de du filler calcaire, mais la meilleure résistance est obtenue par BSF1 avec 10% de filler calcaire.

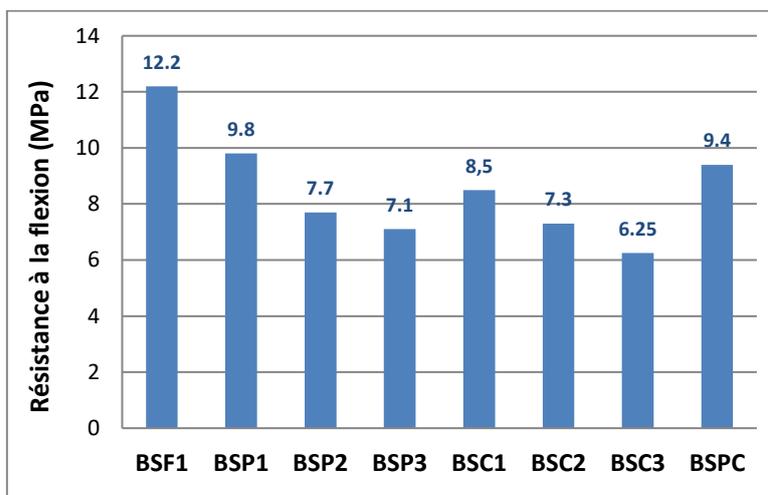


Figure III.6 : Effet de la poudre plastique/ caoutchouc sur la résistance à la flexion

La figure III.6 présente les résultats de la résistance à la flexion des bétons de sable avec l'ajout plastique et caoutchouc. On remarque des résistances inférieures à celle du béton de référence BSF1 ; mais les meilleures valeurs sont données par les bétons avec poudre plastique ; la plus importante résistance de 9.8 MPa est enregistré par le béton avec 25% de plastique, ensuite le béton au mélange (25% PL+25 CT + 50% calcaire) a noté une résistance importante de 9.4 MPa.

On peut dire qu'avec la poudre plastique on obtient des résistances plus importantes que celles du caoutchouc.

III.3.2 Vitesse des ondes soniques

La vitesse des ondes sonique dans le béton exprime sa compacité, son homogénéité ainsi que sa qualité. L'essai a été appliqué à l'âge de 28 jours sur les éprouvettes avant l'essai d'écrasement.

D'après la figure III.7 présentée ci-dessous, qui montre l'effet du filler calcaire sur la qualité du béton de sable. On remarque, à partir d'un béton de qualité douteuse, le béton de sable témoin sans filler calcaire (BSO) à un béton de sable avec une bonne qualité, d'où on constate un effet améliorant des filler calcaire dans la composante. La meilleure valeur est obtenue par BSF1 (10% de FC), notant une vitesse de 4050 m/s et une augmentation de 10,4% par rapport au témoin.

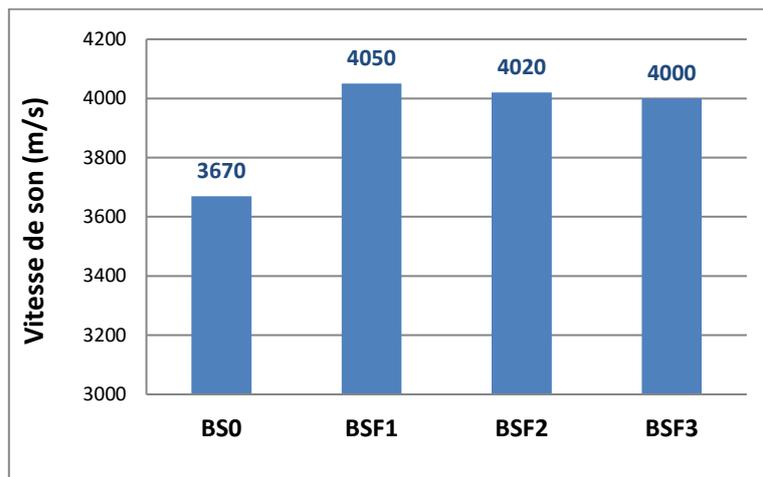


Figure III.7: Effet des filler calcaire sur la vitesse de son

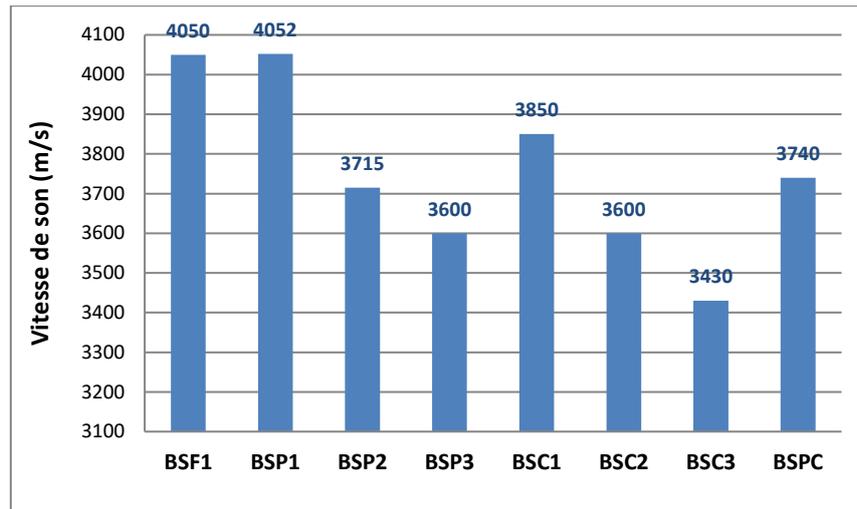


Figure III.8 : Effet de la poudre plastique/ caoutchouc sur la vitesse de son

L'effet de la variation du dosage poudre plastique et/ ou caoutchouc est présenté sur la figure III.8. D'après cette figure la variation de la poudre de plastique ou du caoutchouc, présente une diminution de la vitesse de son. La vitesse maximale est atteinte avec une proportion de 25% de la poudre plastique (BSP1), qui correspond à 4052m/s. Il convient également de noter que cette valeur est proche de celle du béton témoin avec une différence négligeable de 0,2% les cinq composantes (BSF1, BSP1, BSP2, BSC1 et BSPC) y compris le béton de référence ont montré une bonne qualité devant une qualité douteuse avec les autres bétons (BSP3, BSC2, BSC3).

On constate qu'à 25% de PL et CT on peut avoir un béton de bonne qualité.

III.4 Propriétés physiques des bétons de sable à l'état durci

III.4.1 La masse volumique

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. La figure III.9 illustre l'augmentation de la masse volumique en fonction de l'ajout de filler calcaire qui signifie des bétons de sable plus dense. On enregistre une augmentation de masse de 6,4% par rapport au béton de référence donnée par la composante BSF3 (15% FC). On constate des résultats conformes aux celles obtenues avec la vitesse des ondes soniques dans les bétons de sable à base filler calcaire.

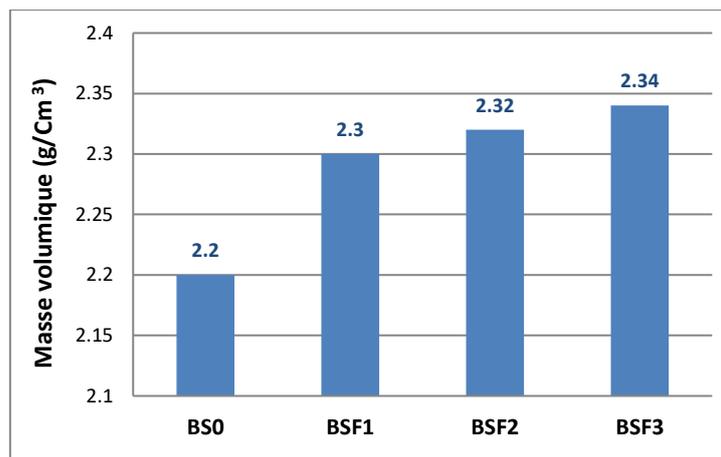


Figure III.9 : Effet des filler calcaire sur la masse volumique

D'après la figure III.10, on remarque une diminution des masses volumique en fonction de l'ajout de la poudre plastique et du caoutchouc. Le béton de sable incorporant de la poudre plastique et/ ou caoutchouc en substitution des fillers de calcaire a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton de référence.

On a une diminution de 10,4% de masse avec BSP3 (75% PL) par rapport au BSF1 béton de référence. Par contre les bétons préparés avec le caoutchouc ont montré une masse stable, malgré la variation du pourcentage de ce dernier. On a enregistré une diminution de masse d'une moyenne de 7,5% par rapport au béton témoin avec les bétons de sable confectionnés avec la poudre de caoutchouc. Aussi, une diminution moins importante observée par le béton de sable BSPC incorporant 25% du plastique et 25% du caoutchouc en substitution des fillers de calcaire ; cette diminution est de 6% par rapport au BSF1.

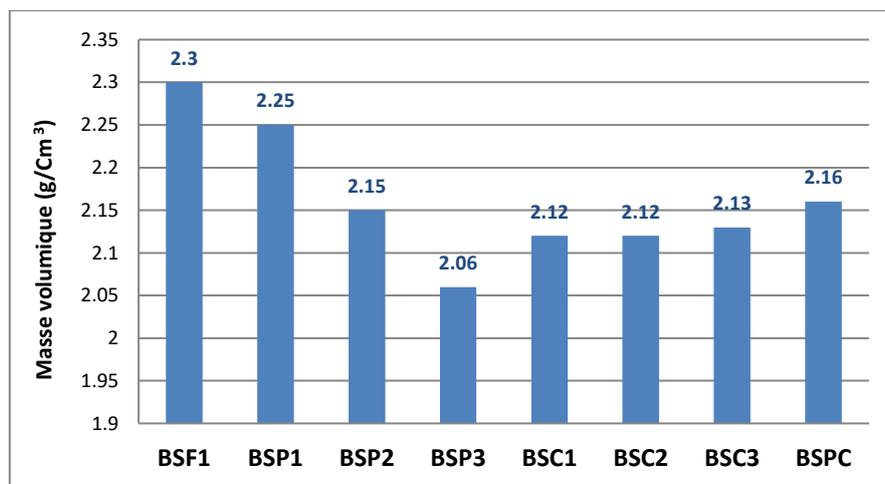


Figure III.10: Effet de la poudre plastique/ caoutchouc sur la masse volumique

On constate l'influence de substitution du filler calcaire par la poudre plastique et/ou caoutchouc sur la densité du béton de sable. Mais l'effet des fines de plastique est plus significatif.

III.4.2 l'Absorption d'eau totale

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

La figure III.11 montre l'effet du filler calcaire sur l'absorption totale d'eau, d'où on remarque une diminution de l'absorption en fonction de l'ajout du filler calcaire.

Une diminution est remarquable de 12,8% avec BSF3 par rapport au béton de référence.

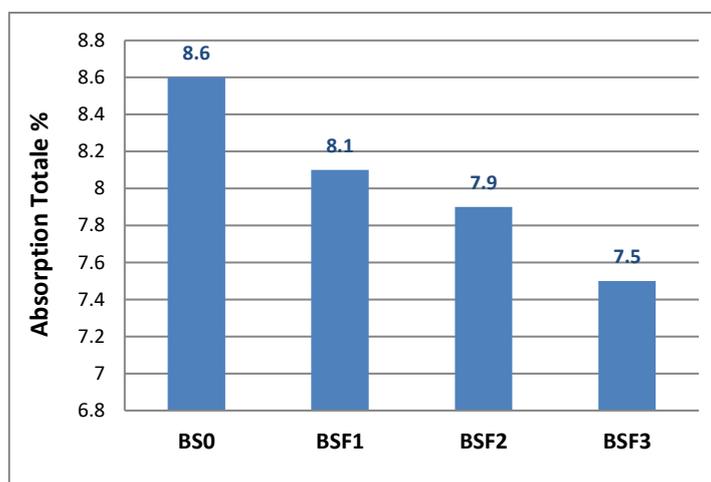


Figure III.11: Effet des filler calcaire sur l'absorption d'eau totale

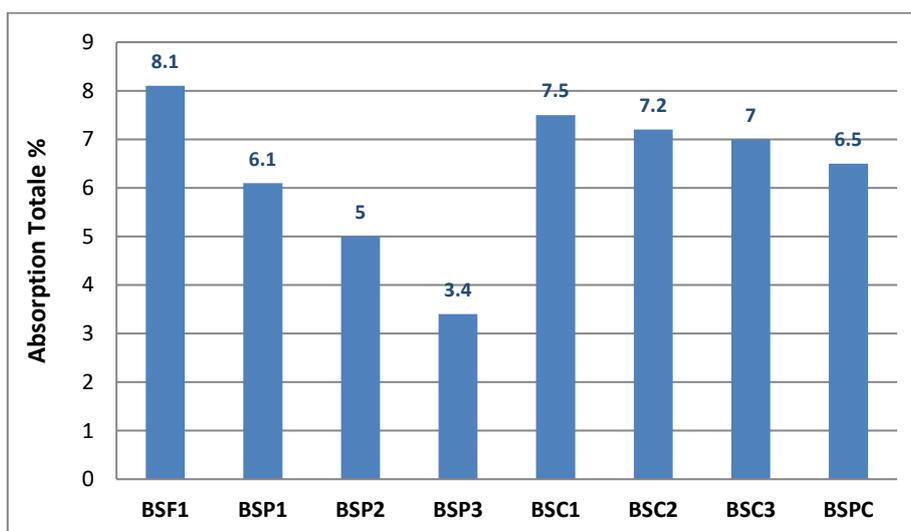


Figure III.12 : Effet de la poudre plastique/ caoutchouc sur l'absorption d'eau totale

La figure (III.12) illustre la variation de l'absorption d'eau en fonction des poudres plastiques et caoutchouc. On remarque un effet important de ces derniers sur la capacité d'absorption d'eau. Une diminution est observée pour les deux types de bétons avec plastique et caoutchouc en fonction des pourcentages de substitutions (25%, 50% et 75%) de filler calcaire.

La plus faible valeur d'absorption est donnée par la composition BSP3 (75% PL) qui a enregistré une diminution de 58% par rapport au béton de référence BSF1.

Les bétons à base de caoutchouc ont présenté une absorption plus stable en fonction de l'ajout de caoutchouc par rapport aux compositions à base de la poudre de plastique. Comme, on observe une diminution moins importante de l'absorption d'eau avec BSC3 (75% CT) égale à 14% par rapport au béton témoin BSF1 contre une augmentation remarquable de 105% par rapport BSP3 de le même pourcentage de substitution (75%PL) de filler calcaire. D'où on constate l'effet significatif de la poudre plastique sur l'absorption par rapport à la poudre caoutchouc dans la composition du béton de sable.

III.5 Conclusion

Une étude expérimentale approfondie a été réalisée pour évaluer l'influence de la poudre de plastique et du caoutchouc en tant que substituts du filler calcaire sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons de sable. Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats expérimentaux :

- Un effet améliorant du filler calcaire sur l'étalement a été observé avec un pourcentage de 10 %, de la composition BSF1.
- Le filler calcaire contribue à la résistance à la compression. Le choix s'est porté sur la composition BSF1 comme référence idéale, car elle a présenté une ouvrabilité normale (un béton plastique) et une résistance élevée de 45 MPa avec une substitution minimale de 10 % de sable.
- Une diminution notable de la résistance à la compression a été observée avec les compositions contenant de la poudre de plastique et du caoutchouc. La valeur la plus basse enregistrée est de 16 MPa, obtenue par BS3 (75 % de caoutchouc), ce qui représente une diminution de 63,6 % par rapport à BSF1.
- Les meilleures valeurs de résistance à la flexion sont enregistrées par les deux bétons de sable BSP1 (25% PL) et BSPC (25% PL +25%CT).
- L'incorporation de 50 % de poudre de plastique a permis d'obtenir des bétons de sable (BSP1, BSP2, et PSPC) homogènes et de bonne qualité.

- L'incorporation de plus de 25 % de caoutchouc entraîne des bétons de sable de qualité douteuse.
- L'incorporation de la poudre de plastique et du caoutchouc entraîne une diminution de la masse volumique. La valeur la plus basse est obtenue avec un pourcentage de 75 % de poudre plastique.
- La plus faible valeur d'absorption est donnée par la composition BSP3 (75% PL) qui a enregistré une diminution de 58% par rapport au béton de référence BSF1

Conclusion générale

Vers un béton de sable plus léger, ayant un poids inférieur à celui d'un béton de sable ordinaire, l'incorporation de granulats issus de déchets plastiques et des pneus usagés comme substituts du sable et du filler présente un intérêt considérable.

Notre objectif était de fabriquer un béton de sable en utilisant des granulats légers provenant de déchets industriels, et ainsi valoriser ce matériau comme une option économique et écologique.

Ce béton a été soumis à des essais de caractérisation physique et mécanique. L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- Une substitution de 10 % de filler calcaire par du sable concassé améliore la compacité du béton de sable à l'état durci et facilite sa mise en œuvre à l'état frais.
- L'incorporation de 25% de la poudre plastique et de la poudre du caoutchouc augmente le taux d'étalement du béton de sable à l'état frais.
- La poudre plastique et caoutchouc diminue la résistance mécanique à la compression des bétons de sable et leurs densités.
- Une substitution de 25 % de la poudre plastique par le filler calcaire conduit des résistances mécaniques à la flexion acceptables.
- L'incorporation de 50 % de la poudre plastique permet d'obtenir des bétons de sable homogènes et de bonne qualité.
- L'incorporation de la poudre caoutchouc résulte des bétons de sable de qualité douteuse.
- Les poudres plastiques et caoutchouc contribuent à la diminution de la masse volumique des bétons de sable
- L'incorporation de 75% de la poudre de plastique contribue à la diminution de l'absorption totale d'eau.

- À un taux de 25 % de poudre plastique, une amélioration appréciable des caractéristiques physiques du béton de sable a été observée.
- La poudre plastique a bien contribué à améliorer la qualité du béton, notamment sa masse volumique et son absorption d'eau, ce qui est contraire aux effets du caoutchouc.

Références bibliographiques

A.BENAISSA, P.MORLIER, V.TRAM " Le béton de sable un matériau non fissurant", Algérie Equipement

A. BENAZZOUK, O .DOUZANE, M. QUENEDEC " Valorisation de déchets de caoutchouc dans les matériaux de construction : cas d'un composite cimentaire cellulaire" université de Picardie jules verne, March 2015

A.M. NEVILIE, 2000, propriétés des bétons, édition EYROLLES, Paris, France.

C.E.B.T.P – Synthèse des connaissances du béton de sable, opération 52G 119
De décembre 1986

GADRI. Karima, "contribution à l'étude d'un béton de sable avec fibres et résine destine pour la réparation mince des structures", Thèse de magister, université Mohamed Khider de Biskra, Juillet 2007

GADRI. Karima, ABDEHAMID. Guettala "étude de l'adaptation d'un béton de sable comme matériaux de réparation associé à un substrat en béton ordinaire" université Mohamed Khider de Biskra, Algérie 2014

Khady. NDIAYE "Optimisation des formulations des bétons de sable" mémoire d'ingénieure université cheikh ANTA Diop école polytechnique de thés – Juillet 1993

Mr. K. HAMADACHE" béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc" projet de fin d'étude, Algérie ,2005.

Sablocrete, Bétons de sable, Projet national de recherche-développement. France, Paris : Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 1994.

S.rezig "Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux.", mémoire de magister, université Med Kheider , Biskra (2012).

K.GADRI, "Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable", mémoire de doctorat, université Med Kheider, Biskra (2018).

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

Ben Amara. (2002). « Formulation et comportement d'un béton de sable de la région de Biskra renforcé de fibre métallique ». *mémoire de magister*. Algérie: Université de Annaba,.