

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Oum El Bouaghi



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de : **Génie Civil**

Spécialité : **Génie Civil**

Option : **Matériaux de Construction**

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

Présentée par:

KHELAIFA Hamad

Etude de l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc (issus de déchets) sur le comportement des bétons de sable (de dunes) Autoplaçant et compactés

Devant le jury

Pr. Ferhoune Nouredine	Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi	Président
Pr. Boudaoud Zeineddine	Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi	Rapporteur
Pr. Benouis A/ Halim	Université 08 Mai 1945 Guelma	Co-Rapporteur
Pr. Berouel Ahmed	Université Frères Mentouri, Constantine 1	Examineur
Pr. Benmalek Med Larbi	Université 08 Mai 1945 Guelma	Examineur

2021

Remerciements

Je tiens à remercier le DIEU miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadreurs ;

M. Boudaoud Zeineddine, Professeur à l'Université d'Oum El Bouaghi, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour son aide, sa disponibilité, sa confiance et de ses conseils pratiques.

M. Benouis A/Halim, Professeur à l'Université de Guelma, à qui j'exprime ma profonde pour son aide, sa disponibilité, ses conseils précieux et constants.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur Farhoune Noureddine, Professeur à l'Université d'Oum El Bouaghi pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Mes plus vives grâtes vont à Messieurs Beroual Ahmed Professeur à l'Université Constantine 1, Benmalek Mohamed Larbi Professeur à l'Université de 08 Mai 1945 Guelma pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'être examinateurs et membres du jury.

Mes plus vifs remerciements au personnel du laboratoire (LGCH) de l'Université Guelma en particulier Monsieur Nouaouria Mohamed Salah pour les moyens mis à disposition.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mes parents, ma femme, mes frères et mes sœurs pour leur soutien pendant la préparation de cette thèse.

Enfin, J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'évolution de la technologie routière et la pénurie de ressources en gravier ont motivé la proposition d'un nouveau matériau pour la construction routière. À cet effet, il est opportun d'étudier la possibilité de valorisation les sables de dunes qui existent en quantité inépuisable dans le sud du pays et la réutilisation des déchets de caoutchouc dans la fabrication du béton pour conserver les ressources naturelles et protéger l'environnement.

Cette étude vise à valoriser les sables de dunes et les déchets de caoutchouc sous forme de granulats dans les mélanges des bétons de sable autoplaçant et compactés.

Pour cet objectif, nous avons utilisé trois substitutions volumétriques (10, 20, 30%) du sable dans la formulation du béton de sable autoplaçant. Nous avons également utilisé quatre substitutions volumétriques (10, 30, 40, 50%) du sable et quatre énergies de compactage pour améliorer les caractéristiques mécaniques du béton de sable compacté avec de granulats de caoutchouc. Ces bétons sont caractérisés à l'état frais et durci.

L'incorporation de granulats de caoutchouc diminue les résistances mécaniques des bétons des mélanges testés. Cette diminution de la résistance mécanique pourrait être atténuée en augmentant l'énergie de compactage.

Mots clés : Béton de sable, Béton de sable auto-plaçant, Déchets de caoutchouc, Béton de sable compacté, Énergie proctor.

Abstract

The evolution of road infrastructures and shortage of gravel resources motivated the proposal of new materials for road construction. Therefore, it is appropriate to study the possibility of valorization of dune sand which exist in inexhaustible quantities in the south of the country, and the reuse of rubber waste in the manufacture of concrete to conserve natural resources and protect the environment.

This study aims to valorize dune sand and rubber waste as aggregates in self-compacting and compacted sand concrete mixes.

For this purpose, we have used three volumetric substitutions of sand (10, 20, 30%) in the formulation of self-compacting sand concrete .We have also used four volumetric substitutions of the sand (10, 30, 40 , 50%) and four compaction energies to improve the mechanical characteristics of the compacted sand concrete with rubber aggregates. These concretes are characterized in the fresh and hardened state.

The incorporation of rubber aggregates decreased the mechanical resistances of the concretes of the tested mixes. This diminution of mechanical resistance could be attenuated by increasing in the energy of compaction.

Key words: Sand concrete, Self-compacting sand concrete, Rubber aggregates, Compacted sand concrete, Proctor energy.

ملخص

دفع تطور تكنولوجيا الطرق وندرة موارد الحصى إلى إقتراح مادة جديدة لبناء الطرق. لهذه الغاية ، من المناسب دراسة إمكانية تثمين رمال الكثبان الرملية الموجودة بكميات هائلة في جنوب البلاد وإعادة إستخدام نفايات المطاط في صناعة الخرسانة للحفاظ على الموارد الطبيعية وحماية البيئة.

تهدف هذه الدراسة إلى إمكانية تثمين رمال الكثبان الرملية والنفايات المطاطية على شكل حبيبات في خلأط من الخرسانة الرملية الذاتية القوية و المدكوكة.

لهذا الغرض ، إستخدمنا ثلاثة بدائل حجمية (10 ، 20 ، 30 %) من الرمل في تركيبة الخرسانة الرملية الذاتية القوية. إستخدمنا أيضاً أربعة بدائل حجمية (10 ، 30 ، 40 ، 50%) من الرمل وأربعة طاقات ضغط لتحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية المدكوكة مع حبيبات المطاط. هذه الخرسانات حددت خصائصها في الحالة الطازجة والصلبة.

يقال هذا الدمج من حبيبات المطاط من القوة الميكانيكية لخرسانة الخلطات المختبرة. يمكن تخفيف هذا الإنخفاض في القوة الميكانيكية عن طريق زيادة طاقة الضغط.

الكلمات المفتاحية: خرسانة رملية ، خرسانة رملية ذاتية القوية ، نفايات المطاط ، خرسانة رملية مدكوكة ، طاقة بروكتور.

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1 : Phare de Port-Saïd [1].	05
Figure 1.2 : Métro de Saint-Pétersbourg [1].	05
Figure 1.3 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [1].	12
Figure 1.4 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable [1].	13
Figure 1.5 : Maniabilité en fonction du module de finesse du sable Influence de la teneur en fine [1].	15
Figure 1.6 : Evolution de la porosité en fonction du module de finesse des sables.	16
Figure 1.7 : Effet de la granularité sur la résistance [1].	18
Figure 1.8 : Fluage total [1].	19
Figure 1.9 : Influence de la résistance sur le fluage total [1].	20

Chapitre II

Figure 2.1 : Mise en œuvre du BCR [20-21].	24
Figure 2.2 : Vue aérienne lors de la construction du revêtement à l'usine de papiers Domtar [19].	25
Figure 2.3 : Détermination du volume de pâte minimal [19].	28
Figure 2.4 : Relation entre le degré de compacité et les résistances (compression et flexion) [28].	30
Figure 2.5 : Exemple de l'évolution de la maniabilité dans le temps d'un mélange de BCR [19].	31
Figure 2.6 : Relation entre la masse volumique des BCR et le rapport V_p/V_{vc} [30].	31
Figure 2.7 : Coupe transversale schématique de la chaussée.	34
Figure 2.8 : Chaussées souples.	35
Figure 2.9 : Chaussées bitumineuses épaisses.	35

Figure 2.10 : Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.	35
Figure 2.11 : Chaussées à structure mixte.	36
Figure 2.12 : Chaussées à structure inverse.	36
Figure 2.13 : Dalles non goujonnées avec fondation.	37
Figure 2.14 : Dalles goujonnées avec fondation.	37
Figure 2.15 : Dalles sans fondation.	37
Figure 2.16 : Béton armé continu (1).	37
Figure 2.17 : Béton armé continu (2).	38

Chapitre III

Figure 3.1 : Granulats de caoutchouc (0/4mm).	46
Figure 3.2 : Poudrettes de caoutchouc (0/1mm).	46
Figure 3.3 : Courbes granulométriques du sable et des particules de caoutchouc.	47
Figure 3.4 : Lubrification des moules (4x4x16) cm ³ .	50
Figure 3.5 : Etalement au cône d'Abrams.	51
Figure 3.6 : Ecoulement à l'entonnoir (V-Funnel)	52
Figure 3.7 : Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre.	52
Figure 3.8 : Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³	53
Figure 3.9 : Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm ³ .	54
Figure 3.10 : Dispositif de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.	55
Figure 3.11 : Transformation des coordonnées réelles en coordonnées centrées réduites.	58
Figure 3.12 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences	61
Figure 3.13 : Domaine expérimental.	63
Figure 3.14 : Moule et marteau manuel de l'essai Proctor modifié.	65
Figure 3.15 : Compactage des éprouvettes cylindriques avec une dame CBR.	68
Figure 3.16 : Essai Vébé.	69
Figure 3.17 : Essai de compression.	70
Figure 3.18 : Essai de traction par fendage.	71

Chapitre IV

Figure 4.1 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à l'état frais de BSAP	75
Figure 4.2 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et l'étalement au cône d'Abrams de BSAP	75
Figure 4.3 : Relation entre le taux des poudrettes de caoutchouc et l'entonnoir V-Funnel de BSAP	76
Figure 4.4 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la teneur en air occlus de BSAP	77
Figure 4.5 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à sec de BSAP	78
Figure 4.6 : Résistance à la compression des bétons de sable autoplaçant (BSAP) à base des poudrettes de caoutchouc en fonction d'âge.	79
Figure 4.7 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la résistance à la compression à 28 jours de BSAP.	79
Figure 4.8 : Résistance à la traction par flexion des bétons de sable auto-plaçant (BSAP) à base des poudrettes de caoutchouc en fonction d'âge.	81
Figure 4.9 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la résistance à la traction par flexion à 28 jours de BSAP.	81
Figure 4.10 : Retrait en fonction d'âge de BSAP.	82
Figure 4.11 : Valeurs de l'absorption d'eau par capillaire en fonction du temps de BSAP	83

Chapitre V

Figure 5.1 : Courbes Proctor des bétons de sable compactés testés.	99
Figure 5.2 : Les teneurs des eaux optimales (Wopt) des mélanges testés.	100
Figure 5.3 : Résistance à la compression des bétons de sable compactés à base des granulats de caoutchouc en fonction d'âge et l'énergie de compactage.	100
Figure 5.4 : Effet des granulats de caoutchouc sur la masse volumique à l'état frais du BSC.	101
Figure 5.5 : Effet du caoutchouc sur la maniabilité du béton de sable compacté (BSC)	102
Figure 5.6 : Influence du pourcentage d'addition des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression.	103
Figure 5.7 : Perte de résistance à la compression par rapport au béton témoin (béton sans substitution et compacté avec la même énergie).	103

Figure 5.8 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression à 07 jours.	104
Figure 5.9 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression à 28 jours.	104
Figure 5.10 : Amélioration de la résistance à la compression par augmentation de l'énergie de compactage.	105
Figure 5.11 : Influence du pourcentage d'addition des granulats de caoutchouc sur la résistance à la traction par fendage.	107
Figure 5.12 : Perte de la résistance à la traction par rapport au béton témoin (Béton sans substitution et compacté avec la même énergie).	107
Figure 5.13 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction à 07 jours.	108
Figure 5.14 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction à 28 jours.	109
Figure 5.15 : Relation entre résistance à la traction par fendage et résistance à la compression.	109

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Caractéristiques des bétons suivant les classes de résistance.	39
Tableau 3.1 : Caractéristiques chimiques du ciment utilisé en (%).	44
Tableau 3.2 : Caractéristiques minéralogique du clinker en (%).	45
Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé.	45
Tableau 3.4 : Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé.	45
Tableau 3.5 : Caractéristiques physiques du Sable utilisé.	45
Tableau 3.6 : Caractéristiques physiques du superplastifiant utilisé.	47
Tableau 3.7 : Propositions des mélanges (1m^3).	49
Tableau 3.8 : Energie de compactage.	65
Tableau 3.9 : Mélanges du béton de sable compacté en première étape	66
Tableau 3.10 : Proportions des mélanges des bétons utilisés en première étape (1m^3)	66
Tableau 3.11 : Proportions des mélanges des bétons utilisés en deuxième étape (1m^3)	67
Tableau 4.1 : Résultats d'essais des plans d'expériences	84
Tableau 5.1 : Résistances à la compression des bétons de sable compactés	102
Tableau 5.2 : Résistances à la traction des bétons de sable compactés	106

Table des matières

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale 01

Chapitre I : Etat de l'art sur le béton de sable

I.1. Introduction 04

I.2. Historique 04

I.3. Utilisation du béton de sable 06

I.4.1 Les ciments 07

I.4.2 Les sables 07

I.4.3 Les adjuvants 07

I.4.4 L'eau 08

I.4.5 Autres ajouts 08

I.4.5.1 Les fibres 08

I.4.5.2 gravillons 08

I.4.5.3 Les colorant 08

I.5 Les béton de sable fluides 09

I.5.1 Les contexte des béton fluides (BSAP) 09

I.5.2 Principales caractéristiques des bétons de sable fluides	09
I.5.3 Domaines d'application des bétons de sable fluides	09
I.6 Formulation des bétons de sable	11
I.6.1 Méthodes théorique pour la formulation des bétons de sable	11
I.6.1.1 La compacité et les méthodes de formulations des bétons	11
I.6.1.2 Estimation du dosage en fines d'un béton de sable	11
I.6.1.3 Porosité et dosage en eau d'un béton de sable	12
I.6.1.4 Estimation du dosage en sable	14
I.6.2 Méthode expérimentale de formulation	14
I.6.2.1 Présentation générale de la méthode expérimentale	14
I.6.2.1 Les différentes étapes de la formulation	14
I.7 Propriétés des bétons de sables	15
I.7.1 Propriétés à l'état frais	15
I.7.1.1 Maniabilité	15
I.7.1.1.1 Effet des Fines	15
I.7.1.1.2 Effet de la granulométrie du sable	15
I.7.1.1.3 Effet du rapport E/C	16
I.7.1.2 La compacité	16
I.7.1.2.1 Effet de la granulométrie du sable	16
I.7.1.2.2 Effet des fines	17
I.7.2 Propriétés à l'état durci	17
I.7.2.1 Comportement mécanique	17
I.7.2.1.1 Effet des fines	17
I.7.2.1.2 Effet de la granulométrie du sable	17
I.7.2.1.3 Effet du rapport E/C	18
I.7.2.1.4 Module d'élasticité	18
I.7.2.1.5 Retrait	18
I.7.2.1.6 Fluage	19
I.7.2.1.7 Durabilité	20
I.7.2.1.8 Perméabilité	21

I.7.2.1.9 Microstructure et fissuration	21
I.8 Conclusion	21

Chapitre II : Etat de l'art sur le béton compacté au rouleau (BCR)

II.1. Introduction	23
II.2. Historique	24
II.3. Avantages et inconvénient du BCR	25
II.3.1 Avantages du BCR	25
II.3.2 Inconvénients du BCR	26
II.4. Constituants du BCR	26
II.4.1 Granulats	26
II.4.2 Liant	26
II.4.3 Adjuvant	26
II.4.3 Eau	27
II.5. Formulation d'un BCR	27
II.5.1 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité	27
II.5.2 Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique	28
II.5.3 Méthode du volume de pâte optimal	29
II.6. Compacité du BCR	29
II.7. Propriétés à l'état frais et durci du BCR	30
II.7.1 Maniabilité	30
II.7.2 Masse volumique	31
II.7.3 Résistance à la compression	31
II.7.4 Résistance à la flexion	32
II.8 Le retrait	32
II.9 Durabilité du BCR	33
II.9.1 Gel-dégel	33
II.10 Les différentes structures de chaussées	34
II.10.1 La structure de chaussée	34
II.10.2 Les différentes familles de chaussées	35
II.10.2.1 Chaussées souples	35

II.10.2.2 Chaussées bitumineuses épaisses	35
II.10.2.3 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	35
II.10.2.4 Chaussées à structure mixte	36
II.10.2.5 Chaussées à structure inverse	36
II.10.2.6 Les chaussées en béton de ciment	37
II.10.2.6.1 Dalles non goujonnées avec fondation	37
II.10.2.6.2 Dalles goujonnées avec fondation	37
II.10.2.6.3 Dalles sans fondation	37
II.10.2.6.4 Béton armé continu 1	37
II.10.2.6.5 Béton armé continu 2	38
II.10.3 Endommagement des différentes familles de chaussées	38
II.10.3.1 Les chaussées souples	38
II.10.3.1.1 Sollicitations dues au trafic	38
II.10.3.1.2 Influence des conditions d'environnement	38
II.10.3.2 Les chaussées en béton de ciment	39
II.10.3.2.1 Sollicitations dues au trafic	39
II.10.3.2.2 Influence des conditions d'environnement	39
II.10.4 Le béton de sable en construction routière	39
II.10.4.1 Classes de résistance des bétons de sable routiers	39
II.10.4.2 Chaussées en béton de sable	40
II.10.4.3 Les bétons de sables compactés pour chaussées	40
II.11 Conclusion	41

Chapitre III : Matériaux et Procédures Expérimentales

III.1 Introduction	44
III.2 Matériaux utilisés	44
III.2.1 Ciment	44
III.2.2 Sable	45
III.2.3 Caoutchouc	46
III.2.3.1 Granulats de caoutchouc (0/4mm)	46
III.2.3.2 Poudrettes de caoutchouc (0/1mm)	46

III.2.4 Adjuvant	47
III.2.5 Eau de gâchage	47
III.3 Formulation de béton de sable autoplaçant (BSAP)	48
III.3.1 Formulation de béton de sable autoplaçant (BSAP0)	48
III.3.1.1. Détermination du dosage en ciment	48
III.3.1.2. Détermination du dosage en eau	48
III.3.1.3. Détermination du dosage en superplastifiant	48
III.3.1.4. Détermination du volume de vides	48
III.3.1.5. Détermination du dosage en sable	48
III.4 Techniques expérimentales de BSAP	50
III.4.1 Malaxage	50
III.5 Caractéristiques de BSAP	51
III.5.1 A l'état frais	51
III.5.1.1 : Etalement au cône d'Abrams	51
III.5.1.2 : Ecoulement à l'entonnoir (V-Funnel)	51
III.5.1.3 : Teneur en air occlus	52
III.5.2 A l'état durci	53
III.5.2.1 La masse volumique à sec	53
III.5.2.2 Résistance à la traction par flexion	53
III.5.2.3 Résistance à la compression	54
III.5.2.4 Retrait	55
III.5.2.5 Absorption d'eau par capillarité	55
III.5.3 Méthode des plans d'expériences	56
III.5.3.1 Introduction	56
III.5.3.2 Définition	56
III.5.3.3 Terminologie	57
III.5.3.4 Conditions d'application des plans d'expériences	59
III.5.3.5 Avantages des plans d'expériences	60
III.5.3.6 Méthodologie des plans expérimentaux	60
III.5.3.7 Types de plans d'expériences	62

III.6 Formulation de béton de sable compacté (BSC)	64
III.6.1 Energie Proctor	65
III.6.2 Formulation de BSC en première partie	66
III.6.3 Formulation de BSC en deuxième partie	67
III.7 Techniques expérimentales de BSC	68
III.7.1 Malaxage	68
III.7.2 compactage	69
III.7.3 Démoulage	68
III.8 Caractéristiques de BSC	69
III.8.1 A l'état frais	69
III.8.1.1 La masse volumique à l'état frais	69
III.8.1.2 L'essai Vébé	69
III.8.2 A l'état durci	70
III.8.2.1 Résistance à la compression	70
III.8.2.2 Résistance à la traction par fendage	71
III.9 Conclusion	72

Chapitre IV : Effet des granulats caoutchouc sur les propriétés des bétons de sable Autoplaçant (BSAP)

IV.1 Introduction	74
IV.2 Caractéristiques de BSAP	74
IV.2.1 A l'état frais	74
IV.2.1.1 La masse volumique à l'état frais	74
IV.2.1.2 Affaissement au cône d'Abrams	75
IV.2.1.3 Ecoulement à l'entonnoir (V-Funnel)	76
IV.2.1.4 Teneur en air occlus	77
IV.2.2 A l'état durci	78
IV.2.2.1 La masse volumique à sec	78
IV.2.2.2 Résistance à la compression	79
IV.2.2.3 Résistance à la traction par flexion	81
IV.2.2.4 Le retrait	82

IV.2.2.5 Absorption d'eau par capillarité	83
IV.3 Mise en application des plans d'expériences	84
IV.3.1 Résultats des essais	84
IV.3.2 Analyses résultats d'essais	85
IV.3.2.1 Résistance à la compression	85
IV.3.2.2 Résistance à la traction	87
IV.3.2.3 Affaissement (Etalement)	90
IV.3.2.4 Retrait	92
IV.4 Conclusion	94

Chapitre V : Effet des granulats caoutchouc sur les propriétés des bétons de sable compactés (BSC)

V.1 Introduction	97
V.2 La première étape	97
V.2.1 Relation entre la teneur en eau et la densité sèche (γ_d, w)	97
V.2.2 Teneur en eau optimale (W_{opt})	98
V.2.3 La résistance à la compression	99
V.3 La deuxième étape	100
V.3.1 Les essais à l'état frais	100
V.3.1.1 La masse volumique à l'état frais	100
V.3.1.2 L'essais Vébé	101
V.3.2 Les essais à l'état durci	102
V.3.2.1 Résistance à la compression	102
V.3.2.2 Résistance à la traction par fendage	106
V.3.2.3 Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage	109
V.4 Conclusion	110
Conclusion générale et Perspectives	113
Références bibliographiques	118

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le gisement Algérien de pneumatiques usagés est important ; il est de l'ordre de millions de tonnes/an [1]. Mais les quantités valorisées sont très limitées. Il est donc opportun d'éviter que la valorisation ultérieure des pneus usagés provoque des atteintes indésirables à l'environnement, d'où l'idée de procéder à l'enfouissement de ce déchet dans du béton (gain en granulats minéraux).

Le désert du Sahara occupe plus des trois quarts du territoire de l'Algérie. Pour diverses raisons, notamment économiques, La tendance actuelle est d'adapter la technologie et la construction routières spécifiquement à l'utilisation de matériaux locaux, tels que le sable dune.

Le béton de sable est une sorte de béton fin différent du béton traditionnel. Son utilisation est la même que le béton traditionnel. Il est principalement composé de sable, de ciment, d'eau, de fine d'ajout et éventuellement des adjuvants.

L'utilisation du béton de sable compacté ou autoplaçant en corps de chaussée présente l'avantage d'un meilleur impact sur l'environnement. Cet avantage se manifeste à travers l'absorption des stocks gênants de sable des dunes et ce par leur utilisation en tant que matériau principal composant le béton de sable. L'utilisation du béton de sable présente un intérêt à la fois économique et environnemental.

Cette étude vise à étudier la substitution d'une partie des granulats traditionnels par des granulats caoutchouc et ce, dans les bétons autoplaçant et compactés. Elle comporte outre, une recherche bibliographique, des essais en laboratoires sur la faisabilité de cette nouvelle techniques et l'étude du comportement mécanique et rhéologique des bétons de l'étude. La technique des plans d'expériences a été employée en deuxième phase pour formuler les bétons de sable autoplaçant et la modélisation puis l'exploitation des résultats des essais.

La thèse s'articule sur cinq chapitres :

Après une introduction générale, nous exposons dans le premier chapitre une synthèse bibliographique sur les bétons de sables, leurs méthodes de formulation ainsi que leurs propriétés et leurs avantages.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur les bétons compactés, leurs méthodes de formulations, leurs propriétés mécaniques, leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés dans notre étude ainsi que la démarche expérimentale adoptés pour atteindre notre objectif.

Le quatrième chapitre, nous intéressons à l'étude de l'effet de caoutchouc sur les propriétés des bétons de sable autoplçant (BSAP) à l'état frais et durci, pour pouvoir analyser le comportement de ce matériau.

Le cinquième chapitre, nous traitons de l'effet de caoutchouc sur les propriétés des bétons de sable compactés (BSC), pour établir l'influence de ces caoutchoucs sur son comportement.

Enfin, nous terminerons par des conclusions générales suivie des perspectives de notre étude.

CHAPITRE I :

État de l'art sur le béton de sable

Chapitre I

État de l'art sur le béton de sable

I.1.Introduction

Le béton de sable est un béton fin, constitué d'un mélange de sable, de ciment, d'addition et d'eau ; pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques (adjuvants, fibres, colorants...etc.) peuvent être introduits dans cette composition de base. Il diffère du béton traditionnel en ce qu'il a une forte proportion de sable et l'absence ou un faible dosage de gravillons. Il se différencie également des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par sa destination. Tant que le rapport G/S reste inférieur à 0,7 (G = gravier ; S = sable), l'incorporation de gravier d/D permet l'appellation béton de sable [2].

Le béton de sable présente, parfois, des caractéristiques pas ou mal assurées par le béton ordinaire, telles que la pompabilité, la projection, l'homogénéité et l'aspect esthétique [2].

I.2.Historique du béton de sable

Le béton de sable est une technologie ancienne utilisée dans de nombreux pays. En France, le béton de sable trouve ses origines dans « le béton aggloméré » mis au point par F. Coignet vers la fin du XIX siècle. Ce matériau était alors constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau [2]. La maison Coignet à Saint Denis de type R+2 de long 60 m et hauteur 7 m avec un mur de soutènement constitue la première application de cette technique que l'on retrouvera aussi dans la réalisation d'un aqueduc de 40 km de la Vanne entre 1869 et 1872 à Moret-sur-Loing dans la forêt de Fontainebleau (France). Le mélange était constitué de 4 parts de sable de fontaine bleue, d'une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciments) et de 0.5 part d'eau (en poids), ce qui correspond approximativement à un dosage en liant de 400 kg/m³, plus proche de celui des bétons de sable que de mortier. Mis en service 1869, le phare Port-Saïd en Egypte (h = 52 m), il est également composé de sable des plages voisines et de chaux importée de France. (Figure 1.1) [2].



Figure 1.1 : Phare de Port-Saïd [2]

En 1970, dans le sud-ouest de la France. L'émergence de nouvelles problématiques liées au développement des granulats et à leur utilisation rationnelle, en même temps qu'une prise en compte des problèmes d'environnement sont à l'origine de l'intérêt à nouveau porté au béton de sable. Mais l'expérience n'est pas tout à fait la même que celle adoptée en CEI (Communauté des Etats indépendants soviétiques) [2]. Ce n'est plus un problème de broyer le ciment et une partie du sable ensemble et de vibrer vigoureusement pendant le processus de malaxage pour obtenir un béton avec la plus petite porosité, mais en ajoutant des fillers pour apporter une correction des particules dans le sable. La Figure 1.2 montre une carte du métro de Saint-Petersbourg avec une fine voûte en béton de sable hyperboloïde préfabriqué. [2].



Figure 1.2 : Métro de Saint-Petersbourg [2]

Des résultats partiels intéressants et disparates ont conduit le Centre Expérimental de recherche Etudes du Bâtiment et Travaux Publics en France (CEBTP), a établi en 1986 un document de synthèse sur le béton de sable hyper-compacté. La même année, l'Association CEBTP et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ont réalisé un autre document de synthèse des connaissances sur le béton de sable. A partir de l'élaboration de ces deux documents, un vaste programme de recherche et développement sur l'utilisation optimale du sable pour les applications de bétons de sable est lancé [2].

Ce dernier est confié à l'association SABLOCRETE. La recherche et le développement de l'utilisation du béton de sable organisé dans le cadre du projet national SABLOCRETE (France) a été initié dans le cadre d'affaires encouragé et cofinancé par le Ministère de l'Équipement, et le béton de sable a été géré par l'Association pour la Promotion et le Développement. Ils ont conduit à diverses applications touchant tous les domaines d'utilisation du béton : construction de routes, construction, préfabrication, pulvérisation, etc.... [2].

Le béton de sable est devenu l'objet de nombreuses études. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau. Dans ce cadre l'Algérie, en relation avec l'abondance de sable de dune disponible dans le sud, plusieurs recherches ont été établies (Pro. Benaissa, UST-Oran ; Pro. Bali, Ecole Polytech.; Pro.Benmalek, U-Guelma ; Pro.Bédérina , U-Laghouat ; Pro.Kriker, U-Ouargla.....) La première étude a été lancée par le CNERIB qui a engagé une série de travaux de recherche pour la valorisation de ce matériau.

I.3. Utilisation du béton de sable

L'utilisation de ces matériaux est à envisager dans différents domaines, et sous plusieurs formes [2], notamment dans les domaines du bâtiment, des travaux souterrains, des barrages, des chaussées routières, des travaux portuaires mais aussi en tant que bétons projetés.

- dans la préfabrication : murs architecturaux, mobiliers urbains, en bâtiment, voirie, etc.
- dans la projection : travaux de rénovation, ponts, égouts visitables, en bâtiments etc.
- comme béton de sable coulé : dans les routes, autoroutes, aérodromes, en bâtiment, etc.

Toutefois, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en béton de sable. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix [2].

I.4. Composition des bétons de sable

Le béton de sable a fait l'objet d'une norme française NF P 18-500 [3] ; c'est un béton fin constitué par mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; Outre ces composants de base, le béton de sable comporte habituellement un (ou plusieurs) adjuvant.

I.4.1 Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P15-301 [4]. Le choix du ciment se fait en fonction de son niveau de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de sa corrosivité environnementale et plus généralement de la composition du béton et de son utilisation envisagée. Les dosages en ciment sont proches des bétons ordinaires (300 à 400kg/m³) [5].

I.4.2 Les sables

Par sables, on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301 [6,7] 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.

Aucune norme granulométrique préalable n'est requise pour fabriquer du béton de sable.: on peut aussi bien utiliser un sable fin (comme le sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un 0/d de concassage [2].

I.4.3 Les ajouts

Ils sont utilisés pour combler les vides et ainsi augmenter la compacité du béton. Leur utilisation réduit donc le besoin en ciment qui est très coûteux. De plus, elles peuvent également améliorer les propriétés mécaniques sans augmenter la quantité de ciment, évitant ainsi les risques de retrait et de rigidité excessive causés par la quantité excessive de ciment.; Leur efficacité dans ce domaine dépend de leurs propriétés minérales, de leur finesse et de leur activité cendre hydraulique ou pouzzolanique [8].

I.4.4 Les adjuvants

Les adjuvants utilisés dans le béton de sable sont les mêmes que ceux utilisés dans le béton traditionnel et exercent les mêmes performances.

Ce sont des produits chimiques à faible dose utilisés de la même manière et dans le même but que le béton traditionnel (amélioration des propriétés mécaniques à court, moyen et long terme).

On utilise également pour certains usages des entraîneurs d'air dont l'objectif est de créer un réseau de microbulles dans le béton de sable pour protéger du gel (dans la mesure où la formulation employée est sensible au gel). La nature et le dosage en adjuvant doivent systématiquement faire l'objet d'une vérification au laboratoire. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103 [9].

I.4.5 L'eau

Le béton de sable nécessite une grande quantité d'eau de mouillage, car une forte proportion d'éléments fins produira une grande surface spécifique. Le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des bétons traditionnels et pour le réduire on a recours à adjuvants. L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P 18-303 [10].

I.4.6 Autres ajouts

I.4.6.1 Les fibres

Les fibres (polypropylène, acier, fonte amorphe...) sont utilisées comme renfort au sein d'une matrice afin de contribuer à l'amélioration de la résistance à la traction et pour diminuer le phénomène du retrait au jeune âge. Leur rôle dépend de leur nature, leur dosage et leur longueur [11].

I.4.6.2 gravillons

L'ajout d'une petite quantité de gravillons peut améliorer considérablement certaines propriétés (fluage, retrait, résistance, maniabilité).

En effet, tant que le rapport massique gravier/sable (G/S) reste inférieur à 0,70, on peut supposer qu'il s'agit de béton de sable [2].

Il s'agit alors de béton de sable chargé : cette notion sous-entend une forte discontinuité entre le diamètre maximum D_1 du sable $0/D_1$ et le diamètre minimum d_2 du gravillon d_2/D_2 .

I.4.6.3 Les colorants

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps [12].

I.5 Les béton de sable fluides (BSAP)

I.5.1 Les contexte des bétons fluides

Les bétons traditionnels de consistance ferme à très plastique couvrent un large éventail d'usages possibles, nécessitant des performances variées, assez facilement obtenues, et des moyens de mise en œuvre relativement courants.

Ces bétons-là se révèlent, toutefois, mal adaptés dans certaines conditions d'utilisation telles que notamment [13]:

- La difficulté à garnir parfaitement des moules et les coffrages de formes complexes ou de faible accessibilité, supportant de fortes densités de ferrailage, avec des risques subséquents de ségrégation.
- La difficulté de vibrer et de régler (cas des bétons pour pieux).
- La nécessité de pomper le béton sur des longueurs ou hauteurs importantes.

On cherche à améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers, sans nuire à la qualité des ouvrages. C'est ainsi que s'est développée au début des années 90 [13].

I.5.2 Principales caractéristiques des bétons de sable fluides [14]

- Plasticité : le caractère fluide d'un béton de sable (non mesurable par l'évaluation de l'affaissement au cône d'Abrams) correspond à un étalement à la plaque de l'ordre de 55 à 60 cm. Pour la voirie ou les dallages industriels légèrement en pente (de 1 à 1.5%), il convient de ramener cet étalement autour de 40.
- Les performances mécaniques et de retrait sont très convenables et autorisent une large gamme d'utilisations.
- La tenue au gel est bonne.
- Influence de la fibrillation : les fibres polypropylène contribuent à la tenue du béton frais et limitent le retrait plastique, ce qui tend à améliorer la durabilité. Les fibres aciers sont, quant à elles, beaucoup plus bénéfiques grâce à leur influence sur la ductilité.

I.5.3 Domaines d'application des bétons de sable fluides

Les bétons de sable fluidifiés sont intéressants pour certaines applications comme les pieux forés, injections, reprises en sous-œuvre.

Plus généralement, les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques dont l'utilisation semble se développer. Indépendamment de la disponibilité locale en sables et en gravillons, on pourra privilégier l'usage du béton de sable dans les cas suivants [14]:

- Forte densité de ferrailage
- Risques de ségrégation préjudiciable.
- Recherche d'une texture fine

Actuellement, avec l'apparition des nouvelles générations de superplastifiants, il est possible de réaliser des bétons de sable très fluides, tout en améliorant les performances mécaniques.

Dans une étude récente sur les bétons de sable autoplaçant (BSAP), Abidelah et al [13] ont montré, dans un travail publié en 2009 et mené sur la caractérisation d'un béton de sable autoplaçant (BSAP) en utilisant des déchets de carrière, qu'il est possible de fabriquer des BSAP dont les propriétés à l'état frais et durcis, sont conformes aux recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [15], avec un rapport eau/liant (E/L) variant entre 0.32 et 0.39 [13]. Les auteurs ont utilisé des granulats avec un diamètre maximal ($D_{max} = 8 \text{ mm}$), mais en faible dosage de rapport (gravier/sables : $G/S = 0.25$).

Bouziani et al [14] ont pu formuler un BSAP, qui contient seulement du sable (mélange d'un sable alluvionnaire et dunaire). Les BSAP formulés présentent un bon étalement, mesuré par le mini-cône, (de 27 jusqu'à 33 cm) et de bonnes résistances mécaniques à la compression à 28 jours (allants jusqu'à 54 MPa). Dans ce travail, les auteurs ont montré aussi qu'un dosage optimal en poudre de marbre (type fillers calcaire) est nécessaire pour avoir une viscosité modérée (afin d'éviter la ségrégation).

Djebien et al [16] ont montré qu'il est possible de fabriquer des bétons de sable à base de fines de déchets de marbre. Celles-ci améliorent considérablement les propriétés rhéologiques et mécaniques et rend le béton de sable moins absorbant.

I.6 Formulation des bétons de sable

Dans un béton de sable, il convient de distinguer le dosage en ciment, nécessaire à l'obtention d'une résistance suffisante pour l'usage envisagé, et celui des fines d'ajouts, nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité, ce dosage va dépendre de la nature et de la granularité respective du sable et des fines d'ajouts [2].

I.6.1 Méthodes théorique pour la formulation des bétons de sable

I.6.1.1 La compacité et les méthodes de formulations des bétons

La formulation d'un béton consiste à choisir les constituants ainsi que leurs proportions en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques souhaités.

Le problème de la formulation d'un béton se pose en termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire, par un choix judicieux de la proportion de sable et de gravillons puis par un comblement de la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée. Le béton de sable, à la différence des mortiers, utilise un dosage en ciment proche du béton ordinaire (300 à 400 kg/m³). Ce qui distingue le béton de sable des bétons ordinaires réside essentiellement dans l'emploi de granulats de faible diamètre ($D \leq 5\text{mm}$). Les dosages en ciment ont été possibles grâce au remplissage des vides du sable par un filler calcaire (0/80 μm), ceci a pour conséquence favorable d'augmenter la compacité par la création d'une distribution granulaire continue [2].

En effet, au début du siècle, Caquot a pu établir, à partir des résultats expérimentaux une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V = V_0 (d / D)^{0.2} \quad 1.6.1$$

Avec V_0 : constante expérimentale

I.6.1.2 Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

Considérant l'étendue granulaire du sable, il est alors évident qu'il présente une porosité (PS) définie par la formule de Caquot, soit :

$$\text{PS} = 0,75 (0,08/ D)^{0.2} \quad (\% \text{ volumique}) \quad 1.6.2$$

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par [fines], le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80 μm et [v] le volume de vides associé à l'empilement de ces fines, Caquot a obtenu le résultat suivant :

$$[\text{Fines}] = [v] \quad 1.6.3$$

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit en combinant des équations (1.6.2) et (1.6.3):

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.08/ D)^{0.2} \quad 1.6.4$$

Cette formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la limite supérieure de l'étendue granulaire. Il apparaît clairement que plus le diamètre D diminue, plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif en termes de ciment seul : il faut nécessairement avoir recours à l'utilisation de fines de remplissage type fillers (figure 1.3) [2].

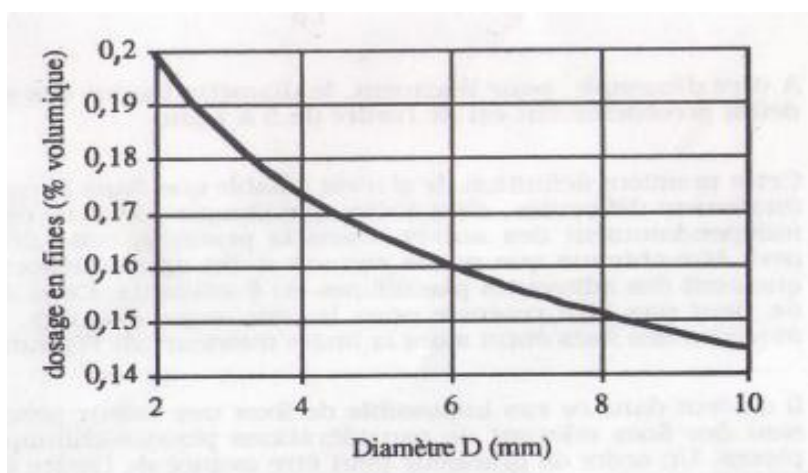


Figure 1.3 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [2]

I.6.1.3 Porosité et dosage en eau d'un béton de sable :

Dans le béton, le squelette particulaire comprenant des particules fines est optimisé, et il présente toujours une certaine porosité. Dans des conditions de mise en œuvre données, la compacité maximale, conduisant à une porosité minimale, ne sera atteinte que si la consistance le permet. En admettant que les vides inters granulaires se décomposent en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante, issue une nouvelle fois des travaux sur la compacité de Caquot [2] :

$$(e + v)_{\min} = 0.8 (d / D)^{0.2} \quad 1.6.5$$

Avec d/D : l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d , borne inférieure de l'étendue granulaire (figure 1.4). L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Par conséquent, dans le cas d'un mélange complètement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la granulométrie du composant le plus fin. Connaissant alors la surface spécifique

f (finesse Blaine par exemple en cm^2/g) de ce constituant et sa densité ρ (exprime en g/cm^3), le diamètre moyen des grains. L'assimilation dans une sphère est donnée par la formule suivante :

$$d = 60 / f \cdot \rho \quad \text{en mm} \quad 1.6.6$$

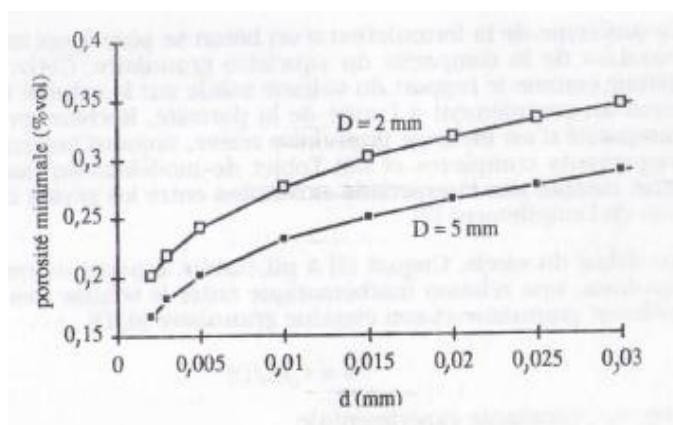


Figure 1.4 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable [2].

Pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas des bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5% [2].

$$[\text{Vides}] = k [\text{eau}] \quad (\text{L}/\text{m}^3) \quad 1.6.7$$

Avec k compris entre 0.2 et 0.25

I.6.1.4 : Estimation du dosage en sable :

L'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors tout simplement [2]:

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \quad (\text{L/m}^3) \quad 1.6.8$$

I.6.2 Méthode expérimentale de formulation

I.6.2.1 Présentation générale de la méthode expérimentale

La méthode expérimentale doit pouvoir formuler des bétons de sable, mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui interviennent dans la préparation du béton. Il existe d'autres méthodes, et elles peuvent varier selon les méthodes théoriques et les habitudes de travail, mais le but reste le même : formuler un béton le plus compact possible selon d'autres caractéristiques requises (pompabilité, faculté de moulage, capacité de projection). Le ciment sera utilisé pour mieux répondre aux exigences du contrat ou du cahier des charges qui stipulent généralement une quantité minimale. Cette méthode est une adaptation de la méthode dite de Baron-Lesage, qui est itérative et basée sur la génération de déchets légers. Les caractéristiques du mélange sont l'ouvrabilité et la densité apparente mesurées avec le mortier LCL.

Différentes formulations de béton de sable ont été réalisées grâce à cette méthode : béton de pieux, béton routier, béton projeté, etc. et ont donné toute satisfaction [2].

I.6.2.2 Les différentes étapes de la formulation [2]

- Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :
 - choix de la teneur en ciment.
 - fixation d'une teneur en eau.
 - Détermination de la quantité de sable.
 - Ajuste de la maniabilité et du rendement.
- Détermination du dosage en fine d'addition.
- Adaptation de la maniabilité à la mise en œuvre.
- Contrôle de la résistance.

I.7 Propriétés des bétons de sables

I.7.1 Propriétés à l'état frais

I.7.1.1 Maniabilité

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Le béton de sable, où les granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique, nécessite plus d'eau que le béton classique, ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement supérieures à 0,5 et se situe généralement entre 0,6 et 0,7. Cependant si l'on considère le rapport $E/(C+F)$ (eau/ciment + fines), on obtient des valeurs similaires à celles des bétons classiques [2].

I.7.1.1.1 Effet des Fines

En général, selon la granulométrie du sable, la maniabilité s'améliore avec l'augmentation du dosage en fines (ciment ou addition minérales) [17]. Pour certains sables dunaires par contre, elle chute, mais après un certain optimum, elle commence à s'améliorer [18]. La maniabilité dépend aussi de la nature des fines incorporées. Logiquement, l'ajout de fines de type sphérique, en diminuant la quantité des vides inters granulaires, permet de rendre l'eau disponible et donc d'améliorer la maniabilité [2].

I.7.1.1.2 Effet de la granulométrie du sable

La maniabilité dépend du module de finesse de sable, elle s'améliore avec le module de finesse. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité (Figure 1.5)

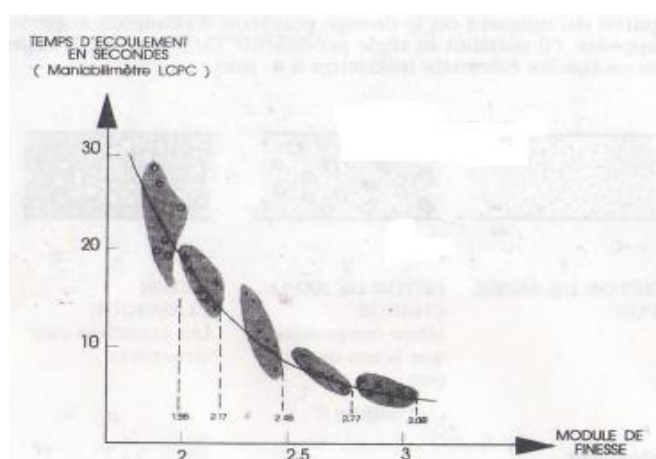


Figure 1.5 : Maniabilité en fonction du module de finesse du sable Influence de la teneur en fines [2].

I.7.1.1.3 Effet du rapport E/C

La maniabilité dépend (comme pour les autres bétons) du rapport E/C ou E/(C+F). Elle s'accroît généralement avec l'augmentation du rapport E/C [19].

I.7.1.2 La compacité

La compacité du granulat est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total, correspondant au supplément de l'unité de porosité. C'est l'un des paramètres qui influe sur les performances du béton. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité. Dans un mélange granulaire, plus le diamètre du plus gros grain diminue, plus la porosité augmente. C'est le cas des granulats de béton de sable, dont le diamètre n'excède pas 5 mm. Bien que dans ce cas-là cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines, le béton de sable reste toujours moins compact qu'un béton ordinaire [20].

I.7.1.2.1 Effet de la granulométrie du sable

Plus la porosité initiale du sable est grande, plus le besoin de fines est important. Or la porosité dépend de la distribution granulométrique du sable, qui, elle-même, dépend de la nature du sable (Figure 1.6). Pour un béton de sable dunaire ($D_{max} < 1$ mm) nécessite plus de fines qu'un béton de sable alluvionnaire ($D_{max} \leq 5$ mm).

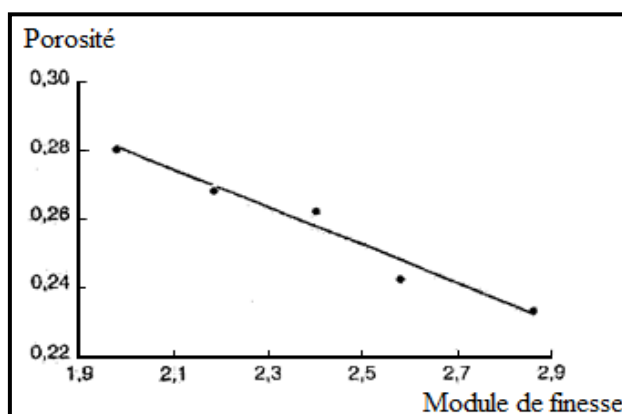


Figure 1.6 : Evolution de la porosité en fonction du module de finesse des sables [21]

Dans la plage de module de finesse comprise entre 1.9 et 2.9 (Figure 1.6), on observe un accroissement de la porosité avec l'augmentation du module de finesse. Cela est expliqué par le fait que le sable passe d'un excès en fines à une distribution normale.

I.7.1.2.2 Effet des fines

Ils sont utilisés pour combler les vides dans le sable, et le but est d'augmenter la densité en créant une expansion granulaire continue [22,23]. Cependant, il convient de noter qu'il existe une dose optimale à laquelle la compacité commence à diminuer [24,19]. D'autre part, Plus la finesse des fillers est grande, plus ce dosage optimal en fillers est important et la compacité du béton est plus élevée [2].

I.7.2 Propriétés à l'état durci

I.7.2.1 Comportement mécanique

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques majeures pour un béton. De ce fait, il est indispensable pour n'importe quelles études de prendre en considération les résistances à la rupture en traction et en compression.

I.7.2.1.1 Effet des fines

La résistance mécanique en compression peut être différente en fonction de certains nombres de paramètres et en particulier le dosage, la finesse et la nature des fines [2]. Un dosage optimal et une plus grande finesse des ajouts permet d'augmenter la compacité et par conséquent la résistance [18]. En ce qui concerne la nature des fines, différentes natures ont été essayées et comparées. Le résultat obtenu est que les fines calcaires sont les plus réactives avec le ciment et donnent les meilleures résistances [17].

I.7.2.1.2 Effet de la granulométrie du sable

On constate pour une même valeur du rapport E/C, que la résistance n'est pas trop influencée par le diamètre maximal des grains de sable (D_{max}) (Fig. 1.7). Mais la maniabilité s'améliore avec l'augmentation de D_{max} . Par contre à des rapports E/C différents et à une maniabilité constante, la résistance diminue avec la diminution de D_{max} . Ceci est dû, comme nous l'avons déjà vu, au besoin plus élevé en eau. Notons qu'à une même maniabilité, la résistance du béton de sable dunaire est nettement inférieure à celle du béton de sable alluvionnaire [20].

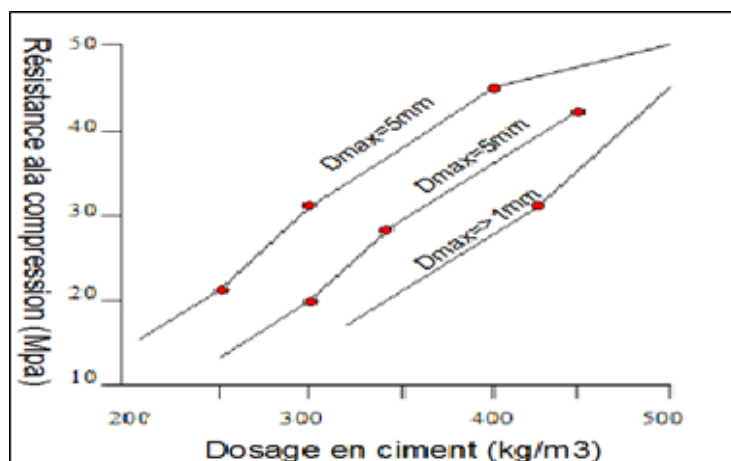


Figure 1.7 : Effet de la granularité sur la résistance [2]

I.7.2.1.3 Effet du rapport E/C

Comme pour les bétons classiques, la résistance du béton de sable diminue avec l'augmentation du rapport E/C. Pour des compositions avec un dosage en ciment de 250 à 450 kg/m³, la résistance est atteinte par adjonction de fines et de plastifiant ; la résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60 MPA selon la composition, l'adjuvant et le mode de la mise en œuvre [2].

I.7.2.1.4 Module d'élasticité

La valeur du module d'élasticité du béton de sable est voisine de celles des bétons, elle est plus faible que celle d'un béton classique ce qui donne au béton de sable une grande déformabilité et donc une moindre fissuration [25].

I.7.2.1.5 Retrait

Des études expérimentales sur les retraits des bétons de sable ont conclu que le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique [2]. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier.

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 peut atteindre le double de celui d'un béton classique [22,18]. La différence de retrait qui existe entre les deux matériaux (béton de sable et béton classique) est vraisemblablement liée à plusieurs paramètres, dont nous citons :

- l'influence du dosage en eau;
- l'influence du dosage en ciment;
- l'influence de la distribution et de la taille des vides, qui est largement influencée par la taille des grains de sable et la quantité des fines [20].

I.7.2.1.6 Fluage

Des études expérimentales sur les fluages des bétons de sable en comparaison avec un béton classique, montrent que la valeur du fluage d'un béton de sable est plus importante par rapport à celui d'un béton classique (Figure 1.8) [2].

Et ainsi, elles montrent que le fluage varie d'une façon inverse avec la résistance. En effet, un béton à haute résistance aura un faible fluage, et celui-ci sera proche du fluage du béton ordinaire. Donc on peut diminuer le fluage du béton de sable en augmentant sa résistance (Figure 1.9) [2].

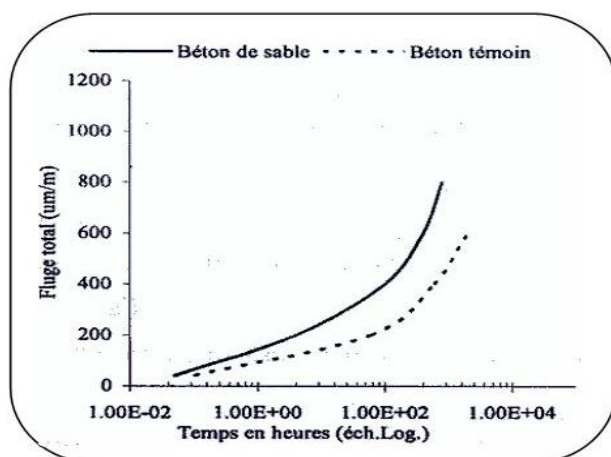


Figure 1.8 : Fluage total [2].

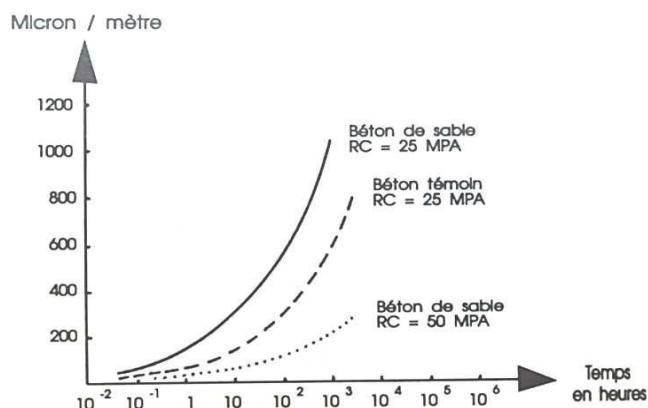


Figure 1.9 : Influence de la résistance sur le fluage total [2].

I.7.2.1.7 Durabilité

Comme le béton traditionnel, la durabilité du béton de sable est généralement affectée par la composition physique de la matrice et la porosité, la distribution géométrique et la perméabilité des pores. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons ordinaires. Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Cette distribution poreuse particulière contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis à vis des essais de durabilité [2].

L'estimation de la durabilité se fera par conséquent à l'aide d'essais suivantes [2] :

- perméabilité à l'eau et à l'air ;
- gel dégel ;
- carbonatation ;
- pénétration des ions chlorures ;

Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico chimiques [2] :

- La perméabilité à l'eau est plus faible qu'un béton ordinaire ($2,5 \cdot 10^{-12}$ m/s contre 10^{-10} m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés.
- La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores ($<10\mu\text{m}$) et de l'absorption initiale. Des résultats expérimentaux montrent un quasi proportionnalité entre profondeur carbonatée et absorption initiale [21].
- Le comportement à la pénétration des ions chlorures est comparable à celui des bétons traditionnels.

I.7.2.1.8 Perméabilité

Bien que le béton de sable soit plus poreux que le béton traditionnel, sa perméabilité est moindre. La taille et la répartition des pores ne sont pas propices à la migration de la vapeur à travers le béton. Il s'agit d'une donnée importante dans le domaine de l'isolation des bâtiments. Cette répartition particulière des pores observée sur des bétons de sable optimisés dans le cadre du projet SABLOCRETE contribue dans une large mesure à leur bon comportement aux tests de durabilité [2]. En revanche, la perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton conventionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats généralement inférieurs ou comparables à ceux du même béton conventionnel [26].

I.7.2.1.9 Microstructure et fissuration

La microstructure du béton de sable est continue, homogène et compacte. Le coulis de ciment durci est amorphe et ne présente pas de fissures évidentes. Les observations au MEB établissent que l'hydratation se développe de façon normale et la morphologie de l'interface pâte-granulats ou auréole de transition n'est pas caractérisée par une texture particulière [2]. Les travaux de Benaissa ont confirmé la nature légèrement fracturée du matériau [22]. Par ailleurs, il a été montré la bonne homogénéité due à l'absence de ségrégation.

I.8 Conclusion

La synthèse des recherches et des études réalisées sur les bétons de sables (BSAP) ont pu démontrer que le béton de sable pour ses performances physiques et mécaniques qu'ils offrent, peut présenter une solution très intéressante dans plusieurs domaines de la construction et dans plusieurs régions.

La vulgarisation du béton de sable n'a pas vocation à remplacer le béton à hautes performances traditionnel, mais à devenir une nouvelle source de béton de haute qualité, ainsi, cette vulgarisation va s'inscrire dans le cadre de la valorisation des ressources locales abondantes (sable de dune) et du développement des techniques innovantes.

CHAPITRE II :

***État de l'art sur le béton compacté
au rouleau***

Chapitre II

Etat de l'art sur le béton compacté au rouleau

II.1. Introduction

Le béton compacté au rouleau est un béton qui se différencie grandement d'un béton traditionnel. En fait, son utilisation, sa présentation et sa mise en œuvre sont complètement différentes. Le BCR est un béton sec utilisé pour la construction de pavages et de barrages. Les matériaux utilisés pour fabriquer le BCR sont les mêmes que ceux utilisés pour le béton conventionnel, mais leurs proportions sont différentes. La principale caractéristique du BCR est le faible volume de pâte, c'est-à-dire moins d'eau et moins de matériaux cimentaire. Par rapport au béton traditionnel (BC), la teneur en liant du BCR est particulièrement faible [27]. La quantité d'adhésif varie de 60 à 300 kg/m³. Le BCR présente également une bonne durabilité dans des conditions d'utilisation sévères, en termes de fatigue, de choc thermique et de résistance à l'usure [28].

Le béton compacté au rouleau est produit dans des équipements mobiles. L'équipement est installé directement sur le chantier, réduisant considérablement les émissions d'air pollué générées lors du transport des camions de l'usine au finisseur. De plus, la courte distance entre la manufacture et le pavé assure la meilleure qualité du mélange pendant le processus de pose. Un camion à benne basculante est utilisé pour transporter le BCR jusqu'au site, puis un finisseur traditionnel couramment utilisé pour la construction de routes est utilisé pour placer le BCR. Par la suite, le béton est compacté avec un rouleau compacteur. Car contrairement au béton traditionnel, la quantité de pâte est suffisante pour obtenir un bon compactage par simple vibration, et le BCR doit recevoir une grande quantité d'apport d'énergie de l'extérieur pour se former. Le compactage aide à minimiser les vides et à atteindre une compacité maximale. Une fois fusionnée, la BCR a une capacité de charge, permettant aux véhicules de circuler à sa surface [28].

La Figure 2.1 montre le processus de déchargement, de placement et de compactage du BCR.



Figure 2.1 : Mise en œuvre du BCR [29,30].

Les revêtements en BCR ont plusieurs domaines d'application. Ils sont, par exemple, utilisés pour les aires d'entreposage et de stockages, les routes de transport pour l'industrie forestière et minière, les aires de compostage, les stationnements, les routes municipales et urbaines et les aéroports [28].

II.2. Historique

En 1942, l'US Army Corps of Engineers procéda à la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord [28].

Au Canada, une technologie similaire au BCR a été utilisée pour la première fois en 1976. La terre de ciment est utilisée comme revêtement pour les allées et les cours de chemin de fer d'entreprise forestière en Colombie Britannique. Une petite quantité de ciment est ajoutée aux particules pour obtenir une capacité portante plus élevée du remblai. Cependant, un remblai de sol-ciment doit toujours être recouvert d'une couche de roulement en enrobé bitumineux. Dans le cadre d'un projet réalisé par une compagnie forestière à Vancouver, il a été décidé de ne pas poser cette couche résistante à l'usure, mais de placer plus de ciment sur la couche supérieure du remblai. L'expérience a été couronnée de succès et ce matériau est devenu un sol de ciment à haute résistance, qui est ensuite devenu du béton compacté au rouleau [31]. Le plus important projet réalisé au Québec a été l'agrandissement de la cour à bois à l'usine de Papiers Domtar en 1996. La superficie totale de la dalle BCR est de 87 000 mètres carrés. La résistance moyenne à la compression du mélange BCR après durcissement pendant 7 jours est de 50 MPa

et la résistance moyenne à la flexion est de 8 MPa [28]. La Figure 2.2 présente une vue aérienne du projet lors de la construction du revêtement.



Figure 2.2 : Vue aérienne lors de la construction du revêtement à l'usine de papiers Domtar [28]

Après 1980, au moins 10 autres pays (France, États-Unis, Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Allemagne, Australie, Argentine, Japon) ont chacun construit plus de 10 000 mètres carrés de revêtement BCR [28].

II.3. Avantages et inconvénient du BCR :

II.3.1 Avantages du BCR [27]:

- Faible contenu en matières cimentaires,
- Propriétés mécaniques élevées ; la résistance à la compression plus de 40 MPa et la résistance à la flexion plus de 6 MPa,
- Développement rapide des propriétés mécaniques,
- Rapidité de mise en place,
- Durabilité élevée ; résistance à l'abrasion, résistance au gel, bien adapté au lourds charges,
- Peu de main d'œuvre,
- Technologie peu complexe,
- Grande stabilité volumique,

II.3.2 Inconvénients du BCR [27]:

- Surface moins fermée,
- Surface ondulée surtout sur le plan longitudinal d'une chaussée,
- Difficulté de réaliser des joints structuraux,

II.4. Constituants du BCR

II.4.1 Granulats

Les granulats ont une grande influence sur les propriétés de fraîcheur et de durcissement du BCR, car ils représentent généralement 75 à 80 % du volume total du mélange. A l'état frais, le type et la nature des granulats peuvent influencer la maniabilité, compte tenu de leur teneur en eau et de leur absorption. Les propriétés mécaniques, telles que la résistance à la compression et à la flexion, et la durabilité du mélange BCR aux cycles de gel-dégel [28].

II.4.2 Liant

Le choix du type de liant et de sa quantité dépend de la résistance mécanique requise et des normes de durabilité requises. Généralement, la teneur formulée des mélanges BCR varie de 250 à 330 kg/m³ [2]. Le contenu du liant a une grande influence sur les performances du béton compacté au rouleau. Effectivement, lorsque la teneur en liant augmente, cela permet de réduire la friction entre les granulats et donc améliorer la maniabilité. Cependant, une teneur en ciment trop élevée entraînera des fissures de retrait plus serrées et augmentera également considérablement les coûts de production sans avoir à augmenter la résistance mécanique et à prolonger la durée de vie du revêtement [28].

II.4.3 Adjuvant

Les Adjuvants chimiques couramment utilisés dans le béton conventionnel comme les réducteurs d'eau, les retardateurs, les accélérateurs et superplastifiants peuvent être incorporés dans les mélanges de BCR.

A cause de l'aspect sec du BCR, les adjuvants doivent être ajoutés avec des quantités supérieures à celles utilisées dans le béton classique pour être efficaces [28-32].

II.4.4 Eau

La plage de variation de la teneur en eau, c'est-à-dire le pourcentage de la teneur en eau dans le mélange par rapport à la masse totale de solides secs, est comprise entre 4,5% et 6%.

Ce dosage en eau, considéré relativement faible par rapport à celui du béton traditionnel, permet d'obtenir un béton sec à affaissement nul [33].

II.5. Formulation d'un BCR

La grande majorité des méthodes de formulation utilisées pour le béton traditionnel ne sont pas directement applicables au BCR. Quelle que soit la méthode de formulation utilisée, le mélange de béton compacté doit répondre à certaines exigences spécifiques. Par exemple, la teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés souhaitées à un coût minimal. De plus, le rapport E/L du mélange doit être ajusté afin qu'il ait une maniabilité optimale pour obtenir la meilleure densité sèche sur le rouleau du compacteur. La méthode de formulation utilisée doit permettre de produire un BCR le plus dense possible pour une maniabilité optimale [34].

Le comité de l'ACI 325 suggère deux méthodes basées sur des approches empiriques qui requièrent souvent plusieurs gâchées en laboratoire afin d'obtenir un mélange aux proportions optimales [35]:

- Formulation respectant certaines limites de maniabilité.
- Formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

II.5.1 Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité

Cette méthode de formulation ACI est utilisée pour produire des mélanges BCR conçus pour atteindre les limites de la maniabilité. Elle produit généralement de bons résultats dans la pratique et permet d'obtenir un mélange optimisé. La proportion du mélange BCR est déterminée par la procédure en trois étapes :

Dans la première étape, une série d'essais par lots sont nécessaires pour les mélanges de mortier avec différents rapports eau-ciment et différents rapports sable-ciment afin de déterminer le volume minimum de pâte. Pour chaque mélange, la densité est mesurée. La Figure 2.3 montre qu'un rapport E/C donné correspond à un rapport S/C qui conduit à une masse volumique optimale. La deuxième étape, consiste à choisir le rapport E/C selon les propriétés mécaniques requises. La troisième étape consiste à optimiser les dosages des granulats fins et grossiers afin d'atteindre la maniabilité voulue [34].

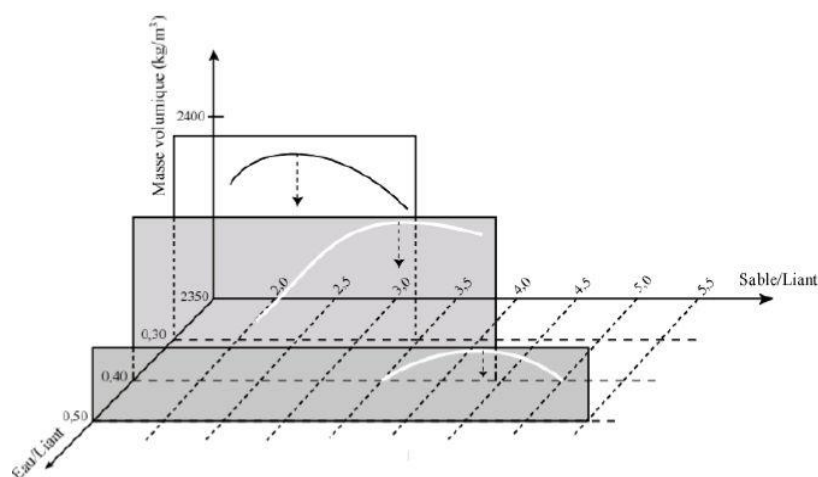


Figure 2.3 : Détermination du volume de pâte minimal [28].

II.5.2 Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique

Cette méthode consiste à utiliser l'essai Proctor modifié, suivant le mode opératoire de la norme ASTM D1557, afin d'obtenir la relation de la variation de la densité en fonction de la teneur en eau. La teneur en ciment est déterminée selon les caractéristiques mécaniques exigées, la teneur en eau optimale est estimée sur la base des essais de compactage du béton frais. La proportion de différents types de particules (sable, gravier) est déterminée par une courbe de référence, qui est établie à partir d'un grand nombre de mesures effectuées sur une variété de granulats. Utilisez la formule suivante pour calculer la densité sèche. Puis une série de mélanges à dosages en ciment différents teneur variant entre 12 et 14% de la masse totale des matériaux secs : on détermine alors, pour chaque mélange, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche correspondante par l'essai Proctor modifié. Utilisez la formule suivante pour calculer la densité sèche [34] :

$$\rho_d = [\rho_h / (w + 100)] 100$$

ρ_d : densité sèche.

ρ_h : densité humide.

w : teneur en eau réelle .

La troisième méthode a été développée par Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC), puis a été adaptée par le CRIB de l'Université Laval pour développer le BCR. Cette méthode de formulation se nomme le modèle d'empilement compressible et elle repose sur une meilleure compréhension des paramètres qui influencent les propriétés à l'état frais et durci du BCR. Elle repose sur l'optimisation de la compacité de l'empilement de particules de différentes tailles. Habituellement, une seule gâchée est nécessaire dans le laboratoire, mais cette technique nécessite beaucoup de calculs mathématiques et de logiciels spécialisés [34].

II.5.3 Méthode du volume de pâte optimal

Cette méthode comporte trois étapes :

La première étape consiste à déterminer le rapport des différents types de particules pour produire un mélange contenant le moins de vides. Pour ce faire, il est possible d'utiliser la formulation de Fuller Thompson [36]. La deuxième étape consiste à déterminer le volume de pâte requis pour atteindre à une maniabilité spécifique. L'étape finale de formulation consiste à sélectionner le rapport eau/liant. Le choix du rapport E/L est principalement fait en fonction des résistances mécaniques souhaitées [36].

II.6. Compacité du BCR

Pour le béton compacté au rouleau, ajuster la quantité d'eau libre pour obtenir un béton facile à compacter et ayant une bonne portance à l'état frais. En prenant compte ces deux conditions, il convient de dire que le compactage est probablement l'opération la plus importante et la plus déterminante au niveau des propriétés mécaniques et de la durabilité des BCR [37].

Le compactage vise à obtenir une masse volumique se rapprochant le plus possible de l'optimum Proctor modifié. Notre objectif est de maximiser le compactage, car les meilleures propriétés mécaniques peuvent être obtenues lorsque le degré de compactage est le plus élevé. La diminution de la porosité dans le béton conduit à de meilleures résistances et à une meilleure durabilité. La porosité d'un BCR ne devrait pas dépasser 3% [38]. Les variables affectant le plus le compactage sont la granulométrie du squelette granulaire, la forme des particules de sable et des gros granulats, la quantité d'eau ainsi que le volume de pâte. La compacité du mélange joue un rôle très important dans la résistance. La figure 2.4 montre la relation entre le degré de compactage et la résistance obtenue.

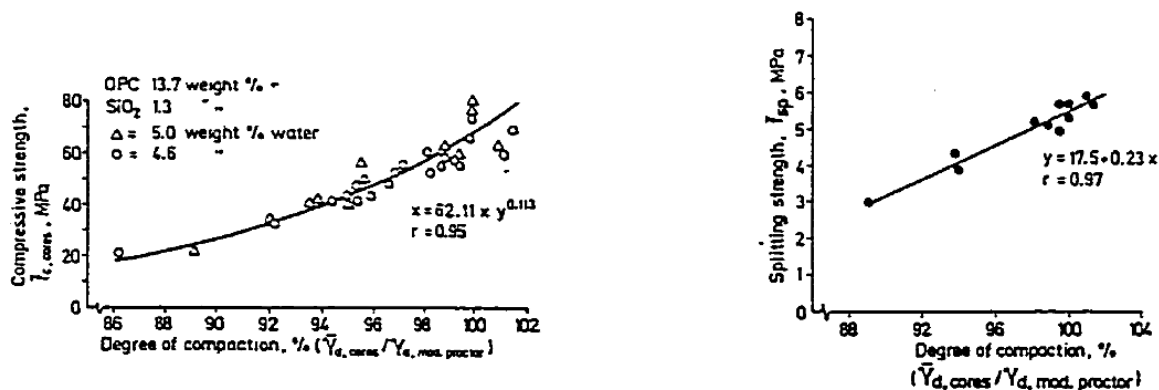


Figure 2.4 : Relation entre le degré de compacité et les résistances (compression et flexion) [37]

Dans les cas ci-dessus, le mélange avec la meilleure résistance est le meilleur mélange consolidé. Cependant, la compacité semble avoir une influence beaucoup plus grande sur les résistances en compression que sur les résistances à la flexion. Pour une compacité qui passe de 94 à 96 %, la résistance à la compression augmente de ± 25 %, tandis que pour la résistance à la flexion, elle augmente de ± 10 %. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'épaisseur de la pâte est réduite et les agrégats sont mieux soutenus les uns par les autres. Ces deux facteurs ont peu d'influence sur la résistance à la flexion [37].

La Figure 2.4 montre clairement l'importance d'obtenir un bon compactage lors de la mise en place du BCR, car une augmentation du compactage de seulement 1 % peut entraîner une augmentation d'environ 3 à 5 MPa de la résistance à la compression [37].

II.7. Propriétés à l'état frais et durci du BCR

Les principales propriétés du béton compacté au rouleau à l'état frais sont la maniabilité, la densité. La méthode d'essai utilisée pour mesurer la performance humide du béton standard n'est pas applicable au BCR.

II.7.1 Maniabilité

La maniabilité est une propriété importante du BCR, car elle détermine la facilité de mise en place. L'ouvrabilité fait référence à l'énergie de compactage nécessaire pour consolider complètement le matériau frais [28]. Contrairement à un béton traditionnel où la maniabilité est mesurée lors de l'essai du cône d'Abrams, la maniabilité d'un BCR est mesurée lors de l'essai Vébé selon les spécifications de la norme ASTM C 1170. Le test Vébé consiste à déterminer le temps nécessaire pour atteindre la compacité maximale. Avec le contact initial de l'eau et du liant, le temps de Vébé continue d'augmenter. Une diminution de la maniabilité dans le temps est donc prévisible. La Figure 2.5 donne un exemple de l'évolution générale de la

maniabilité en fonction du temps de mélanges de BCR formulés avec des teneurs en liant de l'ordre de 250 à 325 kg/m³ pour des rapports eau/liant de 0,40 et 0,35 respectivement fabriqués avec un granulat grossier de grosseur maximale de 20 mm et un réducteur d'eau [28].

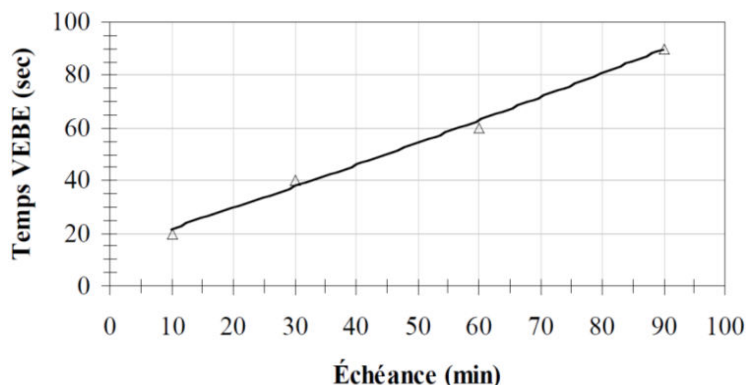


Figure 2.5 : Exemple de l'évolution de la maniabilité dans le temps d'un mélange de BCR [28]

II.7.2 Masse volumique

La densité dépend principalement de la densité de l'agrégat et de la quantité de vides. Contrairement au béton traditionnel, le BCR a peu de vides et une teneur élevée en solides. Par conséquent, la densité du BCR est légèrement supérieure à celle du béton conventionnel.

Une relation entre la masse volumique et le rapport V_p/V_{vc} existe et elle est présentée à la Figure 2.6 [39].

V_p (volume de pâte),= $V_{\text{ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{ajout minéraux}}$

V_{vc} : volume des vides

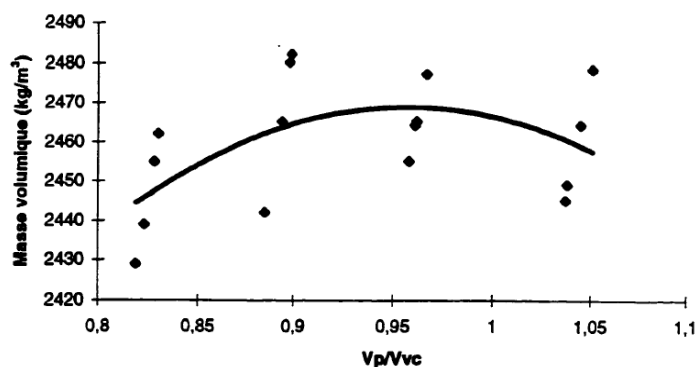


Figure 2.6 : Relation entre la masse volumique des BCR et le rapport V_p/V_{vc} [39]

II.7.3 Résistance à la compression

D'une manière générale, tant que le BCR est complètement compacté et qu'il y a suffisamment pour combler les vides, la résistance à la compression augmentera à mesure que le rapport E/C diminue. Cependant, lorsque la quantité d'eau devient trop faible, le BCR s'assèche et la présence de vides dans le mélange augmente, ce qui réduit à son tour de la résistance [39].

La résistance à la compression est étroitement liée au degré de compactage. En effet, si le compactage n'est pas suffisant, il y aura des écarts entre les agrégats, entraînant une diminution de la résistance à la compression. Par conséquent, il est important de ne pas ignorer ces qualités [39].

II.7.4 Résistance à la flexion

Pour le même niveau de résistance à la compression, la résistance à la flexion du BCR est généralement supérieure à celle du béton traditionnel. Le degré de compactage est le facteur le plus important affectant la résistance à la flexion.

II.8 Le retrait

Le retrait correspond à une réduction significative du volume de béton. On distingue principalement trois types de retraits [40]:

- Le retrait avant prise causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton
- Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment
- Le retrait hydraulique qui est une conséquence de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment.

A ces phénomènes vient également s'ajouter, comme pour la plupart des matériaux, une déformation thermique liée aux variations de température extérieure.

Le retrait est influencé par [40]:

- L'humidité relative et la température environnante : le retrait est d'autant plus accentué que l'humidité de l'air est plus réduite et la température plus élevée.
- L'hydratation du ciment: le retrait augmente si l'hydratation du ciment est plus accentuée.
- La fraction fine du granulat.
- Le rapport E/C

Le principal objectif des recherches récentes est de minimiser le phénomène de retrait pour éviter les dégâts pathologiques engendrés dans la structuration de béton et permettre de substituer à de grandes fissures [40].

Les chaussées en béton appartiennent à la catégorie des chaussées rigides et se caractérisent par une rigidité très importante comparée à celle des matériaux bitumineux, ainsi que par un retrait hydrique lié aux phénomènes de prise du ciment (retrait endogène) et de séchage du matériau (retrait de dessiccation) [40].

II.9 Durabilité du BCR

Lorsque le béton peut résister à la pénétration de substances agressives dans les pores, il est plus durable. Ainsi, le compactage permettra de minimiser cette porosité et donc la durabilité du BCR [42].

II.9.1 Gel-dégel

La durabilité du BCR contre les cycles de gel-dégel dépend des caractéristiques suivantes :

Le rapport E/C, la quantité de pâte, le type de ciment, la qualité des granulats utilisés et le degré de compactage. En effet, si le compactage est suffisant et que les vides compactés ne sont pas reliés entre eux, ces vides peuvent assurer une protection adéquate [41]. De plus, afin d'obtenir un compactage suffisant, La distribution granulométrique doit être optimisée pour minimiser les vides intergranulaires. Ainsi, en diminuant la quantité de vides, l'interconnexion entre ceux-ci est diminuée. En conséquence, la perméabilité est réduite, de sorte que l'eau et le sel sont moins susceptibles de pénétrer dans la matrice de ciment [42].

II.10 Les différentes structures de chaussées :

II.10.1 La structure de chaussée

Une chaussée se présente sous la forme d'une structure composite multicouche constituée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires. Les couches composant la chaussée reposent sur un sol support (voir Figure 2.7) [43].

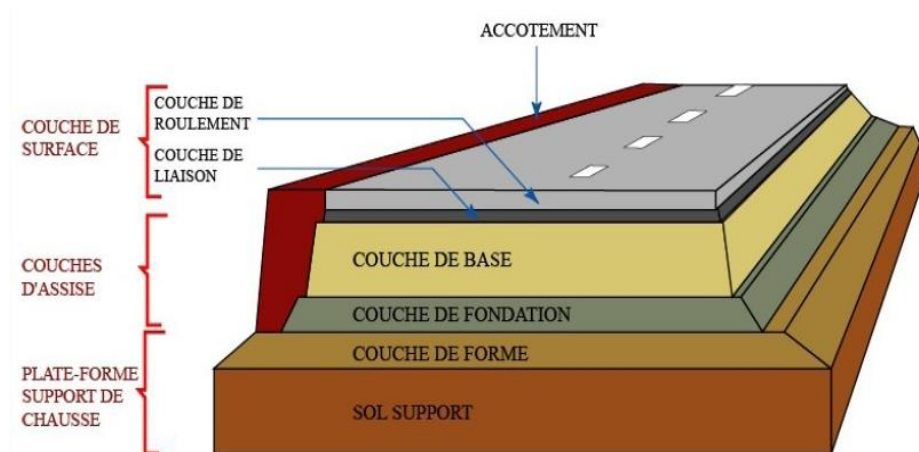


Figure 2.7 – Coupe transversale schématique de la chaussée [43].

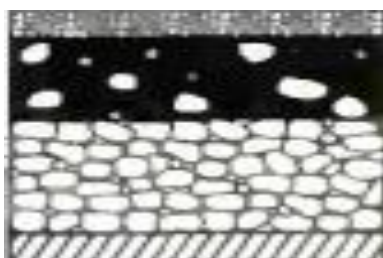
La description adoptée par la méthode de dimensionnement française, établie par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), attribue à chacune des couches une fonction [43].

La plateforme support, constituée du sol support et, éventuellement, d'une couche de forme en matériaux sélectionnés pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée. Cette dernière doit présenter une bonne portance. Elle a pour rôle d'assurer de meilleures conditions de déroulement du chantier en assurant la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des différentes couches du corps de la chaussée [43].

La couche d'assise se compose généralement d'une couche de fondation avec une couche de base sur le dessus. Elles assurent l'essentiel de la rigidité de la structure de la chaussée et répartissent (par diffusion latérale) les contraintes causées par le trafic sur la plate-forme de support afin de maintenir la déformation dans la plage admissible [43]. La couche superficielle est formée d'une couche anti-usure, recouvrant éventuellement la couche intermédiaire de liaison. La couche de roulement assure la fonction imperméable de la couche de base et empêche les infiltrations d'eau. A travers ses caractéristiques de surface, en particulier l'uni et l'adhérence, elle garantit la sécurité et le confort des usagers [43].

II.10.2 Les différentes familles de chaussées

II.10.2.1 Chaussées souples

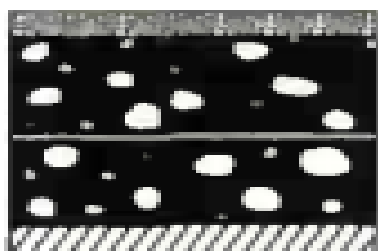


1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (< 15 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (20 à 50 cm)
4. Plate-forme support

Figure 2.8 – Chaussées souples [43].

Les chaussées souples sont constituées d'une couche de fondation en matériaux granulaires non traités d'épaisseur comprise entre 30 et 50 cm et d'une couche de base bitumineuse d'épaisseur inférieure à 15 cm. La couche superficielle est composée d'une faible épaisseur de matériau bitumineux, parfois réduite à un simple revêtement [2].

II.10.2.2 Chaussées bitumineuses épaisses

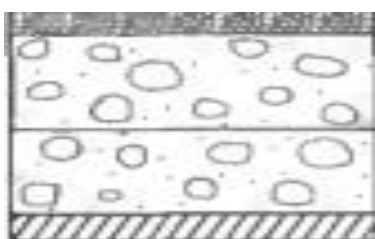


1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (15 à 40 cm)
3. Plate-forme support

Figure 2.9 – Chaussées bitumineuses épaisses [43].

Les chaussées souples à structure bitumineuse épaisses sont constituées de matériaux bitumineux en assise d'épaisseur totale pouvant atteindre 40 cm, recouverts d'une couche de surface bitumineuse [2].

II.10.2.3 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

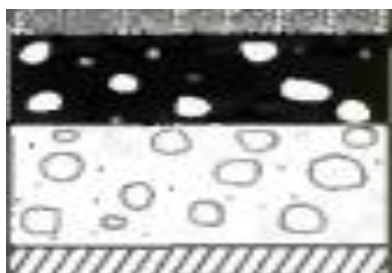


1. Couche de surface en matériaux bitumineux (6 à 14 cm)
2. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50 cm)
3. Plate-forme support

Figure 2.10 – Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques [43].

Chaussées aux liants hydrauliques ou chaussées semi-rigides. Elles comprennent une couche de base et une couche de fondation constituées d'un matériau traité avec un liant hydraulique sous la couche superficielle d'asphalte [2].

II.10.2.4 Chaussées à structure mixte

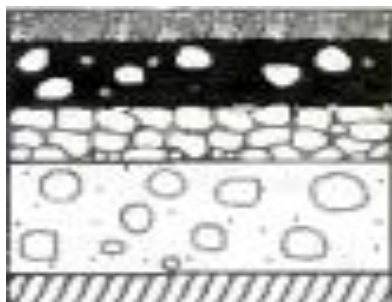


1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
4. Plate-forme support

Figure 2.11 – Chaussées à structure mixte [43].

Les chaussées à structure mixte comportent une couche de surface et une couche de base (de 10 à 20 cm) en matériaux bitumineux sur une couche de fondation (de 20 à 40 cm) traitée aux liants hydrauliques [2].

II.10.2.5 Chaussées à structure inverse



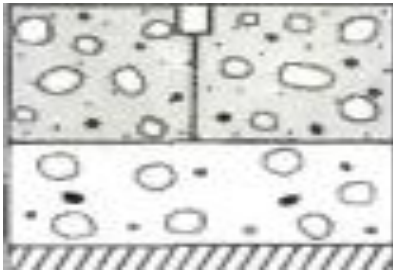
1. Couche de surface en matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (environ 12 cm)
4. Matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 50 cm)
5. Plate-forme support

Figure 2.12 – Chaussées à structure inverse [43].

Les chaussées à structure inverse sont des chaussées à structure mixte dans lesquelles une couche de grave non traitée vient s'insérer entre les couches bitumineuse et hydraulique.

II.10.2.6 Les chaussées en béton de ciment

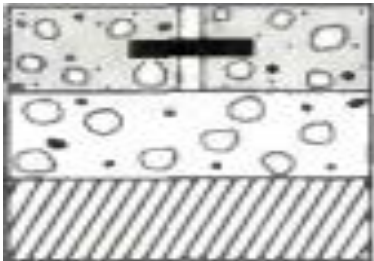
II.10.2.6.1 Dalles non gougonnées avec fondation



1. Béton de ciment (20 à 28 cm)
2. Béton maigre (12 à 18 cm) ou matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm)
3. Plate-forme support

Figure 2.13 – Dalles non gougonnées avec fondation [43].

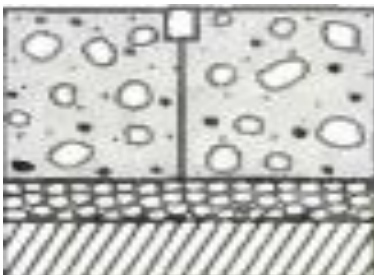
II.10.2.6.2 Dalles gougonnées avec fondation



1. Béton de ciment (17 à 23 cm)
2. Béton maigre (14 à 22 cm)
3. Plate-forme support

Figure 2.14 – Dalles gougonnées avec fondation [43].

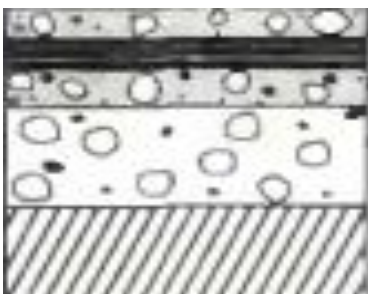
II.10.2.6.3 Dalles sans fondation



1. Béton de ciment (28 à 39 cm)
2. Couche drainante (matériaux granulaires ou géotextile)
3. Plate-forme support

Figure 2.15 – Dalles sans fondation [43].

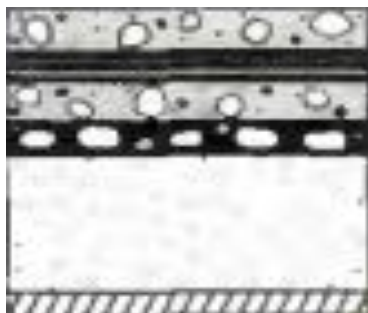
II.10.2.6.4 Béton armé continu (1)



1. Béton de ciment (16 à 24 cm)
2. Béton maigre (12 à 14 cm)
3. Plate-forme support

Figure 2.16 – Béton armé continu (1) [43].

II.10.2.6.5 Béton armé continu (2)



1. Béton de ciment (18 à 24 cm)
2. Matériaux bitumineux d'assise (5 cm)
3. Sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm)
4. Plate-forme support

Figure 2.17 – Béton armé continu (2) [43].

Les chaussées en béton de ciment (rigide), constituées d'un corps en béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement revêtu par une couche de roulement mince en matériau bitumineux. La couche en béton repose soit sur une couche de fondation, soit directement sur le sol support avec interposition de couche de liaison [43].

II.10.3 Endommagement des différentes familles de chaussées

II.10.3.1 Les chaussées souples

II.10.3.1.1 Sollicitations dues au trafic

Le matériau granulaire non lié qui constitue la fondation de ces chaussées a une rigidité plus faible, qui dépend de la rigidité du sol et de son épaisseur. L'enrobé bitumineux étant relativement mince, les efforts verticaux générés par le trafic se transmettent difficilement au substrat par diffusion latérale. Des contraintes verticales élevées se traduisent par une déformation permanente de la surface de la route par des déformations plastiques répétées du sol ou du gravier. La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion [43].

II.10.3.1.2 Influence des conditions d'environnement

La faible rigidité de la structure rend ces chaussées particulièrement sensibles aux modifications de l'état hydrique du sous-sol. Cela se manifeste notamment par « l'effet de bord » : la portance est réduite en période humide, ce qui provoque un affaissement du remblai et l'eau se rétracte et se fissure en période sèche [43].

II.10.3.2 Les chaussées en béton de ciment

II.10.3.2.1 Sollicitations dues au trafic

En raison du module d'élasticité élevé du béton de ciment, les forces générées par le trafic sont principalement absorbées par la couche de béton. La contrainte de compression transmise au sol est très faible. Comme le transfert de charge entre les dalles de plancher est faible, l'augmentation des contraintes latérales sur le bord de la dalle de plancher est plus importante dans les conditions de circulation. La finesse des fissures continues du béton armé assure la quasi-continuité de la structure. Pour les structures articulées en béton, le transfert de charge est assuré par des pièces en acier alignées avec les joints transversaux [43].

II.10.3.2.2 Influence des conditions d'environnement

Lors de la prise et du cycle thermique, le béton subit une phase de retrait. La fissuration correspondante est généralement contrôlée en réalisant des joints transversaux ou en installant des barres d'acier longitudinales continues, qui sont conçues pour disperser la déformation de retrait en générant un grand nombre de fissures fines [43].

II.10.4 Le béton de sable en construction routière

Le béton de sable peut être utilisé pour les corps de chaussée. L'utilisation du béton de sable en corps de chaussée présente l'avantage d'un meilleur impact sur l'environnement [2].

II.10.4.1 Classes de résistance des bétons de sable routiers

Selon la norme française NF P 98 170 [44], on définit 6 classes de résistance pour le béton de sable (voir Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Caractéristiques des bétons routiers suivant les classes de résistance [2]

Classes de Résistance NF P 98 170	Résistances caractéristiques à 28 jours en MPa	
	Compression NF P 18 406	Fendage NF P 18 408
6	-	3.3
5	-	2.7
4	-	2.4
3	25	2
2	20	1.7
1	15	1.3

Pour les matériaux de construction français, les classes 1 et 2 correspondent à des bétons de sable qualifiés de maigres, avec un dosage en ciment compris entre 150 et 220 kg/m³ [2].

La classe 3 correspond à des bétons de sables dosés entre 250 et 300 kg/m³. Les classes 4 et 5 correspondent à des bétons de sable dosés entre 300 et 370 kg/m³ [2].

II.10.4.2 Chaussées en béton de sable

Le béton de sable peut être utilisé dans une structure de chaussée comme couche de base ou couche de fondation et ce en fonction de l'intensité du trafic [2].

- Chaussées à fort trafic T0 et T1 (2000 à 300 Poids lourds par jour sur la voie la plus chargée): le béton de sable peut être utilisé en couche de fondation. On utilise souvent des bétons de classe 1, 2 et 3 [2]
- Chaussées à trafic moyen : T2 et T3 (300 à 100 Poids lourds par jour sur la voie la plus chargée): le béton de sable peut être utilisé dans ce cas [2] :
 - a- En couche de fondation
 - b- En dalles épaisses goudonnée ou armée, revêtue en béton bitumineux très mince
 - c- En dalles de bétons de sable armé continu revêtu d'un béton bitumineux très minceLes bétons de sable utilisés doivent être dosés entre 200 et 300 kg/m³ de ciment.
- Chaussées à faible trafic : T4 et T5 (inférieurs à 100 Poids lourds par jour sur la voie la plus chargée): Le béton de sable est utilisé généralement dans ce cas en dalles épaisses. Les bétons de sable utilisés doivent être dosés entre 200 et 300 kg/m³ de ciment [2].

La résistance mécanique et la compacité seront améliorées dans ce cas par l'ajout d'éléments fins (Sablo). Les joints seront sciés ou moulés tous les 3 à 4 m. Comme pour les bétons traditionnels la rugosité de surface est obtenue par balayage ou striage [2].

Si la friabilité du sable utilisé est supérieure à 20, il faudra prévoir en surface soit un cloutage, soit un béton bitumineux très mince, soit un enduit [2].

II.10.4.3 Les bétons de sables compactés pour chaussées

La bibliographie parle peu de la technique du béton de sable compacté pour le corps de chaussées.

Le béton de sable compacté n'est autre qu'un béton de sable sec à consistance ferme mis en place par un finisseur et subissant un compactage par des compacteurs vibrants afin d'améliorer sa compacité en place et donc ses performances mécaniques. Les structures de chaussées en béton de sable compacté sont limitées aux trafics inférieurs à la classe T1 (moins que 300 poids

lourds par jour sur la voie la plus chargée) et dans des conditions climatiques pas trop sévères. Le dosage en liant, qui pourra être soit du ciment, soit un liant routier, sera compris entre 250 et 330 kg/m³ [2]. Le dosage en eau sera plus faible qu'un béton de sable ordinaire puisqu'il s'agit d'un béton sec mis en place par compactage. Le faible dosage en eau permet de réduire un peu le dosage en ciment mais surtout donne l'espoir d'obtenir un retrait hydraulique faible. On prévient la fissuration spontanée de la chaussée en réalisant des joints, qui sont de préférence sciés dans le béton jeune. Ces joints sont généralement espacés de 4 à 5 m [2].

Lors de la fabrication, la teneur en eau devra être parfaitement contrôlée, sinon la mise en œuvre deviendra très délicate voire même impossible. Les bétons de sable compactés recevront en surface selon l'importance du trafic soit une couche de roulement en béton bitumineux (BB), soit un revêtement en béton bitumineux très mince (BBTM), soit un enduit [2].

II.11 Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art sur le BCR et les facteurs de base qui contrôlent son comportement. La synthèse bibliographique montre que le BCR est un matériau performant, économique et durable. Le choix de formulation et mode de compactage sont l'indice de son comportement.

Le béton de sable peut être utilisé dans les corps de chaussées. En effet, l'utilisation du béton de sable comme couche de chaussée est justifiée surtout par l'économie sur le coût des matériaux que cette solution permet de réaliser et par les conséquences positives sur l'environnement que peut entraîner l'utilisation de ce matériau en corps de chaussée.

CHAPITRE III :

Matériaux et Procédures Expérimentales

Chapitre III

Matériaux et Procédures Expérimentales

III.1 Introduction

Le but de ce présent travail, est une contribution à la valorisation des granulats de caoutchouc à faible coût et provenant d'une source renouvelable et de l'intégrer d'une façon rationnelle dans le béton de sable autoplaçant (BSAP) et le béton de sable compacté (BSC) et évaluer l'effet de l'ajout de granulats de caoutchouc sur les propriétés des BSAP et des BSC à l'état frais et à l'état durci.

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons les matériaux utilisés, les formulations et le programme expérimental que nous avons mené dans cette étude.

Dans la deuxième partie, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale, dans le but d'une bonne interprétation des différents résultats expérimentaux sur les bétons de sable autoplaçant (BSAP) et les bétons de sable compacté (BSC) à base de granulats de caoutchouc.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment de classe CPJ- CEMII/A 42.5, provenant de la cimenterie de Hadjar Soud (Wilaya de Skikda, Algérie), répondant à la norme algérienne NA 442/2000, sa masse volumique absolue est 3.15 g/cm^3 et sa surface spécifique $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ses propriétés physico-mécaniques et chimiques sont représentées ci-dessous :

Tableau 3.1. Caractéristiques chimiques du ciment utilisé en % [45].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Caol	PAF
25	5,5	3,3	60	1,5	2,15	0,13	0,45	1,3	1,7

Tableau 3.2 Caractéristiques minéralogique du clinker en % [45].

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
60	17.5	8	11

Tableau 3.3 Caractéristiques physiques du ciment utilisé [45].

Début de prise (min)	70
Fin de prise (min)	180
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.2
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.15
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3300
Retrait à 28j (µm / m)	≤1000

Tableau 3.4 Caractéristiques mécaniques du ciment utilisé [45].

Résistance à la compression (MPA)			Résistance à la flexion (MPA)		
2 jours	7 jours	28 jours	2 jours	7 jours	28 jours
≥ 12,5	≥ 25	≥ 42,5	≥ 3,0	≥ 5,0	≥ 6,5

III.2.2 Sable

Les sables constituent le composant principal du squelette d'un béton de sable. Aucun critère granulométrique n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable, la seule restriction réside dans la propreté (ES > 65) [3].

Le sable utilisé est un sable de dune de la région d'El oued Souf, Ses caractéristiques physiques sont regroupées dans le Tableau 3.5

Tableau 3.5 Caractéristiques physiques du Sable utilisé.

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.64
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.56
Module de finesse	1.2
Equivalent du sable (%)	75
Absorption d'eau (%)	1.62

III.2.3 Caoutchouc

III.2.3.1 Granulats de caoutchouc (0/4mm)

Les granulats de caoutchouc utilisés (GC), issus du broyage mécanique de pneus usagés, proviennent d'une manufacture située dans la ville de Sétif, ils sont utilisés en substitution volumique du sable. La dimension maximale de ces granulats est de 4.0 mm ; leurs masses volumiques absolues et apparentes sont de 0.75 et 0.42 g/cm³ respectivement.

III.2.3.2 Poudrettes de caoutchouc (0/1mm)

Les poudrettes de caoutchouc utilisés (PC), issus du broyage mécanique de pneus usagés, proviennent d'une manufacture située dans la ville de Sétif, ils sont utilisés en substitution volumique du sable. La dimension maximale de ces granulats est de 1.0 mm ; leurs masses volumiques absolues et apparentes sont de 0.94 et 0.40 g/cm³ respectivement.



Figure 3.1 : Granulats de caoutchouc (0/4mm). **Figure 3.2** : Poudrettes de caoutchouc (0/1mm).

Les courbes granulométriques du sable et des granulats de caoutchouc sont présentées sur la même figure pour faciliter la comparaison des distributions granulaires (voir Figure 3.3)

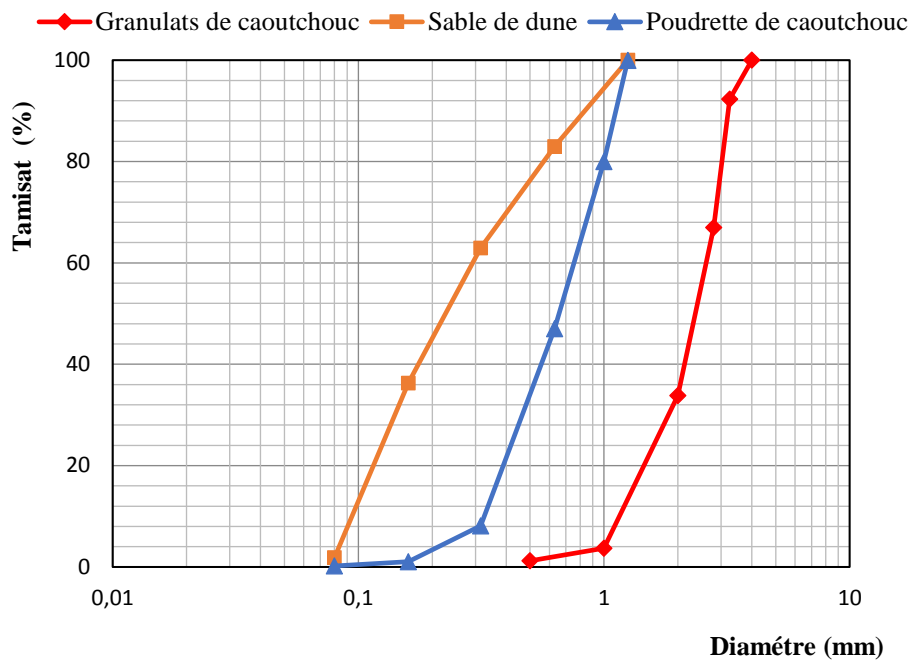


Figure 3.3: Courbes granulométriques du sable et des particules de caoutchouc.

III.2.4 Adjuvant

C'est un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau « Medaplast SP40 » à base d'Éther polycarboxylates, fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued Smar. Sa densité absolue est de 1.2 et sa concentration en particule solide est de 40%.

Tableau 3.6 Caractéristiques physiques du superplastifiant utilisé [46].

Aspect	Liquide
Couleur	Marron
pH	8.2
Densité	1.2
Teneur en chlore	< 1g/ L
Extrait sec	40%

III.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet du laboratoire.

III.3 Formulation de béton de sable autoplaçant (BSAP)

Les bétons de sable étudiés sont confectionnés selon la méthode de formulation théorique de projet de Sablocrete [2].

La méthode de formulation présentée ne cherche pas à obtenir directement des prescriptions issues d'un cahier des charges, mais vise plutôt à optimiser la compacité du béton et à estimer ensuite ces performances potentielles [2].

III.3.1 Formulation de béton de sable autoplaçant (BSAP0)

III.3.1.1. Détermination du dosage en ciment

Le volume de fines égale au volume du ciment, la masse volumique absolue étant de 3150 kg/m³. Le dosage volumique en ciment égale à :

$$[\text{ fines }] = \frac{\text{Masse}}{\text{Masse volumique absolue}} = \frac{400}{3150} = 0.127 \text{ m}^3 = 127 \text{ litres}$$

III.3.1.2. Détermination du dosage en eau

E/C = 0.8 et le dosage de ciment 400 kg/m³.

$$\begin{aligned} \text{Le dosage volumique en eau égale à : } [e] &= \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse volumique absolue d'eau}} = \frac{0.8 \times 400}{1000} \\ &= 0.320 \text{ m}^3 = 320 \text{ litres} \end{aligned}$$

III.3.1.3. Détermination du dosage en superplastifiant

La masse volumique du superplastifiant 1200 kg/m³ et le masse de superplastifiant 2 % du poids de ciment. Le dosage volumique en ciment égale à :

$$[\text{ Superplastifiant }] = \frac{\text{Masse (sp)}}{\text{Masse volumique absolue (sp)}} = \frac{0.02 \times 400}{1200} = 6.7 \text{ litres}$$

III.3.1.4. Détermination du volume de vides :

$$[\text{ Vides }] = k [\text{ eau }] \quad \text{avec } k = 0.2$$

Donc le volume des vides est égal [vides] = 0.2 [320] = 64 litres

III.3.1.5. Détermination du dosage en sable :

D'après la formule exposée par la méthode Sablocrete le dosage volumique du sable égale à :

$$[\text{ Sable }] = 1000 - [\text{ fines }] - [\text{ eau }] - [\text{ vides }] - [\text{ superplastifiant }] \quad (\text{L/m}^3)$$

$$[\text{ Sable }] = 1000 - 127 - 320 - 64 - 6.7 = 482.3 \text{ litres.}$$

La masse volumique absolue de sable est égal 2640 kg/m^3 , le dosage pondéral du sable égal $1273,27 \text{ kg}$.

Pendant la préparation des éprouvettes, on a constaté que le volume calculé est inférieur au volume réel. Cela est dû à :

- Le modèle utilisé pour le calcul du volume des vides qui surestime celui-ci
- Les valeurs de la masse volumique absolue ne sont pas des valeurs précises, elles entraînent une certaines erreurs dans le calcul du dosage en ciment et en sable.
- Réglage du rendement de la formule : On réalise une gâchée, on mesure la masse volumique et on la compare à la masse volumique théorique. Si les deux masses volumiques sont différentes, on doit corriger le dosage en sable.

Après l'ajustement de la formulation, on a trouvé un dosage en sable égale à 1307 kg . Pour les autres, on a fait des substitutions volumiques du sable par les poudrettes de caoutchouc.

Le Tableau 3.7 montre les différentes formulations réalisées.

Tableau 3.7 Propositions des mélanges (1m^3)

Désignation du mélange	Teneur en caoutchouc (%)	Ciment (kg)	Sable (kg)	Poudrettes de caoutchouc (kg)	Eau (L)	Adjuvant (kg)	E/C (%)
BSAP0	0	400	1307	0	320	8	0.8
BSAP10	10	400	1178.1	36.75	320	8	0.8
BSAP20	20	400	1047.2	74.25	320	8	0.8
BSAP30	30	400	916.3	111.75	320	8	0.8

III.4 Techniques expérimentales de BSAP

III.4.1 Malaxage

Le malaxage a été effectué à l'aide d'une bétonnière à axe vertical. La séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- Malaxage à sec pendant 60 secondes des constituants granulaires (ciment, sable, poudrettes de caoutchouc)
- Introduction de 70% de l'eau de gâchage, puis malaxage pendant 1 minutes
- Introduction de l'adjuvant avec le reste de l'eau de gâchage et malaxage pendant 2 minutes.

La mise en moule a été effectuée immédiatement après la fin de malaxage afin que l'expansion du matériau ne se produise pas à l'intérieur de la cuve de malaxeur; les éprouvettes ont été coulées dans des moules (4x4x16) cm³ préalablement huilés (Figure 3.4)

Une fois coulés, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage est effectué après une durée de 24 heures. Les éprouvettes destinées aux essais mécaniques ont été soumises à une cure dans l'eau jusqu'à la date d'essais. Les éprouvettes destinées à l'évaluation du retrait ont été conservées à l'air libre du laboratoire.

Il est à noter que pour les différents mélanges de béton, trois éprouvettes ont été utilisés pour effectuer chaque essai.



Figure 3.4: Lubrification des moules (4x4x16) cm³

III.5 Caractéristiques de BSAP

III.5.1 A l'état frais :

Pour caractériser le comportement des bétons de sable autoplaçant (BSAP) à l'état frais, nous avons réalisé les essais suivant :

III.5.1.1 : Etalement au cône d'Abrams :

L'essai d'étalement et le temps T_{500} constituent un essai destiné à évaluer la mobilité et la vitesse d'écoulement du béton auto-plaçant en l'absence d'obstacle. Cet essai est basé sur l'essai d'étalement décrit dans la norme EN 12350-8 (NF EN 12350-8, 10) [47], il permet d'indiquer l'aptitude à l'écoulement du béton autoplaçant. Le temps T_{500} constitue une mesure de la vitesse d'écoulement est indication de la viscosité apparente du béton auto-plaçant.

L'essai d'étalement est réalisé à l'aide du cône d'Abrams (Figure 3.5). En effet, L'étalement est calculé par une moyenne de deux diamètres D_1 et D_2 en mm. D_1 et D_2 sont respectivement le diamètre de la galette.

$$D_{\text{moyenne}} = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

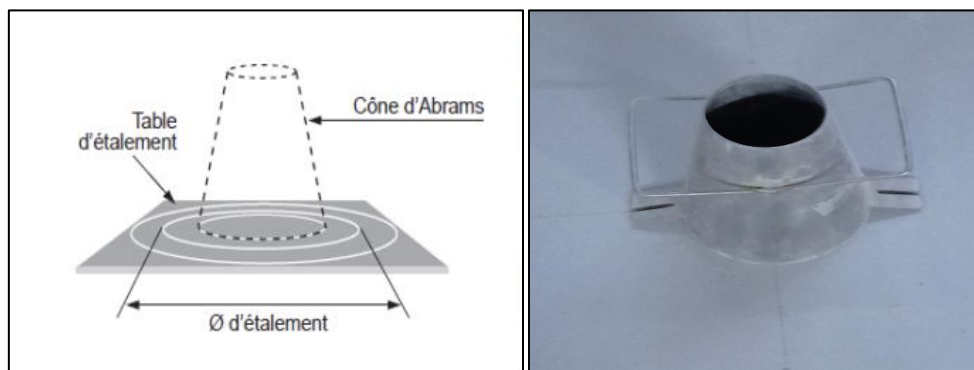


Figure 3.5: Etalement au cône d'Abrams

III.5.1.2 : Ecoulement à l'entonnoir (V-Funnel) :

L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V permet d'évaluer la viscosité et la capacité de remplissage du béton autoplaçant.

Un entonnoir en forme V est rempli de béton frais jusqu'en haut, d'un volume de 12 litres (Figure 3.6) Le clapet de fermeture situé à la base est ensuite ouvert, ce qui provoque

l'écoulement du béton, dont on mesure le temps jusqu'à ce que l'entonnoir soit vide. Cet essai décrit dans la norme (NF EN 12350-9, 10) [48].

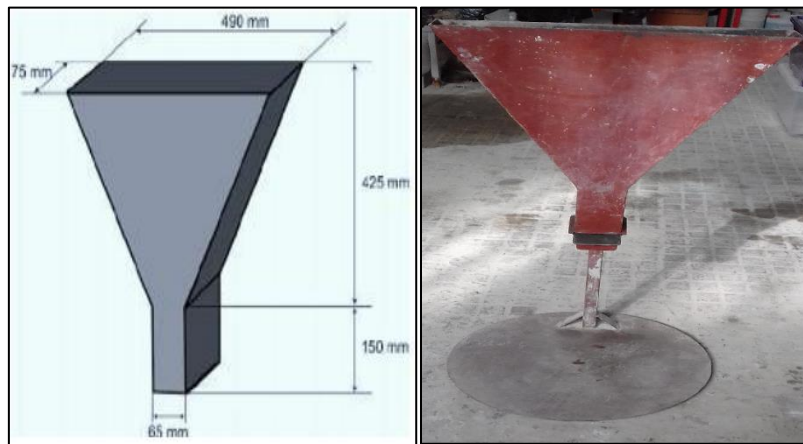


Figure 3.6 : Ecoulement à l'entonnoir (V-Funnel)

III.5.1.3 : Teneur en air occlus :

Suivant la norme NF EN 12350-7 [49], on peut évaluer la quantité d'air occlus dans un béton frais à l'aide d'un aéromètre à béton d'une capacité au moins égale à 1 litres. L'essai consiste à appliquer à un volume connu de béton une pression donnée qui va comprimer le volume d'air occlus (loi de Mariotte). La teneur en air du béton est lue directement sur l'affichage gradué de l'aéromètre (Figure 3.7)



Figure 3.7 : Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre.

III.5.2 A l'état durci :

III.5.2.1 La masse volumique à sec :

La masse volumique du béton durci est déterminée pour les différents béton confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN 12390-7 [50]. Après la cure à l'eau, les éprouvettes ont été saturées d'eau. Afin de pouvoir réaliser d'éventuelle essais il a fallu sécher les éprouvettes dans l'étuve à la température 70 degré. Nous avons dans un premier temps séché les éprouvettes dans l'étuve jusqu'à la masse constante. Une fois la masse constante obtenue, nous avons mesuré les dimensions des éprouvettes pour déterminer le volume. La masse constante trouvée et le volume calculé, nous avons pu déterminer la masse volumique de chaque éprouvette à l'état sec. La masse volumique est obtenue en divisant la masse par le volume correspondant aux dimensions des éprouvettes, la masse volumique du mortier durci ρ sera:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

III.5.2.2 Résistance à la traction par flexion :

Cet essai est établi suivant la norme EN 196-1 [51]. La (Figure 3.8) présente le dispositif à rouleau utilisé en flexion trois points ; comportant deux appuis à rouleau distant de 100 mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique 40x40x160 mm, et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée F_f .

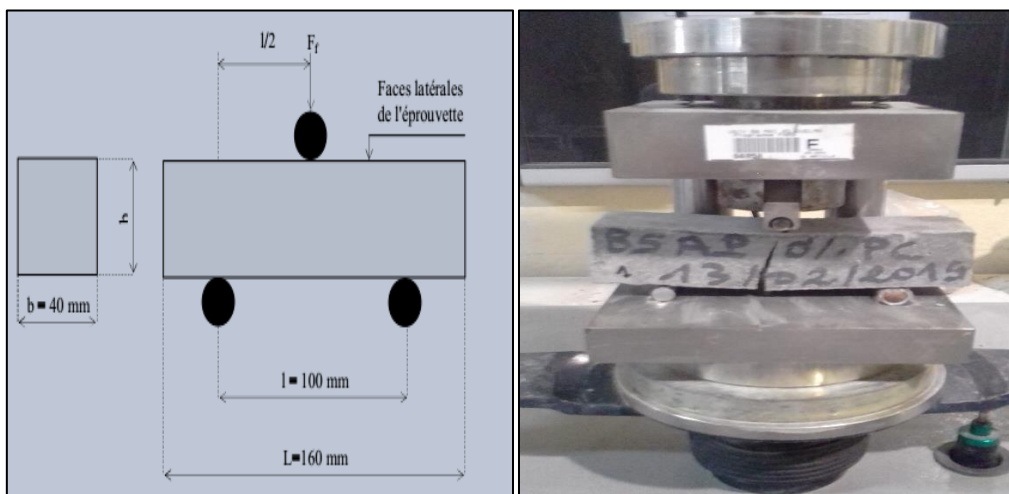


Figure 3.8 : Essai de traction par flexion 3 points sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

La formule qui nous permet de calculer la résistance à la traction par flexion est comme suit :

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot L}{b^3}$$

Où :

R_f : Résistance à la flexion en MPa.

F_f : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion N.

L : Longueur qui sépare les deux appuis inférieurs en mm.

b : Côté de l'éprouvette en mm.

III.5.2.3 Résistance à la compression :

Cet essai est régi suivant la norme EN 196-1 [51], exécuté avec une presse (Figure 3.9) pour matériaux durs, comportant une mâchoire inférieure fixe et une mâchoire supérieure mobile.

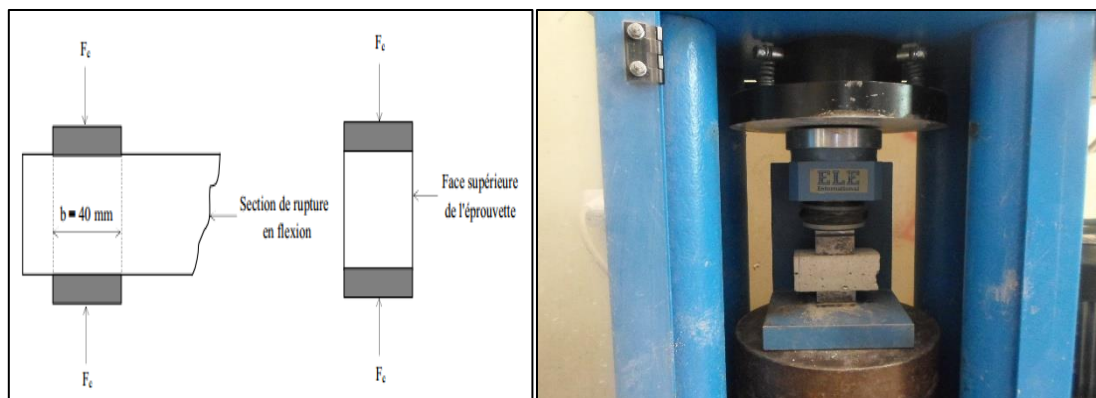


Figure 3.9 : Essai de compression sur les éprouvettes (4x4x16) cm³

La formule qui nous permet de calculer la résistance à la compression est comme suit :

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

R_c : Résistance à la compression en MPa.

F_c : Charge de rupture en N.

b : Côté de l'éprouvette en mm.

III.5.2.4 Retrait

L'objectif de cet essai de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires.

Cet essai est régi suivant la norme selon la norme NF P15-433 [52]. Cette mesure a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées à l'air ambiant du laboratoire.

Les variations dimensionnelles ont été déterminées à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage digital.

III.5.2.5 Absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5 [53]. Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette de dimension (4 x 4 x 16) cm du béton posée à sa base sur des petits supports dans un bac à eau de telle manière que seuls les 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un film plastique sur toutes les autres faces, le bac d'eau muni d'un système d'alimentation automatique en eau permet de maintenir le niveau d'eau constant tout le long de l'essai. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps jusqu'à 24h. A chaque échéance, l'éprouvette est sorti du récipient, pesée (M) et replacée dans le récipient en position vertical (Figure 3.10).

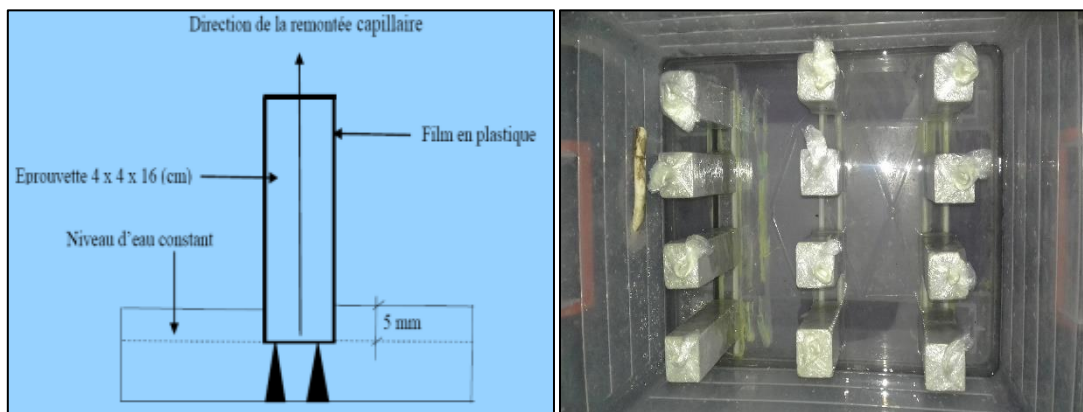


Figure 3.10 : Dispositif de l'essai d'absorption d'eau par capillarité.

L'essai a pour but de déterminer l'absorption capillaire CA, par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \quad (\text{g/mm}^2)$$

M_0 : Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes.

M_j : Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

S : Section de la base de l'éprouvette en millimètre carré.

III.5.3 Méthode des plans d'expériences

III.5.3.1 Introduction

Grace au déploiement de la qualité dans les entreprises et à un accès aux moyens de calcul, les plans d'expériences prennent une place plus importante. Les applications des plans d'expériences permettent une recherche expérimentale planifiée appelée (plans d'expériences). Elle aidera l'expérimentateur à construire sa méthode expérimentale de différentes manières, à affronter et vérifier sa propre hypothèse, à mieux comprendre le phénomène à l'étude et à résoudre le problème.

Cette technique a été déjà dans le domaine des matériaux de construction de par le monde et aussi en Algérie, pour l'étude des bétons de sable (Étude des effets du cobroyage d'un sable et d'un clinker sur les propriétés d'un béton de sable). Ce travail a été réalisé par Z. Boudaoud et D. Breyse [54]. Aussi pour la formulation des bétons résineux (Experimental Plans Method to Formulate a Resin Concrete). Ce travail a été réalisé par Beddar et al [55].

Dans ce qui suit, nous donnons un simple aperçu sur la technique des plans d'expériences, nous invitons le lecteur à d'autres sources spécialisées en la matière.

III.5.3.2 Définition

Le plan d'expérience est une série d'essais complètement pré-organisés, dont la méthode est déterminée dans un minimum d'essais Précision maximale, influence de divers paramètres possibles pour optimiser les performances du système étudié [56].

Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche un modèle capable de nous donner la réponse du système pour une configuration quelconque des facteurs [57].

La compréhension des méthodes de conception expérimentale repose sur deux concepts de base, à savoir le concept d'espace expérimental et le concept de modélisation mathématique de la quantité recherchée [58].

$$Y = f(x_i)$$

III.5.3.3 Terminologie

Avant de commencer à développer une conception expérimentale, il est important de comprendre la terminologie spécifique qui lui est associée.

➤ Facteurs

Un facteur est un paramètre qui peut varier d'une expérience à l'autre et qui affecte le résultat final (réponse). Le nombre de facteurs impliqués est généralement supérieur au nombre de réponses. Distinguer deux types de facteurs [59]:

- **Facteur quantitatif** : Facteurs dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue par exemple le dosage en ciment, pourcentage d'adjuvant, masse de sable. Et rarement à variation discontinue dans le cas de classes de ciment par exemple.

- **Facteur qualitatif** : Tout facteur non mesurable, tel que la nature ou le type d'agrégats.

➤ Niveau des facteurs

C'est la délimitation du domaine de variation d'un facteur donné. En général, la variation de chaque facteur dépend du type de plan d'expériences qu'on veut réaliser, est délimitée par deux niveaux : un niveau supérieur et un inférieur.

➤ Valeurs centrées réduites

Par commodité et pour l'analyse des résultats, nous avons remplacé la valeur réelle V du facteur par la variable centrée réduite v et qui est égale à :

$$v = \frac{2V - (V^+ + V^-)}{(V^+ - V^-)}$$

Avec V^+ et V^- : les valeurs extrêmes de la variable réelle V du domaine expérimental, à qui correspond respectivement les valeurs centrées réduites $+1$ et -1 .

Ainsi, tous les coefficients du modèle possèdent alors, et ce quelle que soit leur plage de variation respective, la même unité, celle de la réponse. En plus, du fait de la normalisation des variables, l'amplitude du coefficient multiplicateur est directement liée au degré de sensibilité de la réponse au facteur ou à l'interaction [60].

➤ **Domaine expérimental**

Le domaine expérimental est représenté par un polyèdre à k dimensions, où k est le nombre de facteurs considérés. Chaque côté du polyèdre est défini par deux niveaux extrêmes qui caractérisent le facteur correspondant au côté.

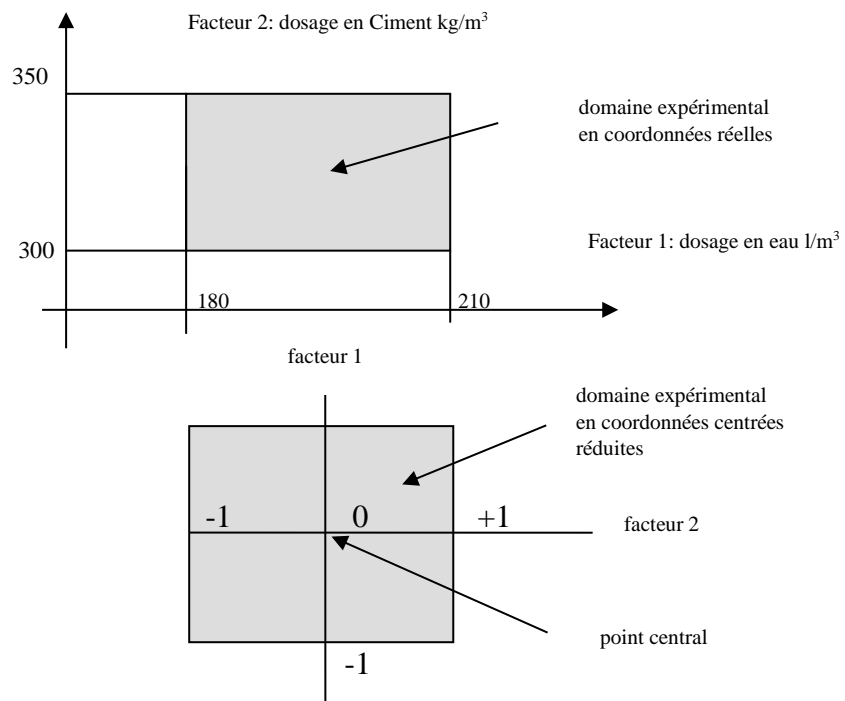


Figure 3.11 : Transformation des coordonnées réelles en coordonnées centrées réduites [60].

➤ **Réponses**

Les réponses sont les propriétés à mesurer pour la variation d'un facteur.

➤ **Effet**

L'influence du facteur X sur la réponse Y est obtenue en étudiant l'évolution de la valeur Y en fonction de la valeur X. Si le facteur X interagit avec lui-même, nous l'appelons un effet quadratique. Il est représenté par le coefficient multiplicateur de X dans le modèle mathématique de la réponse. La significativité de l'influence de X sur Y est donnée par des tests statistiques.

➤ **Interaction**

On dit qu'il y a interaction entre deux facteurs X et X' si l'effet de X dépend du niveau de X' et inversement. Cette interaction est notée interaction XX' ou interaction X'X.

III.5.3.4 Conditions d'application des plans d'expériences

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaire multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées [61].

▪ **Condition 1**

La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur ou que celle-ci soit très négligeable.

▪ **Condition 2**

La réponse doit être homoscédastique. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

III.5.3.5 Avantages des plans d'expériences

Les plans d'expériences permettent une réduction substantielle des tests et des explications rapides et claires. Ils fournissent des résultats faciles à présenter [60].

- possibilité d'étudier un très grand nombre de facteurs.
- détection des interactions éventuelles
- modélisation aisée des résultats
- détermination des résultats avec une bonne précision.

III.5.3.6 Méthodologie des plans expérimentaux

Les principales étapes à suivre pour mettre en œuvre les techniques des plans d'expériences sont les suivantes comme suit:

- Définition des facteurs d'entrée (X_i) et de sortie (Y_i) étudiés et du domaine expérimental
- Construction du plan d'expériences.
- Réalisation de l'expérimentation.
- Analyse statistique des résultats.
- Modélisation et optimisation de la fonction de réponse.

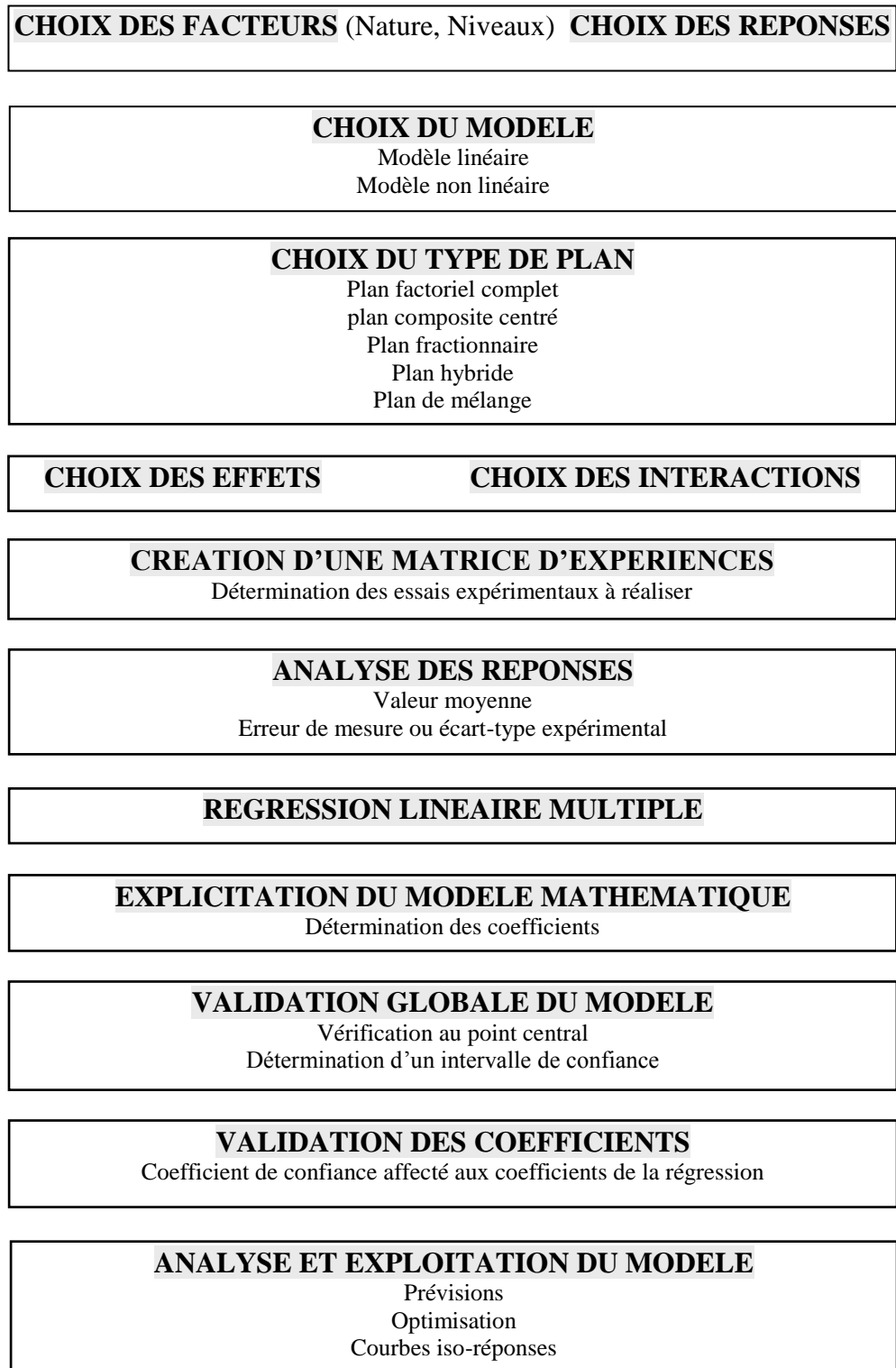


Figure 3.12 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences [60].

III.5.3.7 Types de plans d'expériences

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires etc. Nous nous intéressons particulièrement au plan factoriel complet.

III.5.3.7.1 Plans factoriels complets (n^k):

Ce sont des plans d'expériences comprenant k facteurs, chacun de leurs facteurs possédant n niveaux, d'où le terme n^k . Ces plans permettent de répondre de façon optimale aux questions suivantes [62,58]:

- quels facteurs ont une influence sur le phénomène étudié?
- si influence il y a, que vaut-elle?
- y a t-il des interactions entre facteurs et comment jouent-elles?

Dans ce genre de plans d'expériences on étudie toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs testés. Les insuffisances avec la méthode d'expérimentation ne faisant varier qu'un seul facteur à la fois sont donc totalement éliminées.

Exemple: nombre de facteurs = 3 ($X_1 ; X_2 ; X_3$) , nombre de niveaux = 2

Donc $2^3 = 8$ expériences sont nécessaires afin d'établir le modèle mathématique linéaire avec les interactions d'ordre 1 et l'interaction d'ordre 2.

Le modèle mathématique complet de la réponse (tous les facteurs et interactions possibles) s'écrit :

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_{12} X_1 X_2 + A_{13} X_1 X_3 + A_{23} X_2 X_3 + A_{123} X_1 X_2 X_3$$

Et sous forme matricielle:

$$[Y] = [X][A]; \quad \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{23} \\ A_{123} \end{bmatrix}$$



Matrice des effets

A_{ij} : Constantes du modèle à déterminer ;

Y_i : Les réponses du système.

Principe de construction de la matrice des effets:

- Colonne 1: pour la détermination de la constante A_0 ;
- Colonne 2: Colonne du premier facteur; Alternance de -1 et +1;
- Colonne 3: Colonne du second facteur; Alternance de -1 et +1 de 2 en 2;
- Colonne 4: Colonne du troisième facteur; Alternance de -1 et +1 de 4 en 4;
- Puis de 8 en 8 (s'il y a un quatrième facteur) etc.
- Les colonnes des interactions $X_i X_j$ s'obtiennent en multipliant ligne à ligne les colonnes des facteurs X_i et X_j .

Et ce modèle mathématique s'appliquera dans le domaine expérimental suivant:

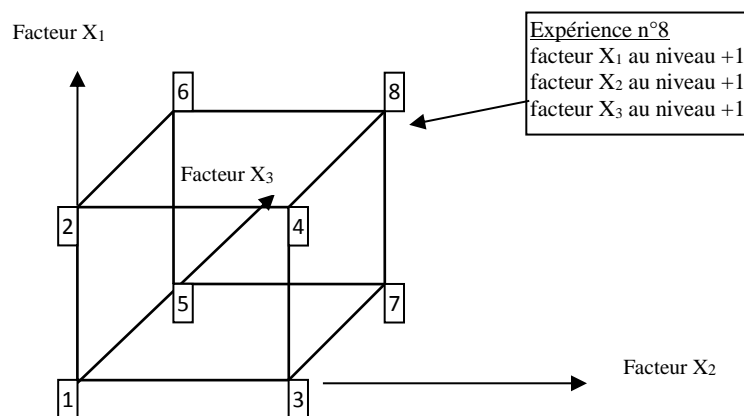


Figure 3.13 : Domaine expérimental

III.6 Formulation de béton de sable compacté (BSC)

Le béton de sable compacté est un béton de sable ferme utilisé pour le corps des chaussées, mis en œuvre par compactage. Il présente une solution économique pour la construction des chaussées surtout pour les pays où le sable se trouve en abondance mais dépourvus de granulats de gros calibres.

L'étude de formulation du béton de sable a été menée en utilisant la méthode expérimentale proposée par le projet de recherche et de développement Sablocrete [2]. Cette méthode s'adapte bien avec les mélanges des bétons compactés destinés aux projets routiers.

Les étapes de la méthode expérimentale Sablocrete [2] :

- Choix du dosage en ciment
- Fixation d'une teneur en eau
- Calcul du dosage en sable : par soustraction à partir de 1 m^3 de la somme des volumes de tous les autres constituants.
- Réglage du rendement de la formule : On réalise une gâchée, on mesure la masse volumique et on la compare à la masse volumique théorique. Si les deux masses volumiques sont différentes, on doit corriger le dosage en sable.
- Contrôles des résistances

Nous avons introduit une nouvelle étape que nous avons jugée essentielle pour le béton de sable mis en place par compactage. Il s'agit du réglage de la teneur en eau pour obtenir un béton ferme qui puisse être compacté sur chantier. D'où l'introduction de l'étape :

- Ajuster le dosage en eau en utilisant un dosage en eau égal à la teneur en eau optimum (W_{opt}) dans le mélange. Elle est déterminée par la relation densité sèche et la teneur en eau suivant le mode opératoire de l'essai Proctor modifié (ASTM D1557) [63].

III.6.1 Énergie Proctor :

L'essai Proctor modifié est utilisé en génie géotechnique pour évaluer la relation entre la teneur en eau et la densité sèche du sol. Pour une énergie de compactage spécifiée: un marteau (4,5 kg) tombe (457 mm) plusieurs fois sur le matériau coulé en 5 couches dans un moule CBR. Cet essai est réalisé selon la norme française NF 94-093 [64]. L'essai a été principalement utilisé avec des bétons secs et maigres [65] pour barrages, routes et chaussées. Il est facile et rapide à réaliser; il convient aux mélanges de béton à faible affaissement qui ne peuvent pas être testés avec des tests de maniabilité conventionnels. L'essai est simple et l'appareil est portable et peu coûteux.

L'objectif est de déterminer la teneur en eau, ce qui donne le meilleur compactage avec une énergie de compactage constante. Nous déterminons la teneur en eau optimale (W_{opt}) et la densité sèche maximale. Nous avons utilisé quatre énergies de compactage comme indiqué dans le Tableau 3.8.

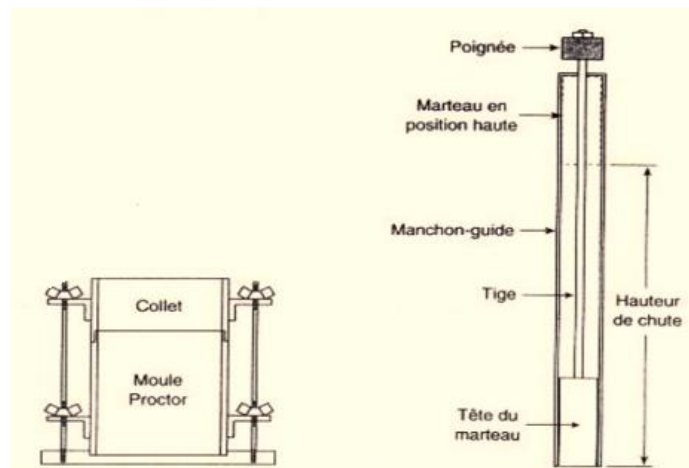


Figure 3.14 : Moule et marteau manuel de l'essai Proctor modifié [64].

Tableau 3.8: Energie de compactage

Désignation Ei	Nombre de couches	Nombre de coups par couche	Energie de compactage (KJ / dm ³)	Ei/E1
E1	5	10	1.072	1
E2	5	15	1.608	1.5
E3	5	25	2.680	2.5
E4	5	35	3.752	3.5

III.6.2 Formulation de BSC en première partie :

Pour nous donner une idée de la teneur en eau des bétons de l'étude, nous avons incorporé des granulats de caoutchouc (0/4 mm) issus du recyclage de pneus usagés en substitution volumique du sable avec trois substitutions volumétriques 10, 20, 30 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

Les mélanges des bétons de sable compactés suivants voir (Tableau 3.9) et (Tableau 3.10) ont été étudiés dans la première étape.

Tableau 3.9 : Mélanges du béton de sable compacté en première étape

Désignation du mélange	% des granulats de caoutchouc	Energie de compactage
BSC 0% GC	0	E2
BSC 0% GC	0	E3
BSC 10% GC	10	E2
BSC 10% GC	10	E3
BSC 20% GC	20	E2
BSC 30% GC	30	E2

Tableau 3.10 : Proportions des mélanges des bétons utilisés en première étape (1m³)

Désignation du mélange	Teneur en caoutchouc (%)	Ciment (kg)	Sable (kg)	Granulats de caoutchouc (kg)
BSC0	0	300	1860	0
BSC10	10	300	1674	65.8
BSC20	20	300	1488	132.5
BSC30	30	300	1302	198.3

III.6.3 Formulation de BSC en deuxième partie :

Dans la deuxième étape, nous avons utilisés deux types des particules de caoutchouc (granulats de caoutchouc (0/4mm) et poudrettes de caoutchouc (0/1mm)), quatre substituts volumiques 10,30,40,50% et quatre énergies de compactage E1, E2, E3, E4 (voir le Tableau 3.8). La substitution quantitative des particules de caoutchouc a été effectuée dans les proportions suivantes : 50% granulats de caoutchouc (0/4mm) et 50 % poudrettes de caoutchouc (0/1mm).

Les mélanges des bétons de sable compactés suivants (voir Tableau 3.11) ont été étudiés dans la deuxième étape.

Tableau 3.11 : Proportions des mélanges des bétons utilisés en deuxième étape (1m³)

Désignation du mélange	Energie de compactage	Particules caoutchouc (%)	Ciment (kg)	Sable (kg)	Granulats de caoutchouc (0-4) (kg)	Poudrettes de caoutchouc (0-1) (kg)	Eau (L)
BSC 0	E1	0	300	1860	--	--	129.6
	E2						
	E3						
	E4						
BSC 10	E1	10	300	1674	32.9	26.25	132.15
	E2						
	E3						
	E4						
BSC 30	E1	30	300	1302	99.17	79.12	135.3
	E2						
	E3						
	E4						
BSC 40	E1	40	300	1116	132.54	105.75	137.4
	E2						
	E3						
	E4						
BSC 50	E1	50	300	930	165.4	132	138.9
	E2						
	E3						
	E4						

III.7 Techniques expérimentales de BSC

III.7.1 Malaxage

Le malaxage a été effectué à l'aide d'une bétonnière à axe horizontale. La séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- Malaxage à sec pendant 60 secondes des constituants granulaires (ciment, sable, granulats de caoutchouc).
- Faire reposer le mélange pendant 1 minute.
- Introduire progressivement l'eau de gâchage et malaxage pendant 2 minute.

III.7.2 compactage

Un compactage est appliqué aux éprouvettes au moment de leur fabrication. Nous avons utilisé quatre énergies de compactage (voir Tableau 3.8).

III.7.3 Démoulage

Le démoulage est effectué après une durée de 24 heures. Les éprouvettes destinées aux essais mécaniques ont été soumises à une cure dans l'eau jusqu'à la date d'essais.

Il est à noter que pour les différents mélanges de béton, trois éprouvettes ont été utilisés pour effectuer chaque essai.

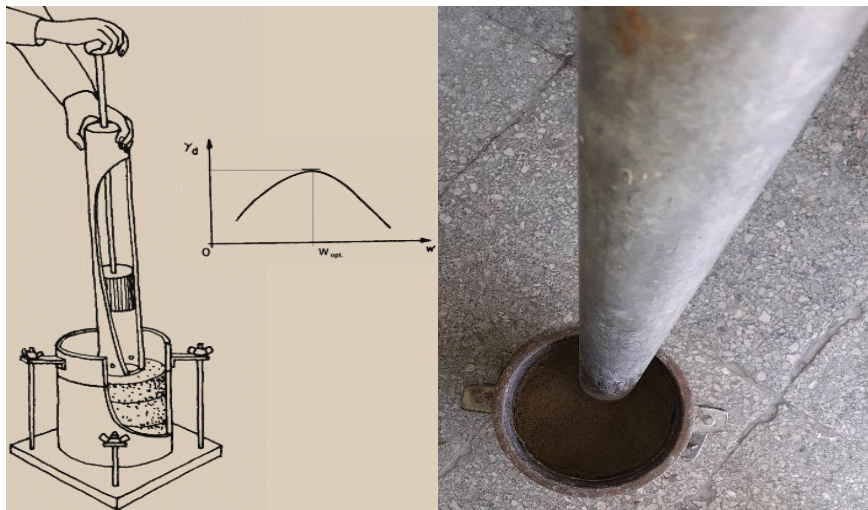


Figure 3.15 : Compactage des éprouvettes cylindriques avec une dame CBR.

III.8 Caractéristiques de BSC

III.8.1 A l'état frais :

Pour caractériser le comportement des bétons de sable compacté (BSC) à l'état frais, nous avons réalisé les essais suivant :

III.8.1.1 La masse volumique à l'état frais :

Cette mesure détermine le rendement volumique de la composition du béton frais et permet de vérifier la validité de la formulation théorique.

Pour effectuer cette mesure, on utilise un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement du béton et le peser. La masse volumique du béton est le rapport entre la masse du béton et son volume.

III.8.1.2 L'essai Vébé :

C'est un essai qui est défini par la norme NF EN 12350-3 [66]. Spécialement destiné à tester les bétons à faible ouvrabilité. Il nous permet de mesurer le temps nécessaire en secondes que met un cône de béton avec ou sans gravier pour s'écouler à l'intérieur d'un moule posé sur une table vibrante (Figure 3.16).

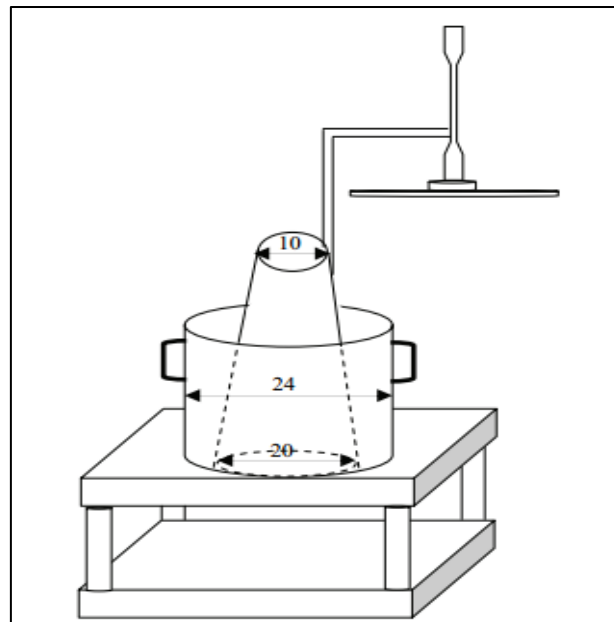


Figure 3.16 : Essai Vébé

III.8.2 A l'état durci :

III.8.2.1 Résistance à la compression :

Généralement, la résistance du béton compacté, comme celle du béton, est caractérisée par la valeur à 28 jours. Cependant, on considère qu'il est important de connaître l'évolution de cette résistance en fonction du temps. Cette évolution est nécessaire lors de l'exploitation du béton compacté. Pour cela, nous avons effectué des tests à 7, 28 jours.

La résistance à la compression est la propriété la plus significative notamment pour le béton, mais la résistance à la traction représente également un intérêt particulier pour le béton compacté. Ces deux types de résistance sont étroitement liés et le rapport direct de proportionnalité dépend principalement du niveau total de résistance du béton compacté.

Une fois l'optimum Proctor (W_{opt}) estimé, nous avons fabriqué des éprouvettes afin de déterminer leurs résistances mécaniques et de les comparer avec celles du béton témoin (sans substitution).

Pour l'essai de résistance, plusieurs éprouvettes cylindriques ont été moulées et testées à 7, 28 jours.

L'essai de résistance à la compression a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme NF EN 12390-3 [67].

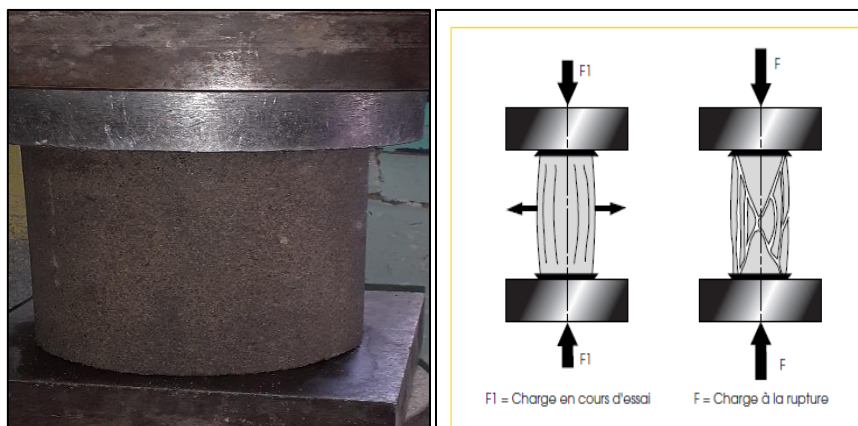


Figure 3.17 : Essai de compression

III.8.2.2 Résistance à la traction par fendage :

L'essai de résistance à la compression a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme NF EN 12390-6 [68]. L'éprouvette cylindrique est placée horizontalement entre les plateaux d'une machine de compression. La rupture de l'éprouvette se fait suivant une fissure verticale (fendage).

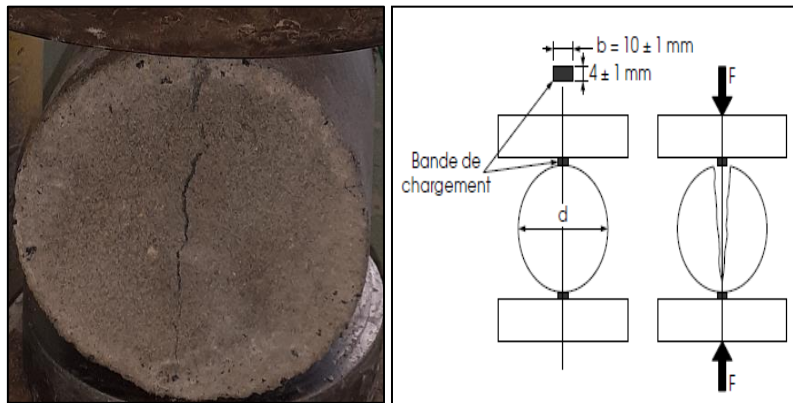


Figure 3.18 : Essai de traction par fendage

La résistance en traction par fendage R_t (MPa) est déduite de la formule ci-après :

$$R_t = \frac{2xF}{\pi \times L \times d} \quad (\text{MPa})$$

F : charge maximale atteinte (N)

L : longueur de la ligne de contact de l'éprouvette (mm)

d : diamètre nominal de l'éprouvette (mm)

III.9 Conclusion

Ce chapitre traite les différentes caractéristiques des matériaux utilisés pendant la démarche expérimentale pour la confection des bétons envisagés. La valorisation de ces bétons en technique routière requiert la connaissance de leurs caractéristiques mécaniques et de leur comportement.

Divers essais de caractérisation des matériaux et des bétons frais et durcis relatifs aux propriétés physico-chimiques, d'ouvrabilité et mécanique (résistance mécanique, absorption d'eau par capillarité, retrait) ont été réalisés.

CHAPITRE IV :

***Effet des granulats caoutchouc sur
les propriétés des bétons de sable
Autoplaçant (BSAP)***

Chapitre IV

Effet des granulats caoutchouc sur les propriétés des bétons de sable Autoplaçant (BSAP)

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions les effets probables de l'introduction des granulats caoutchouc sur les propriétés du BSAP aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Nous exposons les résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les BSAP incorporant les granulats de caoutchouc (0/1mm), conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre 3 de cette mémoire.

Les résultats présentés dans ce chapitre touchent d'une part les propriétés du béton de sable autoplaçant (BSAP) à l'état frais; à savoir l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel), et la teneur en air occlus, et d'autre part les propriétés à l'état durci; à savoir la résistance mécanique en compression et en traction par flexion, le retrait et l'absorption d'eau par capillarité.

Nous utilisons également une nouvelle technique appelée "plan d'expérience" qui permet à la fois de rationaliser la programmation des essais et d'établir une modélisation empirique des réponses obtenues en fonction des paramètres de l'étude.

IV.2 Caractéristiques de BSAP

IV.2.1 A l'état frais :

IV.2.1.1 La masse volumique à l'état frais:

La Figure 4.1 illustre la relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à l'état frais de BSAP.

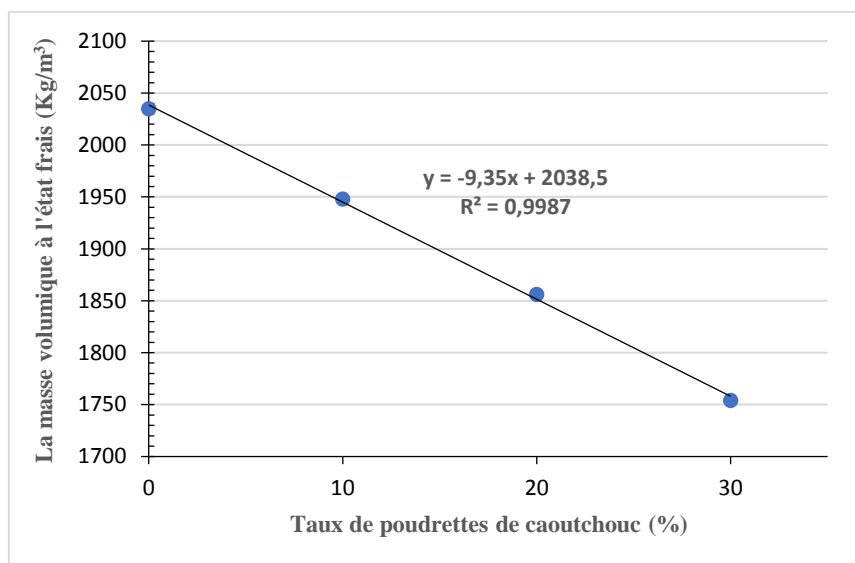


Figure 4.1 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à l'état frais de BSAP

La masse volumique varie en effet de 2037 à 1754 kg/m³. Cet allègement peut s'expliquer par la faible masse volumique des poudrettes de caoutchouc utilisés ($M_v=940$ kg/m³) par rapport à celle du sable remplacé ($M_v=2640$ kg/m³). Ces résultats sont crédibles et concordent bien avec les données bibliographiques [69,70].

IV.2.1.2 Affaissement au cône d'Abrams :

La Figure 4.2 illustre l'effet de l'introduction des poudrettes de caoutchouc sur l'étalement au cône d'Abrams du BSAP l'état frais.

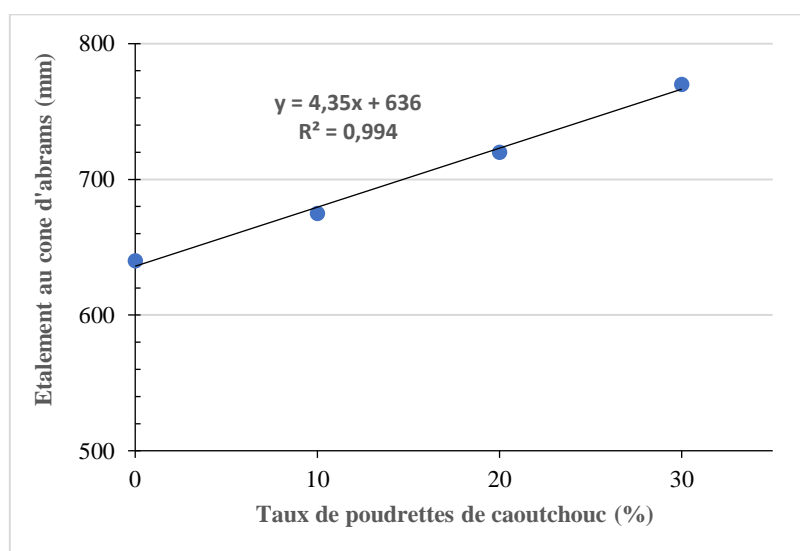


Figure 4.2 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et l'étalement au cône d'Abrams de BSAP

Les résultats présentés sur la Figure 4.2 montrent que tous les BSAP ont des valeurs d'affaissement situées à l'intérieur de l'intervalle recommandé par la norme (NF EN 12350 – 8,10). Les étalements obtenus étaient compris entre 64 à 77 cm. L'incorporation des granulats caoutchouc dans les bétons de sable autoplaçant (BSAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant l'augmentation de l'affaissement lorsqu'en augmente le taux granulats de caoutchouc. Cette même conclusion est tirée par de nombreux chercheurs [71,72].

IV.2.1.3 Ecoulement à l'entonnoir (V-Funnel) :

La Figure 4.3 montre la relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et l'entonnoir V-Funnel de BSAP.

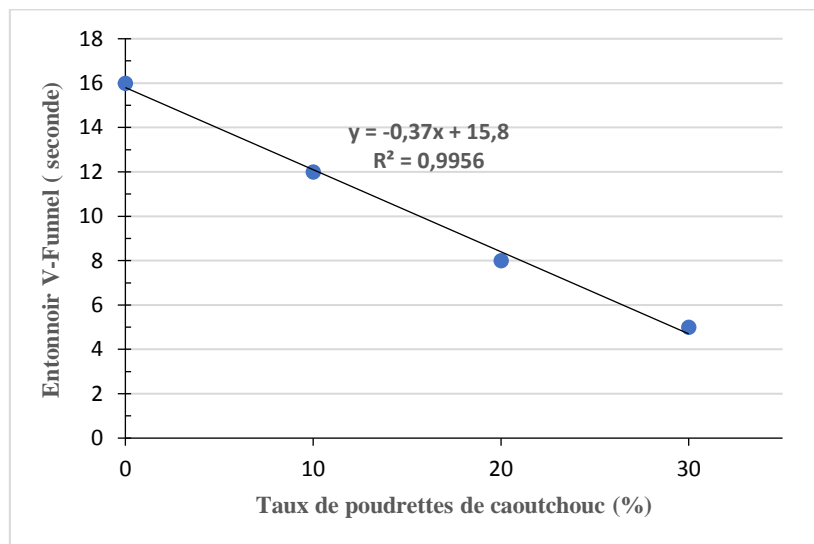


Figure 4.3 : Relation entre le taux des poudrettes de caoutchouc et l'entonnoir V-Funnel de BSAP

Les résultats présentés sur la Figure 4.3 montrent une diminution de temps à l'entonnoir V-Funnel avec l'augmentation du taux de poudrettes de caoutchouc. Les valeurs de temps de l'entonnoir V-Funnel sont situées à l'intérieur de l'intervalle recommandé par la norme (NF EN 12350 – 9, 10). Les valeurs de temps obtenus sont comprises entre 5 à 16 secondes. Il est à noter que les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [73,72].

IV.2.1.4 Teneur en air occlus :

La Figure 4.4 illustre l'effet de l'introduction des poudrettes de caoutchouc sur la teneur en air occlus du BSAP l'état frais.

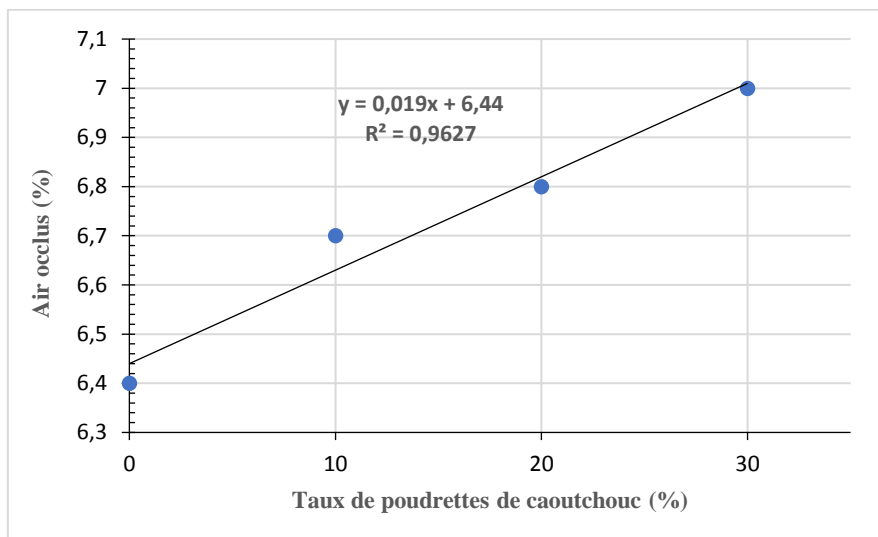


Figure 4.4 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la teneur en air occlus de BSAP

La Figure 4.4 montre la variation de la teneur en air occlus en fonction du dosage des poudrettes de caoutchouc. On remarque que la teneur en air occlus augmente en augmentant le dosage de poudrettes de caoutchouc. Un dosage de 30 % de ces poudrettes donne la plus grande valeur d'air occlus (7%).

On peut expliquer cette augmentation par :

- La nature non polaire des granulats caoutchouc et de leur capacité à piéger l'air dans leur surface rugueuse.
- La nature hydrophobe des granulats caoutchouc.
- La substitution des granulats classiques par des granulats de caoutchouc, plus légers entraîne une augmentation de l'air occlus, par rapport au béton témoin sans granulats caoutchouc [74,75,76].

IV.2.2 A l'état durci :

IV.2.2.1 La masse volumique à sec :

La Figure 4.5 illustre la relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à sec de BSAP

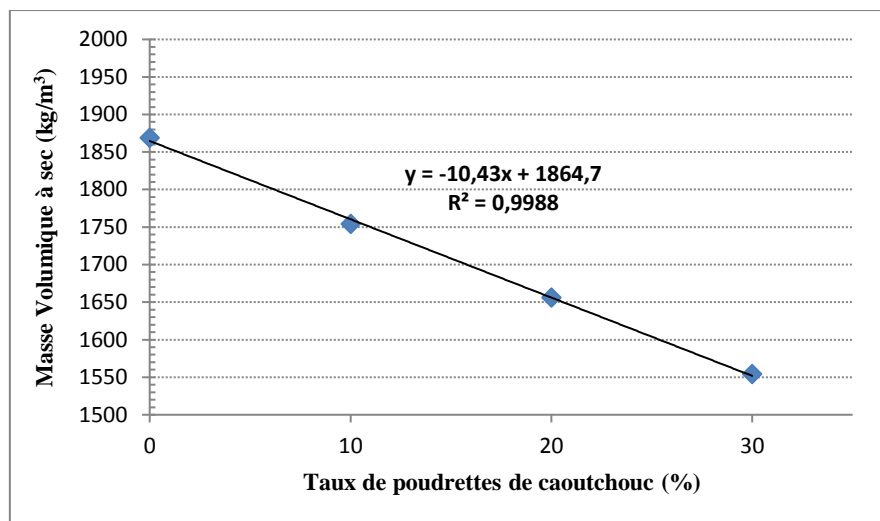


Figure 4.5 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la masse volumique à sec de BSAP

D'après la Figure 4.5, la masse volumique sèche diminue considérablement de 1869 kg/m³ (béton de sable autoplaçant témoin) à 1554 kg/m³ avec l'augmentation du taux des poudrettes de caoutchouc de 0 à 30%. Cette réduction est de l'ordre de 6.15 % pour BSAP 10%, 11.40% pour BSAP 20 % et 16.85 % pour BSAP 30 % respectivement par rapport au béton de sable autoplaçant de référence BSAP 0%.

La faible masse volumique des granulats de caoutchouc (940 kg/m³) est le facteur essentiel qui explique cette réduction.

La nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, responsable du piégeage des bulles d'air, participe à l'allègement des composites des granulats de caoutchouc [77,76,78].

IV.2.2.2 Résistance à la compression :

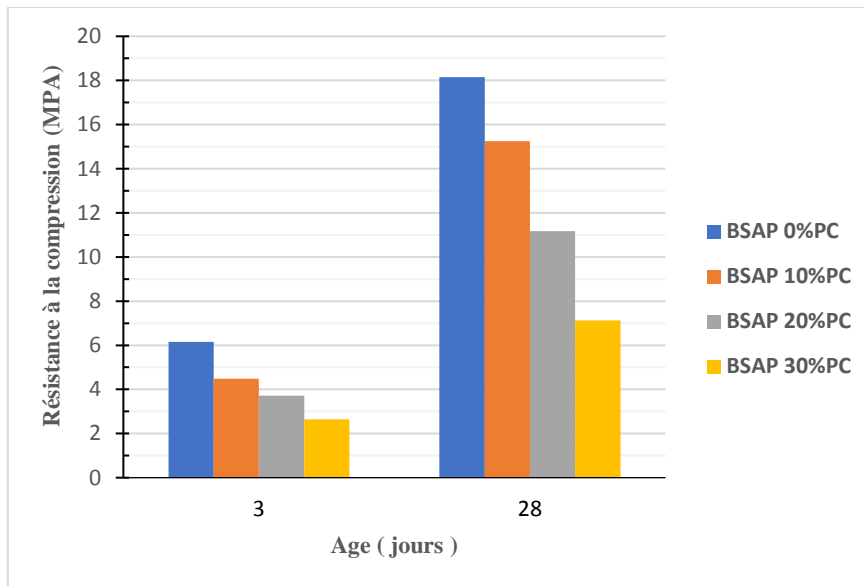


Figure 4.6 : Résistance à la compression des bétons de sable autoplaçant (BSAP) à base des poudrettes de caoutchouc en fonction d'âge.

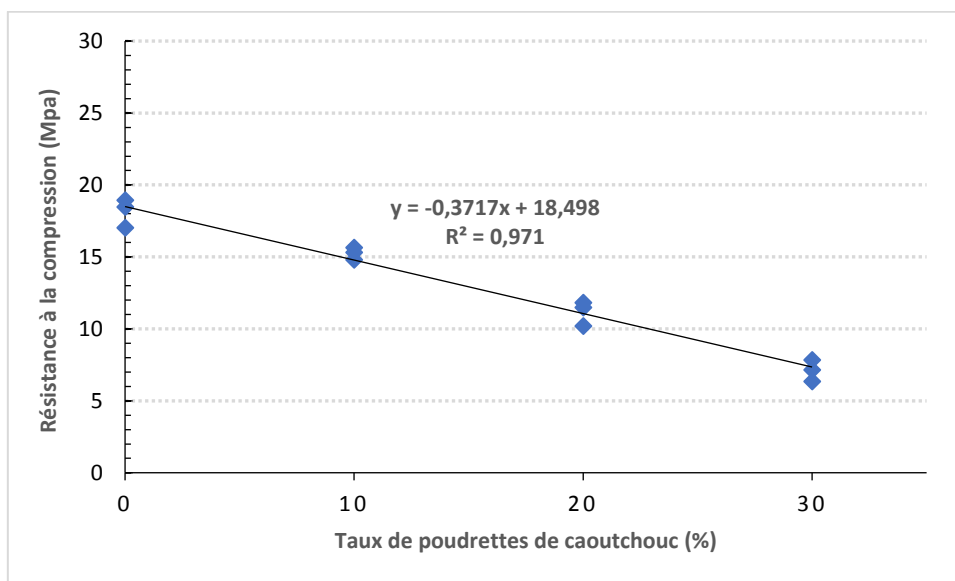


Figure 4.7 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la résistance à la compression à 28 jours de BSAP

La Figure 4.6 et 4.7 montrent l'évolution de la résistance mécanique à 3 et 28 jours en fonction du dosage de poudrettes de caoutchouc. La résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge du béton (le béton de sable auto-plaçant atteint 35 % de sa résistance finale dans les 3 premiers jours). Cela est expliqué par le fait que dès les premières heures de sa confection, le béton gagne davantage d'hydrates qui sont responsables de sa résistance à la compression [79,80].

On remarque que la résistance à la compression diminue lorsqu'on augmente le dosage en Poudrettes de caoutchouc. Un taux de substitution du sable de 10% fait diminuer la résistance à la compression de 27.15 % à 3 jours et de 16 % à 28 jours, un taux de substitution du sable de 20% fait diminuer la résistance à la compression de 39.52 % à 3 jours et de 38.46 % à 28 jours, un taux de substitution du sable de 30 % fait diminuer la résistance à la compression de 57.10 % à 3 jours et de 60.94 % à 28 jours. Ces résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [81,82].

On peut expliquer cette chute par :

- Le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire [83].
- La rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels [84].
- L'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en caoutchouc [85].

IV.2.2.3 Résistance à la traction par flexion :

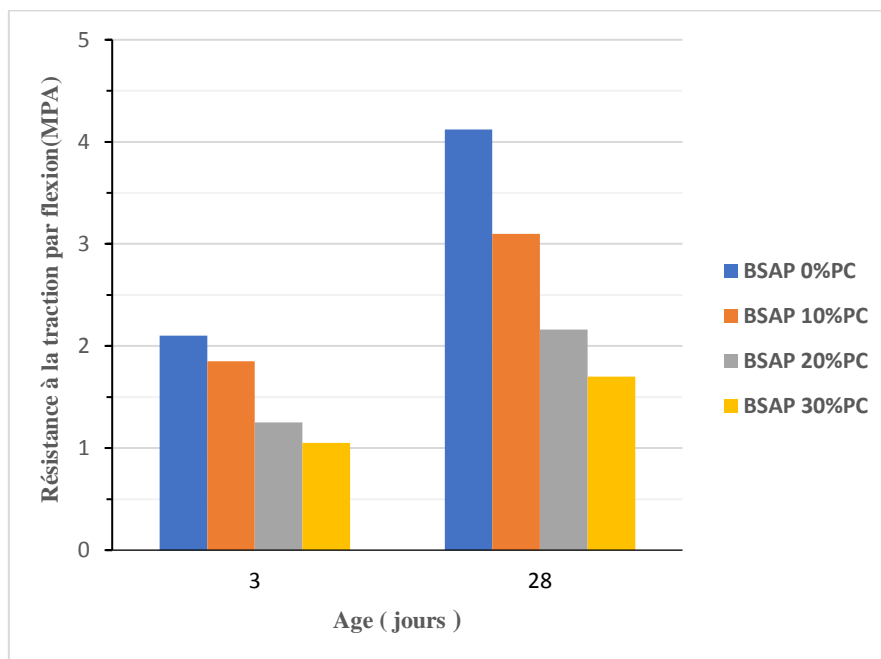


Figure 4.8 : Résistance à la traction par flexion des bétons de sable autoplaçant (BSAP) à base des poudrettes de caoutchouc en fonction d'âge.

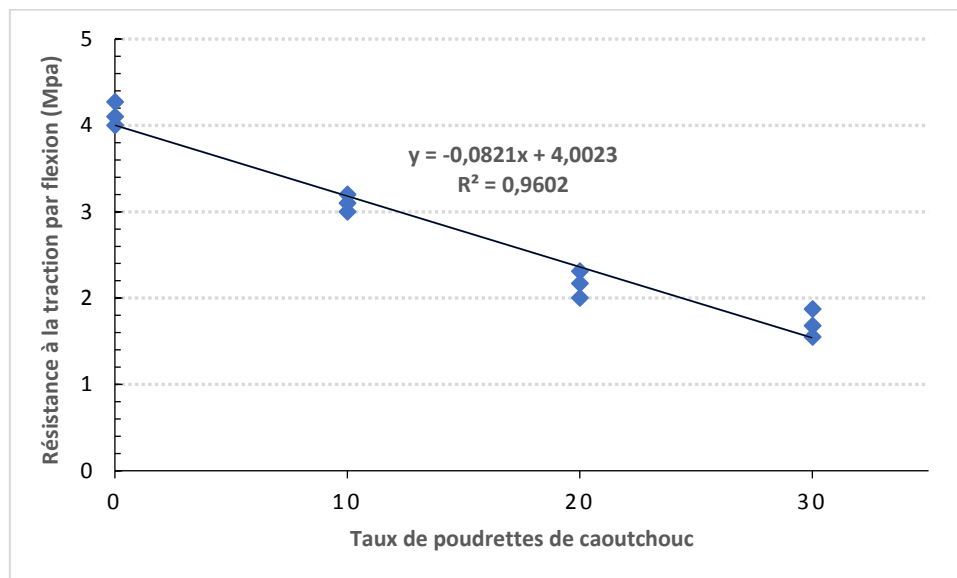


Figure 4.9 : Relation entre le taux de poudrettes de caoutchouc et la résistance à la traction par flexion à 28 jours de BSAP

La Figure 4.8 et 4.9 montrent que le gain de la résistance à la traction par flexion durant les trois premiers jours est très apprécié dans tous les bétons testés. Ce même comportement est observé dans la compression et qui est justifié par l'évolution rapide du phénomène d'hydratation et la précipitation élevée d'hydrates formées au jeune âge.

On note également une chute systématique de résistance à la traction par flexion avec l'augmentation du taux de poudrettes de caoutchouc. Ces résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [86,87].

On peut expliquer cette chute par le défaut d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire [87].

IV.2.2.4 Le retrait :

La Figure 4.10 montre l'évaluation du retrait de BSAP à base des poudrettes de caoutchouc en fonction d'âge.

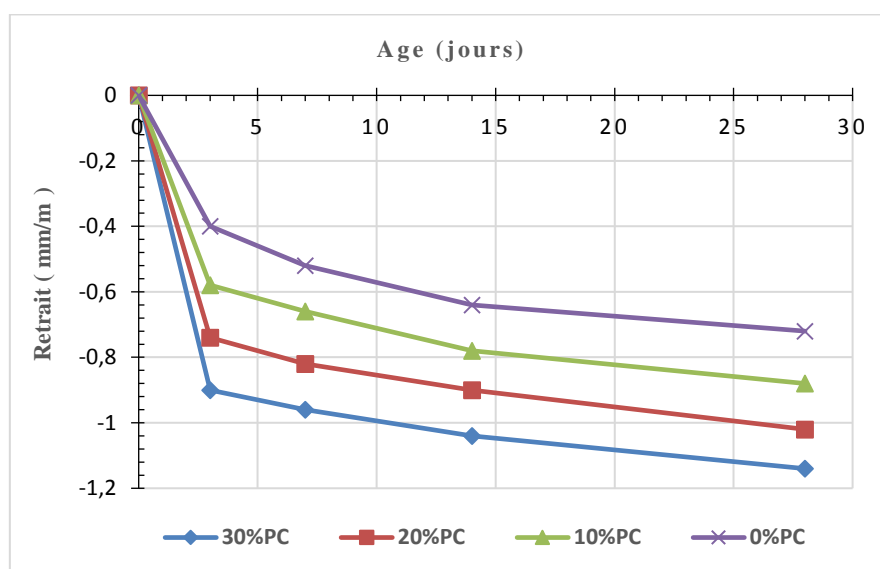


Figure 4.10 : Retrait en fonction d'âge de BSAP

La Figure 4.10 montre que les granulats de caoutchouc incorporés dans les mélanges étudiés augmentent le retrait à tous les âges avec l'augmentation de leurs teneurs. Les valeurs de retrait à 28 jours pour les bétons BSAP 0%PC, BSAP10%PC, BSAP 20%PC, BSAP 30% sont : -0.72 mm/m , - 0.88 mm/m , -1.02 mm/m , -1.14 mm/m respectivement.

Cette augmentation peut être due à :

- La faible liaison entre le caoutchouc et la pâte de ciment et à la nature déformable des granulats de caoutchouc [88].
- La teneur en vide plus élevée introduite par l'incorporation des granulats de caoutchouc, qui aboutit à un béton poreux [89,90,91].

IV.2.2.5 Absorption d'eau par capillarité :

La Figure 4.11 montre l'effet de l'incorporation de poudrettes caoutchouc sur le taux d'absorption d'eau par capillarité du BSAP.

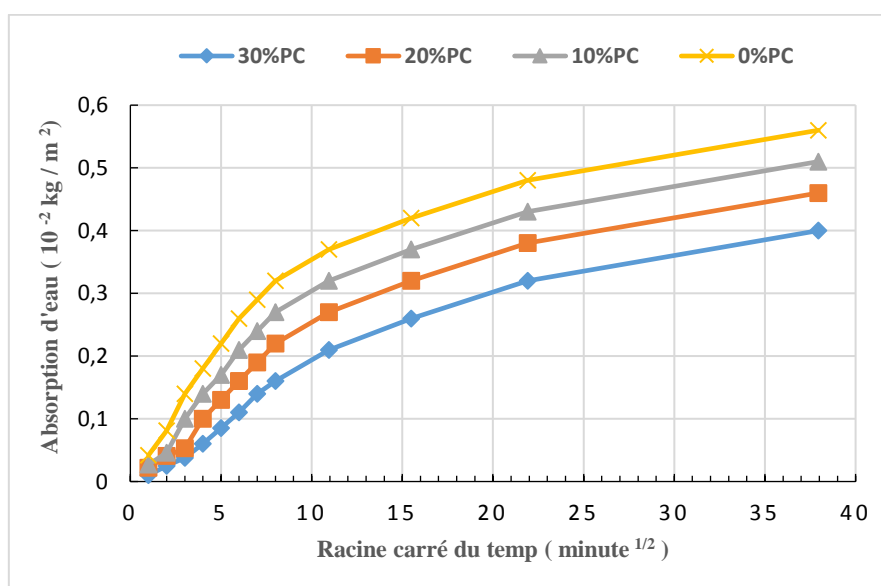


Figure 4.11 : Valeurs de l'absorption d'eau par capillaire en fonction du temps de BSAP

D'après la Figure 4.11, on remarque que l'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange. Après 24 h d'exposition, la quantité d'eau absorbée par les bétons BSAP 10%PC, BSAP 20% PC, BSAP 30% PC diminue de 10,71% ,19,64% et 30,35% respectivement par rapport à celui du béton de référence BSAP 0%PC.

Cette réduction peut être attribuée à la nature hydrophobe des particules de caoutchouc qui ont moins de pores ou moins de pores accessibles à l'eau (pores fermés ou capillaires très étroits qui repoussent l'eau). Ce comportement attendu a déjà été signalé par d'autres chercheurs [91,92]

IV.3 Mise en application des plans d'expériences

Les méthodes des plans d'expériences consistent à sélectionner et ordonner les essais afin d'identifier, les effets des paramètres sur les réponses étudiées. Ce sont des méthodes statistiques qu'ils utilisent des concepts mathématiques simples.

IV.3.1 Résultats des essais

Le Tableau 4.1 montre les résultats d'essais des plans d'expériences.

Tableau 4.1 : Résultats d'essais des plans d'expériences

N	Ciment (kg/m ³)	E/C	% Gr	Affaissement (mm)	Résistance (MPa)		Retrait 28j (mm/m)
					Rc 28j	Rt 28j	
17	400	0,80	15	664-690-672	12,20-12,74-12,48	2,34-2,56-2,78	0,76-0,90-0,83
1	350	0,75	0	524-510-518	16,60-16,20-16,84	3,67-3,84-4,10	0,65-0,60-0,62
2	350	0,75	10	540-552-534	14,10-14,70-14,25	2,58-2,36-2,79	0,72-0,78-0,70
3	350	0,75	20	580-574-568	10,60-10,24-10,84	1,63-1,49-1,73	0,84-0,88-0,80
4	350	0,75	30	610-596-618	6,10-6,45-6,76	1,24-1,39-1,54	1,02-0,97-0,90
5	350	0,85	0	532-540-528	15,10-15,40-15,80	3,12-3,25-3,48	0,66-0,68-0,71
6	350	0,85	10	578-565-552	13,24-13,70-13,58	2,75-2,58-2,60	0,90-0,93-0,87
7	350	0,85	20	610-596-580	9,14-9,84-9,46	1,21-1,42-1,50	1,06-0,98-1,03
8	350	0,85	30	620-642-631	6,10-5,60-5,24	1,10-0,92-1,20	1,08-1,18-1,20
9	450	0,75	0	576-580-585	18,50-19,40-19,10	5,40-5,78-5,89	0,72-0,70-0,67
10	450	0,75	10	620-612-590	17,32-16,40-17,50	4,38-4,13-4,43	0,84-0,80-0,81
11	450	0,75	20	654-626-670	12,84-13,20-13,50	3,27-3,64-3,46	0,94-1,02-0,89
12	450	0,75	30	692-714-730	8,44-9,25-8,82	2,48-2,32-2,20	1,14-0,98-1,10
13	450	0,85	0	680-710-740	18,60-18,20-17,80	4,60-5,24-4,82	0,84-0,82-0,87
14	450	0,85	10	720-756-734	16,70-15,90-16,54	3,35-3,23-3,57	0,93-0,96-0,98
15	450	0,85	20	820-760-780	11,80-12,60-12,30	2,58-2,29-2,37	1,12-1,18-1,15
16	450	0,85	30	798-845-825	8,80-8,40-7,90	1,46-1,34-1,22	1,28-1,24-1,30
17	400	0,80	15	670-693-662	11,90-12,60-12,10	2,86-2,64-2,42	0,80-0,89-0,74

IV.3.2 Analyses résultats d'essais

Le traitement des résultats d'essais a été effectué à l'aide du logiciel Minitab 18. Les modèles multiparamétriques prédictifs des réponses étudiées, calculés par régressions et en ne prenant que les actions (facteurs et interactions) très significatives (voire significatives) sont présentés ci-dessous.

IV.3.2.1 Résistance à la compression

Récapitulatif du modèle calculé par le logiciel.

	S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
	0,685802	97,25%	96,90%	96,38%

Coefficients

Terme	Coef	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	12,7724	0,0933	136,86	0,000	
Granulat Caoutchouc	-5,083	0,133	-38,27	0,000	1,00
Eau/Ciment	-0,4210	0,0990	-4,25	0,000	1,00
Ciment	1,3319	0,0990	13,46	0,000	1,00
Granulat Caoutchouc*Eau/Ciment	0,055	0,133	0,42	0,680	1,00
Granulat Caoutchouc*Ciment	-0,020	0,133	-0,15	0,883	1,00
Eau/Ciment*Ciment	0,0573	0,0990	0,58	0,566	1,00

Équation de régression retenue:

Résistance à la compression = 12,7724 - 5,083 Granulat Caoutchouc - 0,4210 Eau/Ciment + 1,3319 Ciment

Nous remarquons qu'aucune interaction n'est significative.

En ce qui concerne les signes des coefficients : nous remarquons que les résultats obtenus sont logiques, c-à-d moins de granulats caoutchouc améliore la résistance et aussi plus de ciment augmente la résistance et plus le rapport E/C est faible plus la résistance est importante.

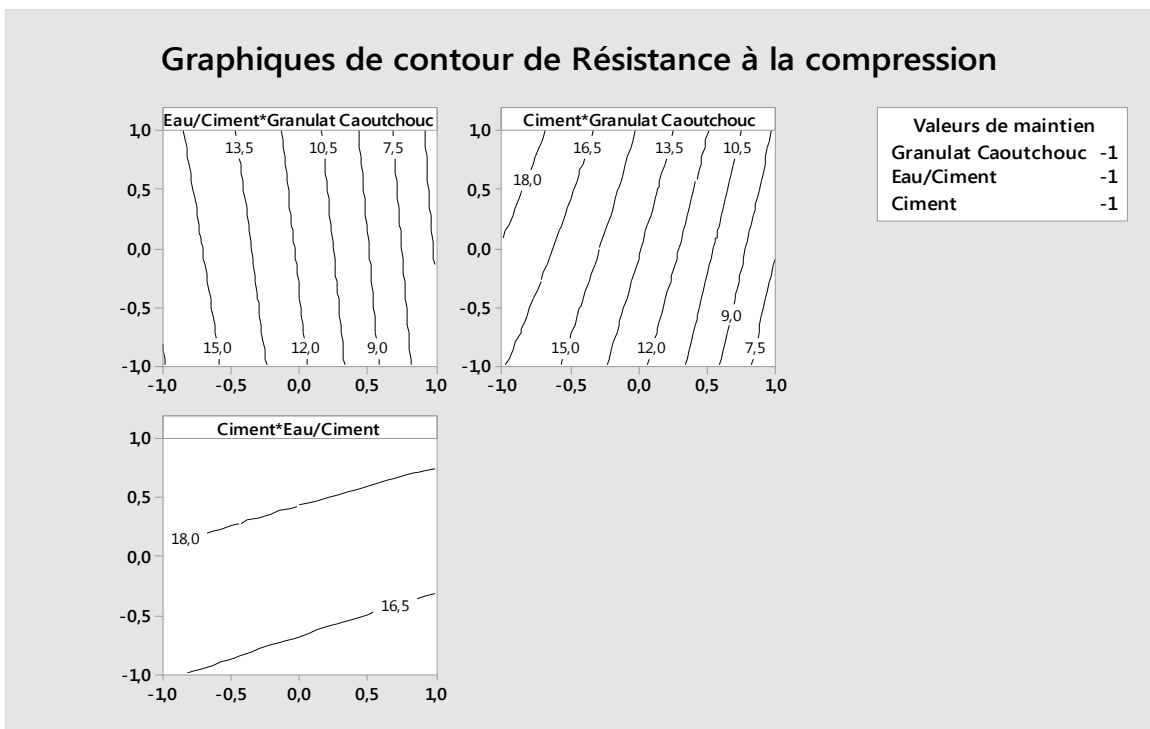
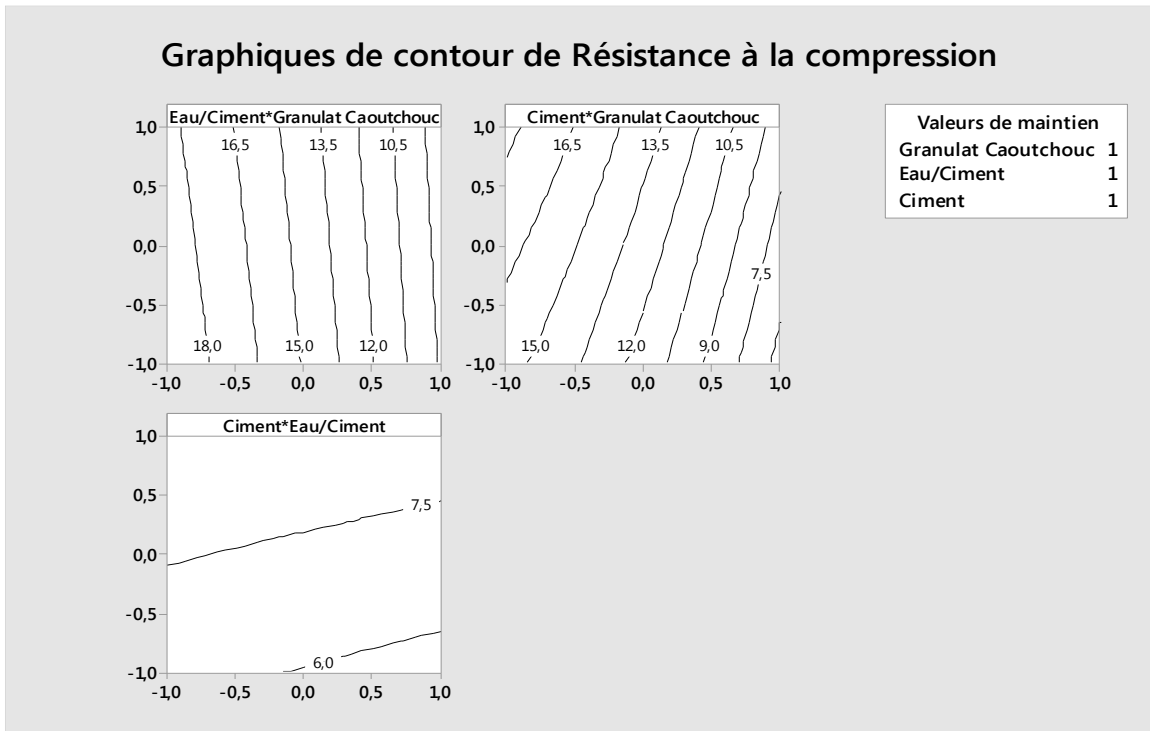
Aussi, nous avons observé que le facteur granulat caoutchouc est en interaction avec lui-même (facteur quadratique). Le modèle s'écrit alors:

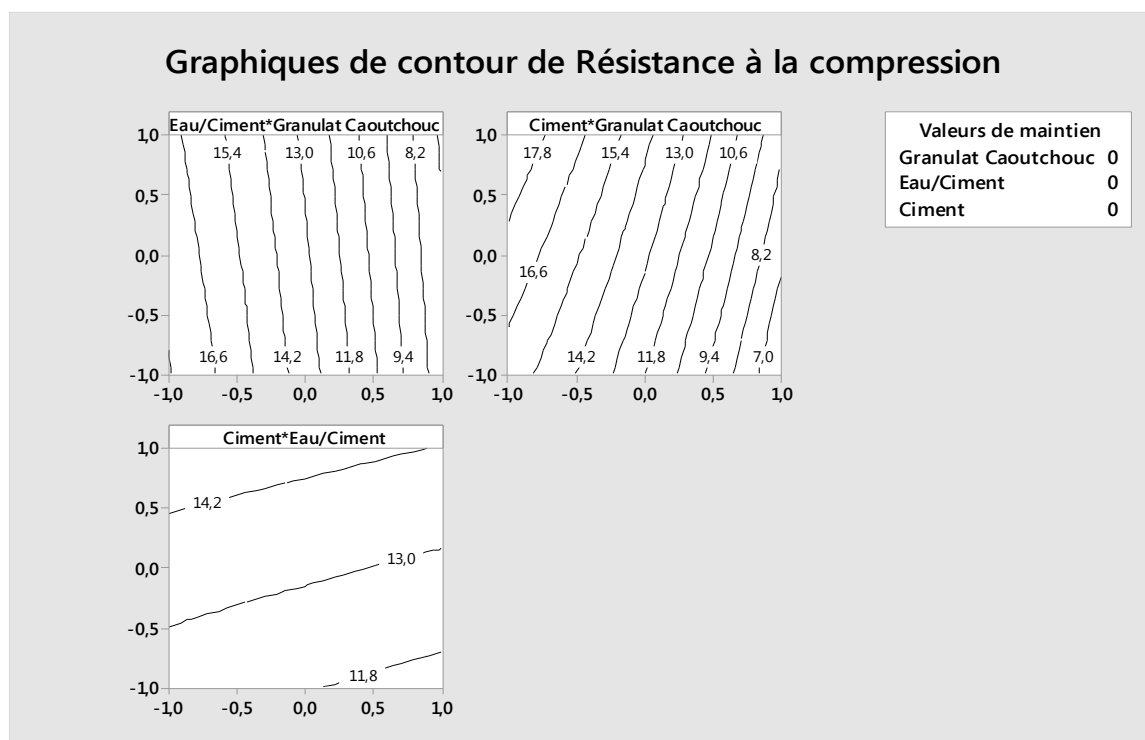
Résistance à la compression = **13,199** - 5,083 Granulat Caoutchouc - 0,4210 Eau/Ciment + 1,3319 Ciment - **0,864 Granulat Caoutchouc*Granulat Caoutchouc**

Pour traiter ce cas de figure, un plan centré composite est plus que recommandé. En ce qui concerne cette étude le premier modèle est largement suffisant, puisque les résultats au centre du domaine expérimental (essais 17 du Tableau 4.1) sont très proches de la constante du premier modèle (**12,7724**).

Optimisation - Les courbes iso-réponses :

Nous proposons ci-dessous quelques courbes iso-réponses afin de permettre l'optimisation du système défini par le modèle mathématique dont l'état dépend de plusieurs paramètres. Donc, après la modélisation, l'optimum désirée peut être obtenu par le tracé des iso-réponses. Ainsi, nous pouvons choisir une combinaison des niveaux de facteurs du modèle où la réponse est plus stable.





IV.3.2.2 Résistance à la traction

Récapitulatif du modèle calculé par le logiciel.

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,266769	96,10%	95,61%	94,79%

Coefficients

Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	2,8248	0,0363	77,81	0,000	
Granulat Caoutchouc	-1,4564	0,0517	-28,19	0,000	1,00
Eau/Ciment	-0,3029	0,0385	-7,87	0,000	1,00
Ciment	0,6242	0,0385	16,21	0,000	1,00
Granulat Caoutchouc*Eau/Ciment	-0,0067	0,0517	-0,13	0,897	1,00
Granulat Caoutchouc*Ciment	-0,2341	0,0517	-4,53	0,000	1,00
Eau/Ciment*Ciment	-0,1683	0,0385	-4,37	0,000	1,00

Équation de régression retenue:

Résistance à la traction = 2,8248 - 1,4564 Granulat Caoutchouc - 0,3029 Eau/Ciment + 0,6242 Ciment - 0,2341 Granulat Caoutchouc*Ciment - 0,1683 Eau/Ciment*Ciment

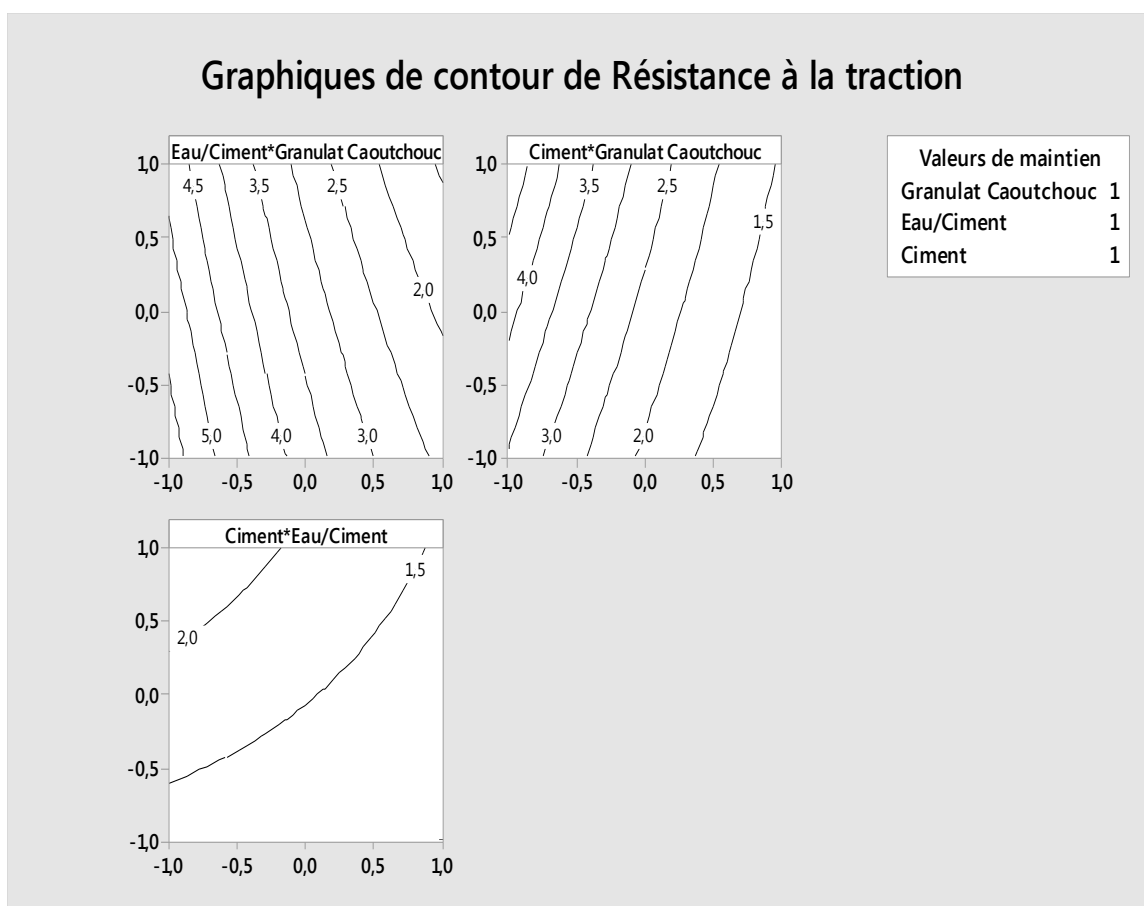
Aussi, nous avons observé que le facteur granulat caoutchouc est en interaction avec lui-même (facteur quadratique). Le modèle s'écrit alors:

Résistance à la traction = **2,6682** - 1,4564 Granulat Caoutchouc - 0,3029 Eau/Ciment + 0,6242 Ciment - 0,2341 Granulat Caoutchouc*Ciment - 0,1683 Eau/Ciment*Ciment + **0,3173 Granulat Caoutchouc*Granulat Caoutchouc**

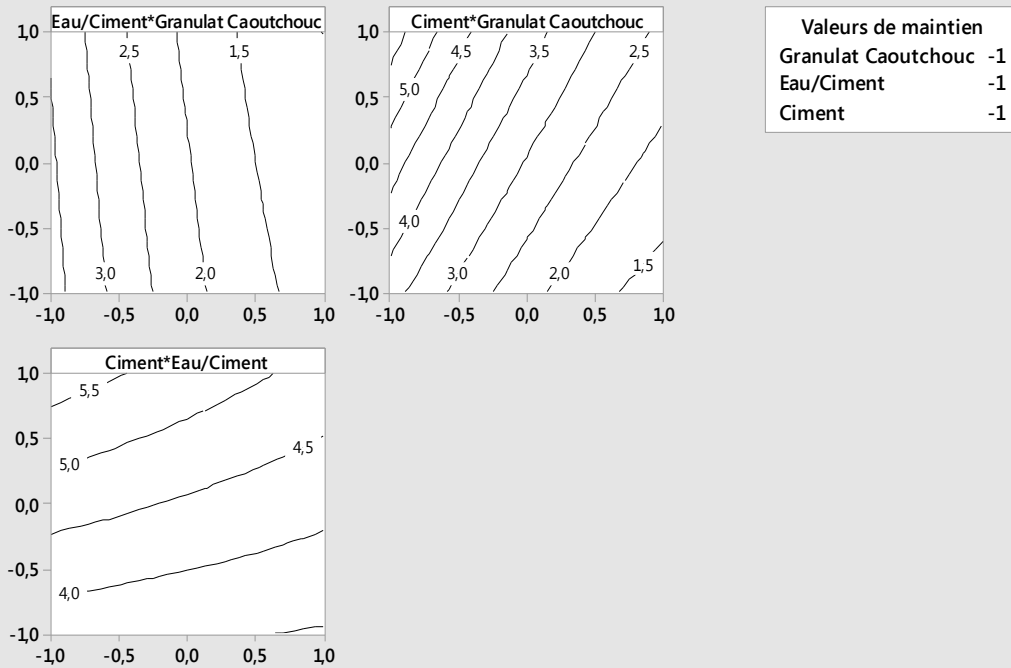
Pour traiter ce cas de figure, un plan centré composite est plus que recommandé. En ce qui concerne cette étude le premier modèle est largement suffisant, puisque les résultats au centre du domaine expérimental (essais 17 du Tableau 4.1) sont très proches de la constante du premier modèle (2,8248).

Optimisation - Les courbes iso-réponses :

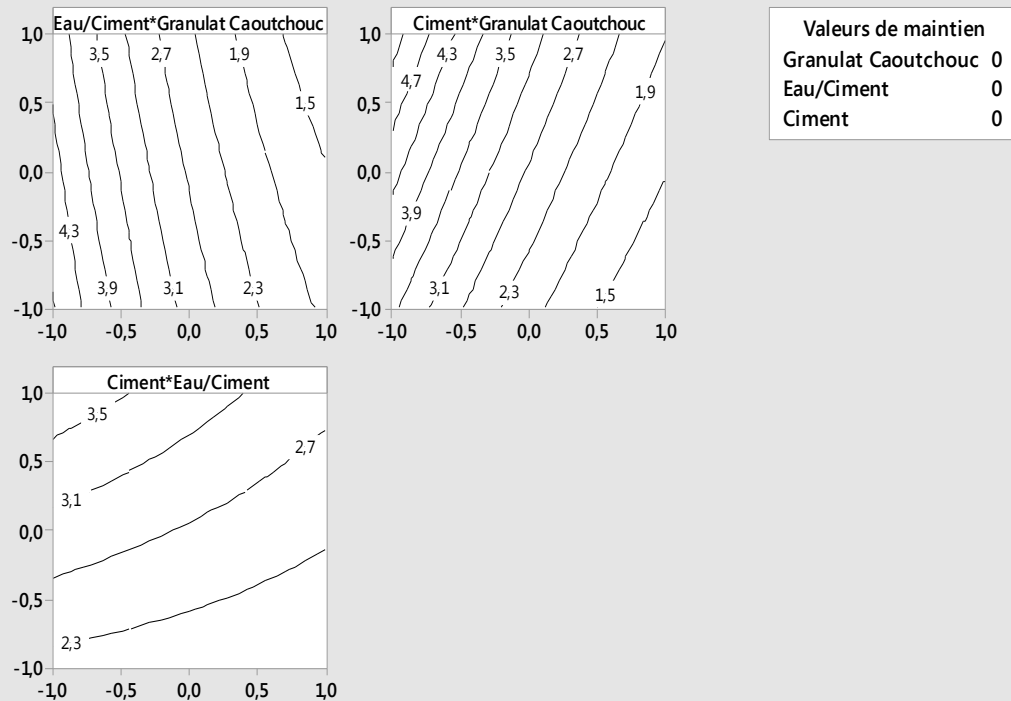
Nous proposons ci-dessous quelques courbes iso-réponses afin de permettre l'optimisation du système défini par le modèle mathématique dont l'état dépend de plusieurs paramètres. Donc, après la modélisation, l'optimum désirée peut être obtenu par le tracé des iso-réponses. Ainsi, nous pouvons choisir une combinaison des niveaux de facteurs du modèle où la réponse est plus stable.



Graphiques de contour de Résistance à la traction



Graphiques de contour de Résistance à la traction



IV.3.2.3 Affaissement (Etalement)

Récapitulatif du modèle calculé par le logiciel.

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
20,6307	95,02%	94,39%	93,93%

Coefficients

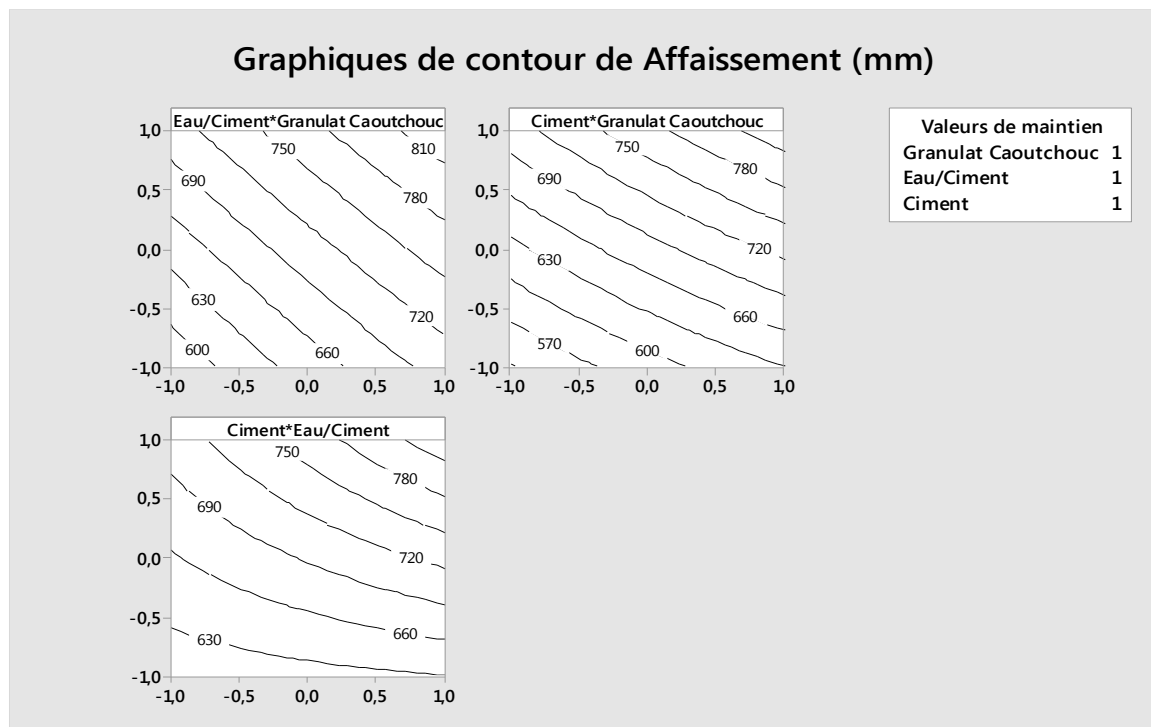
Terme	Coef	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	640,11	2,81	228,00	0,000	
Granulat Caoutchouc	54,49	4,00	13,64	0,000	1,00
Eau/Ciment	36,85	2,98	12,38	0,000	1,00
Ciment	64,98	2,98	21,82	0,000	1,00
Granulat Caoutchouc*Eau/Ciment	-1,14	4,00	-0,28	0,777	1,00
Granulat Caoutchouc*Ciment	7,44	4,00	1,86	0,069	1,00
Eau/Ciment*Ciment	26,44	2,98	8,88	0,000	1,00

Équation de régression retenue:

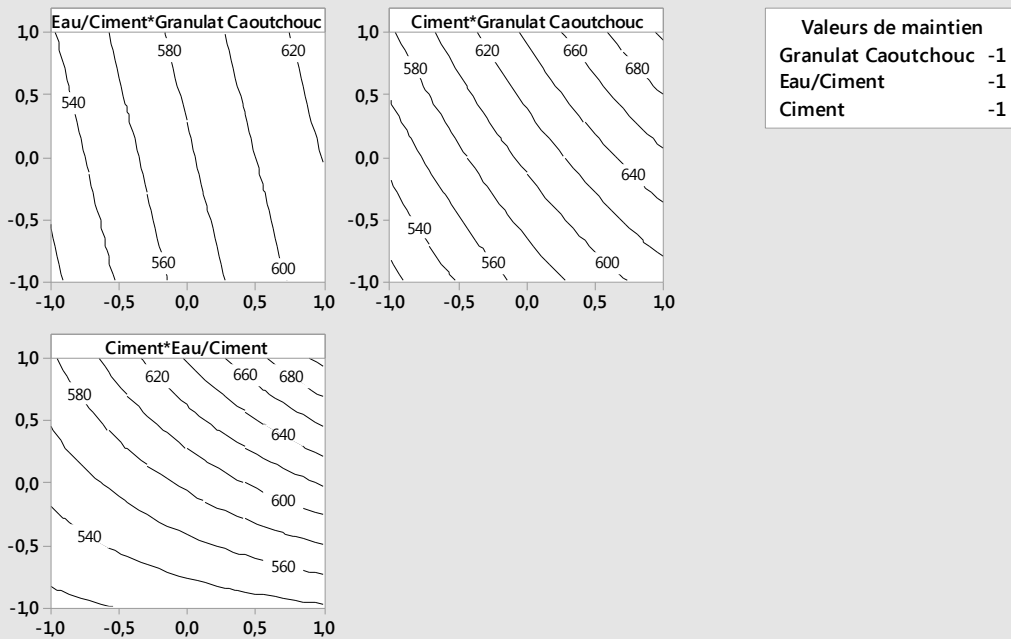
$$\text{Affaissement (mm)} = 640,11 + 54,49 \text{ Granulat Caoutchouc} + 36,85 \text{ Eau/Ciment} + 64,98 \text{ Ciment} + 26,44 \text{ Eau/Ciment*Ciment}$$

Optimisation - Les courbes iso-réponses :

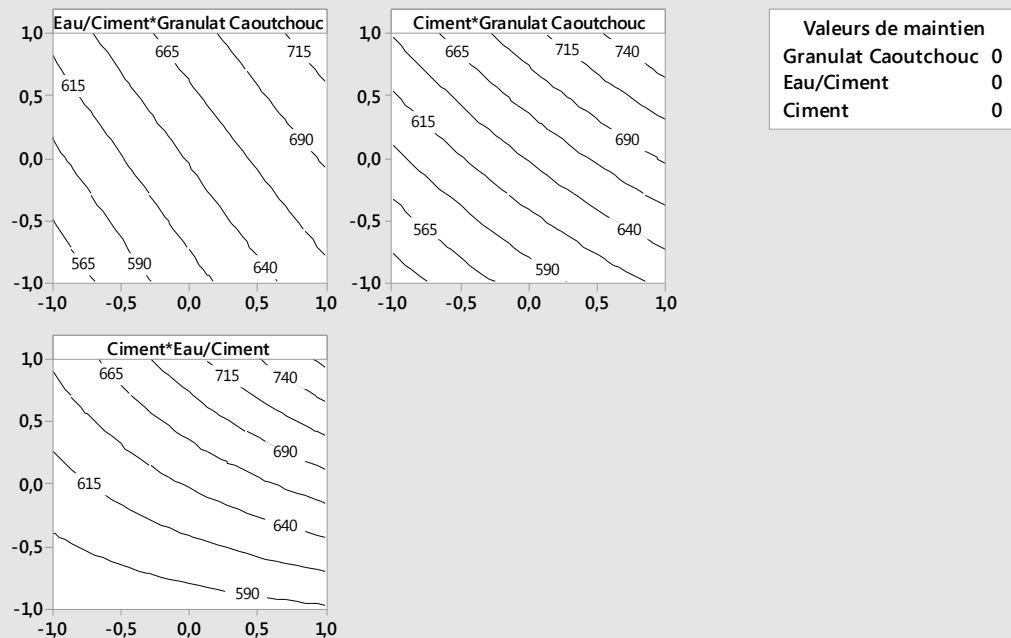
Nous proposons ci-dessous quelques courbes iso-réponses afin de permettre l'optimisation du système défini par le modèle mathématique dont l'état dépend de plusieurs paramètres. Donc, après la modélisation, l'optimum désirée peut être obtenu par le tracé des iso-réponses. Ainsi, nous pouvons choisir une combinaison des niveaux de facteurs du modèle où la réponse est plus stable.



Graphiques de contour de Affaissement (mm)



Graphiques de contour de Affaissement (mm)



IV.3.2.4 Retrait

Récapitulatif du modèle calculé par le logiciel.

S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,0555976	91,46%	90,37%	89,50%

Coefficients

Terme	Coef	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	0,90667	0,00757	119,84	0,000	
Granulat Caoutchouc	0,2028	0,0108	18,83	0,000	1,00
Eau/Ciment	0,08042	0,00802	10,02	0,000	1,00
Ciment	0,05250	0,00802	6,54	0,000	1,00
Granulat Caoutchouc*Eau/Ciment	0,0235	0,0108	2,18	0,034	1,00
Granulat Caoutchouc*Ciment	0,0032	0,0108	0,30	0,764	1,00
Eau/Ciment*Ciment	0,00542	0,00802	0,67	0,503	1,00

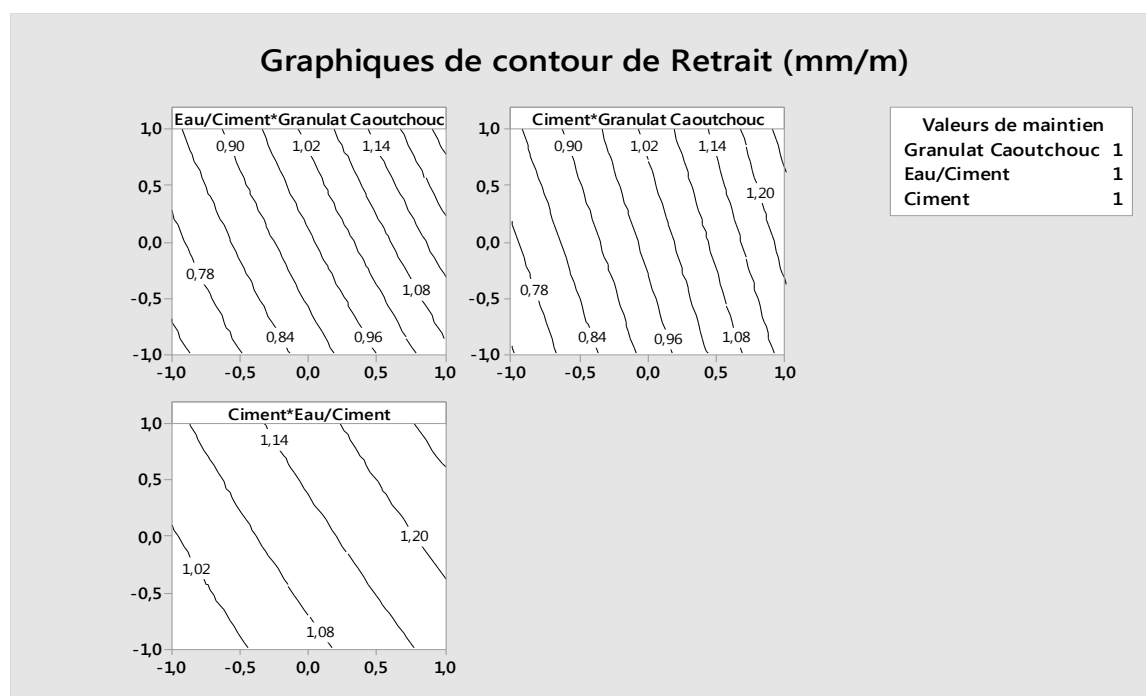
Équation de régression retenue:

$$\text{Retrait (mm/m)} = 0,90667 + 0,2028 \text{ Granulat Caoutchouc} + 0,08042 \text{ Eau/Ciment} + 0,05250 \text{ Ciment} + 0,0235 \text{ Granulat Caoutchouc*Eau/Ciment} + 0,00542 \text{ Eau/Ciment*Ciment}$$

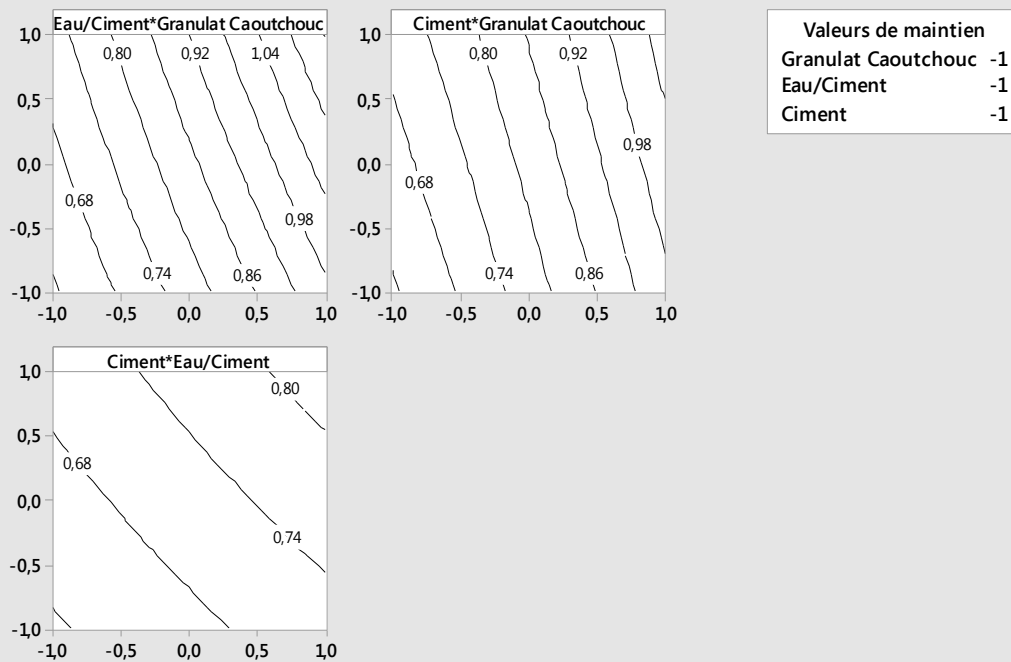
Nous remarquons que toutes les actions augmentent le retrait.

Optimisation - Les courbes iso-réponses :

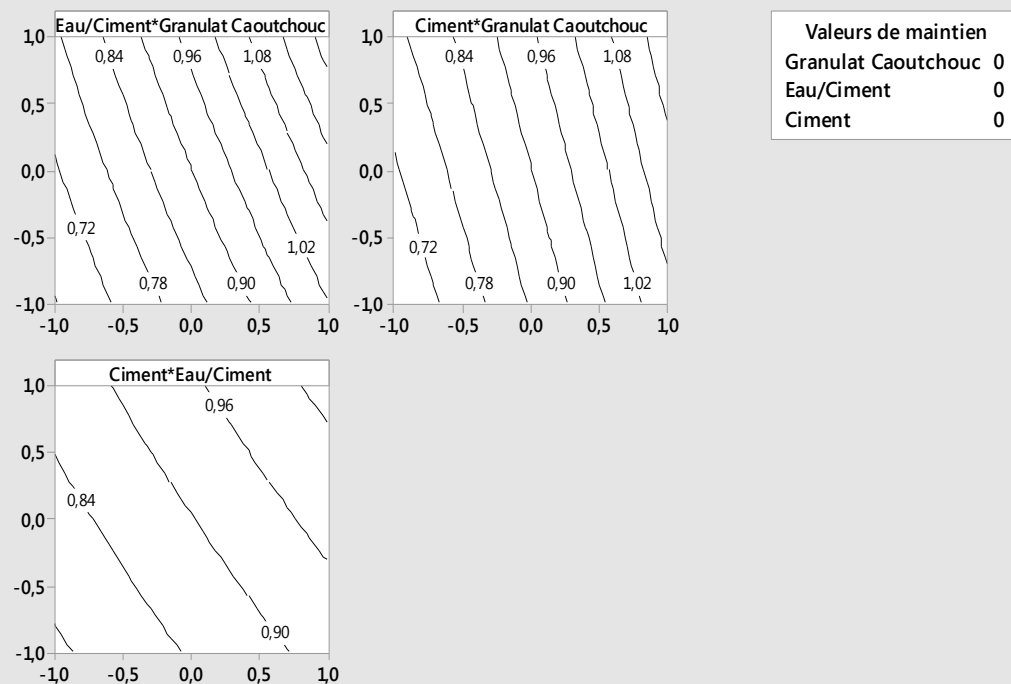
Nous proposons ci-dessous quelques courbes iso-réponses afin de permettre l'optimisation du système défini par le modèle mathématique dont l'état dépend de plusieurs paramètres. Donc, après la modélisation, l'optimum désirée peut être obtenu par le tracé des iso-réponses. Ainsi, nous pouvons choisir une combinaison des niveaux de facteurs du modèle où la réponse est plus stable.



Graphiques de contour de Retrait (mm/m)



Graphiques de contour de Retrait (mm/m)



IV.4 Conclusion

En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Une diminution de la masse volumique à l'état frais est observé avec l'augmentation du taux de poudrettes de caoutchouc dans le béton.
- L'incorporation des granulats de caoutchouc dans des bétons de sable autoplaçant (BSAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant l'augmentation de l'affaissement lorsqu'en augmente le taux des granulats caoutchouc. Les valeurs d'affaissement restent à l'intérieur de l'intervalle recommandé par la norme (NF EN 12350 – 8,10).
- Une diminution du temps à l'entonnoir V-Funnel avec l'augmentation du taux de poudrettes de caoutchouc. Les valeurs de temps de l'entonnoir V-Funnel situées à l'intérieur de l'intervalle recommandé par la norme (NF EN 12350 – 9, 10).
- On remarque que la teneur en air occlus augmente en augmentant le dosage de poudrettes de caoutchouc.
- La masse volumique sèche diminue avec l'augmentation du taux de poudrettes de caoutchouc.
- La résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge du béton (le béton de sable autoplaçant atteint 35 % de sa résistance finale dans les 3 premiers jours). On remarque que la résistance à la compression diminue lorsqu'en augmente le dosage de Poudrettes de caoutchouc.
- La résistance à la traction par flexion durant les trois premiers jours est très appréciée dans tous les bétons testés. On note également une chute systématique de résistance à la traction par flexion a été observée avec l'augmentation du taux de poudrettes de caoutchouc.
- Les granulats de caoutchouc incorporés dans les mélanges étudiés augmentent le retrait à tous les âges avec l'augmentation de leurs teneurs.

- L'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange.
- La méthode des plans d'expériences est applicable, elle peut nous fournir des modèles mathématiques prédictifs de toutes les réponses étudiées ainsi que des courbes iso-réponses qui seront d'une grande aide à la décision.

CHAPITRE V :

***Effet des granulats caoutchouc sur
les propriétés des bétons de sable
compactés (BSC)***

Chapitre V

Effet des granulats caoutchouc sur les propriétés des bétons de sable compactés (BSC)

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions les effets probables de l'introduction des granulats caoutchouc sur les propriétés du BSC aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Nous exposons les résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les BSC incorporant les granulats de caoutchouc, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre 3 de ce mémoire de thèse.

Les résultats présentés dans ce chapitre touchent d'une part aux propriétés du béton de sable compacté (BSC) à l'état frais, à savoir la masse volumique, essai Vébé et d'autre part les propriétés à l'état durci ; à savoir la résistance mécanique en compression et la résistance en traction par fendage.

V.2 La première étape :

Pour nous donner une idée de la teneur en eau des bétons de l'étude, nous avons incorporé des granulats de caoutchouc (0/4 mm) issus de recyclage de pneus usagés en substitution volumique du sable avec trois substitutions volumétriques 10,20,30 % et une formulation sans substitution (mélange témoin).

V.2.1 Relation entre la teneur en eau et la densité sèche (γ_d , w)

La Figure 5.1 illustre la relation entre la teneur en eau (w) et la densité sèche (γ_d) ou courbes Proctor des bétons de sable compactés.

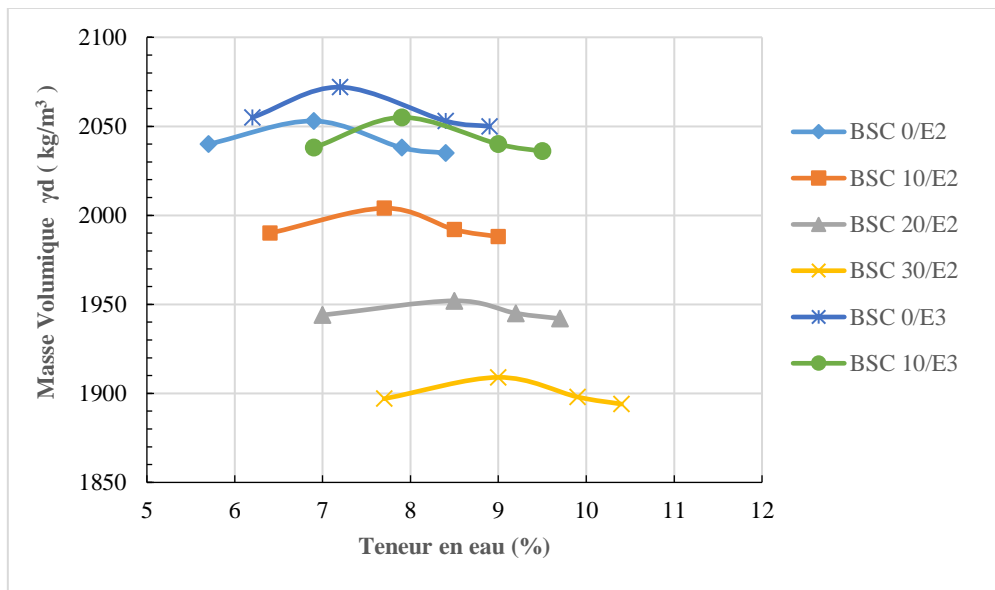


Figure 5.1 : Courbes Proctor des bétons de sable compactés testés

La principale caractéristique des courbes Proctor du béton de sable compacté, présentée dans la Figure 5.1 montre que les courbes sont suffisamment plates. La densité sèche maximale varie un peu lorsque la teneur en eau varie sensiblement. Cette forme de courbe montre que le béton de sable compacté est un matériau peu sensible à la variation de la teneur en eau, et qu'il est très difficile de déterminer le Proctor optimale. Cette même conclusion est tirée par Zdiri [93].

V.2.2 Teneur en eau optimale (Wopt) :

Les valeurs de Wopt estimées se situaient entre 6,9 et 9% et semblaient dépendre notamment de la proportion des granulats de caoutchouc dans le mélange (voir Figure 5.2). Sachant que les granulats de caoutchouc ont une densité faible, le poids unitaire des mélanges contenant du caoutchouc diminue avec l'augmentation du pourcentage de la teneur en caoutchouc. L'augmentation de l'énergie de compactage augmente les densités sèches des mélanges (voir Figure 5.1).

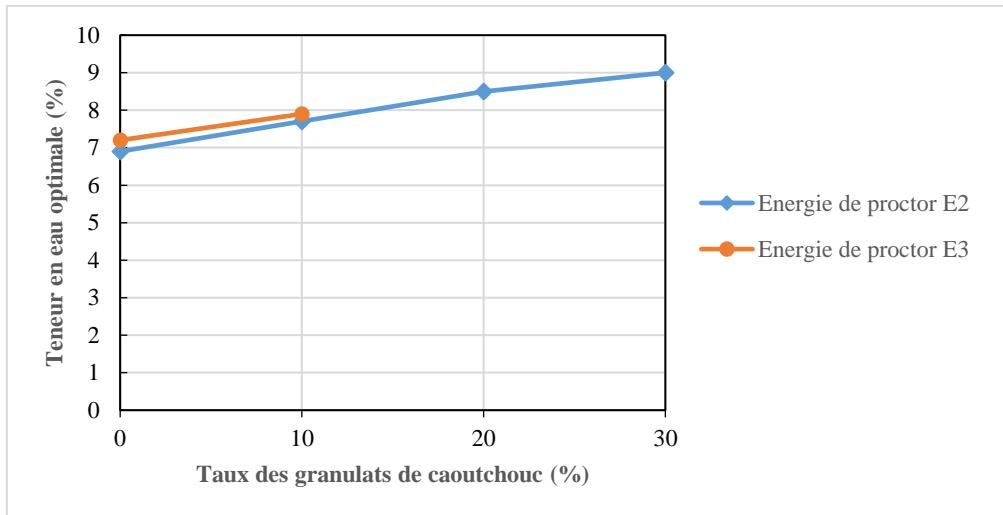


Figure 5.2 : Les teneurs des eaux optimales (Wopt) des mélanges testés

Les valeurs élevées de l'humidité optimale (Wopt) étaient dues au pourcentage élevé d'absorption d'eau par le sable des dunes de l'étude. Les valeurs d'humidité optimale des mélanges de béton avec l'ajout des granulats de caoutchouc sont plus élevées que celles sans ajout. Cette eau ne participe pas à l'hydratation du ciment mais entraîne une réduction de la densité spécifique apparente sèche des mélanges.

V.2.3 La résistance à la compression :

La Figure 5.3 montre la résistance à la compression de BSC à base des granulats de caoutchouc en fonction d'âge et l'énergie de compactage.

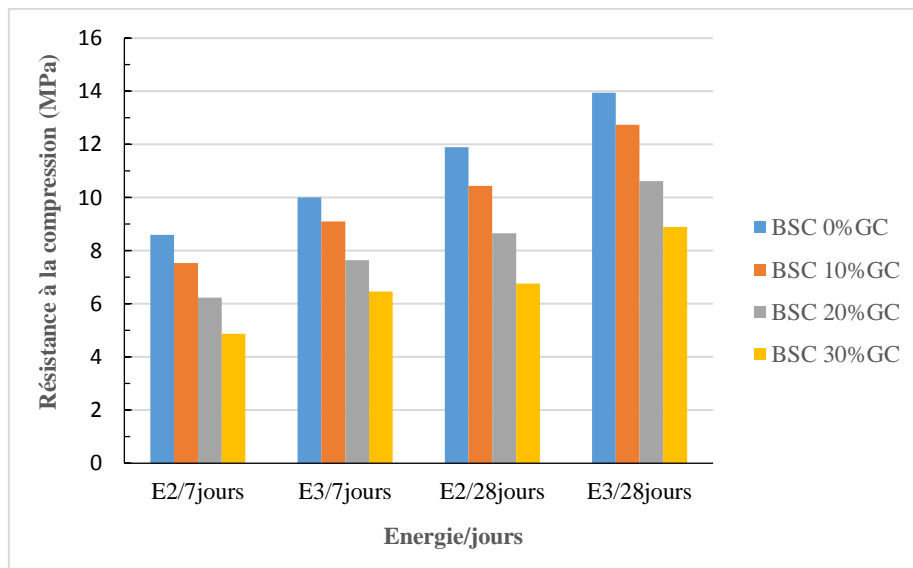


Figure 5.3 : Résistance à la compression des bétons de sable compactés (BSC) à base des granulats de caoutchouc en fonction d'âge et l'énergie de compactage.

Avec la valeur d'humidité optimale, des spécimens ont été moulés pour évaluer les propriétés mécaniques des bétons de sable compactés. Les résistances obtenues dans cette première étape étaient inférieures à 15 MPa. Pour cette raison, dans la deuxième étape, pour augmenter ces résistances, deux types des granulats de caoutchouc seront utilisés (0/4 mm), (0/1 mm) et quatre énergies de compactage E1, E2, E3, E4 (voir Tableau 3.8 du chapitre 3).

V.3 La deuxième étape :

Dans la deuxième étape, nous avons utilisés deux types des granulats de caoutchouc (granulats de caoutchouc (0/4mm) et poudrettes de caoutchouc (0/1mm)), quatre substituts volumiques 10,30,40,50% et quatre énergies de compactage E1,E2,E3,E4 (voir Tableau 3.8 du Chapitre 3). La substitution des granulats de caoutchouc a été effectuée dans les proportions suivantes : 50% granulats de caoutchouc (0/4mm) et 50% poudrettes de caoutchouc (0/1mm).

V.3.1 Les essais à l'état frais :

V.3.1.1 La masse volumique à l'état frais :

La Figure 5.4 illustre l'effet des granulats de caoutchouc sur la masse volumique à l'état frais du béton de sable compacté (BSC).

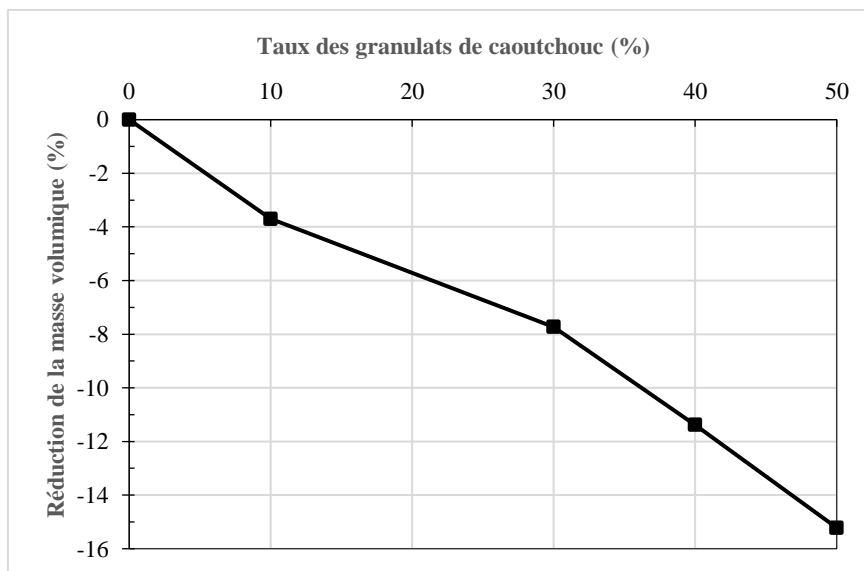


Figure 5.4 : Effet des granulats de caoutchouc sur la masse volumique à l'état frais du BSC

La masse volumique à l'état frais diminue avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc. Cette réduction est de l'ordre de 15 % pour BSC 50% GC par rapport au béton de sable compacté de référence BSC 0% GC.

La faible masse volumique des granulats de caoutchouc est le facteur essentiel qui explique cette réduction.

La nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, responsable du piégeage des bulles d'air, participe à l'allègement des composites des granulats de caoutchouc [70].

V.3.1.2 L'essais Vébé :

La Figure 5.5 illustre l'effet des granulats de caoutchouc sur la maniabilité du béton de sable compacté (BSC)

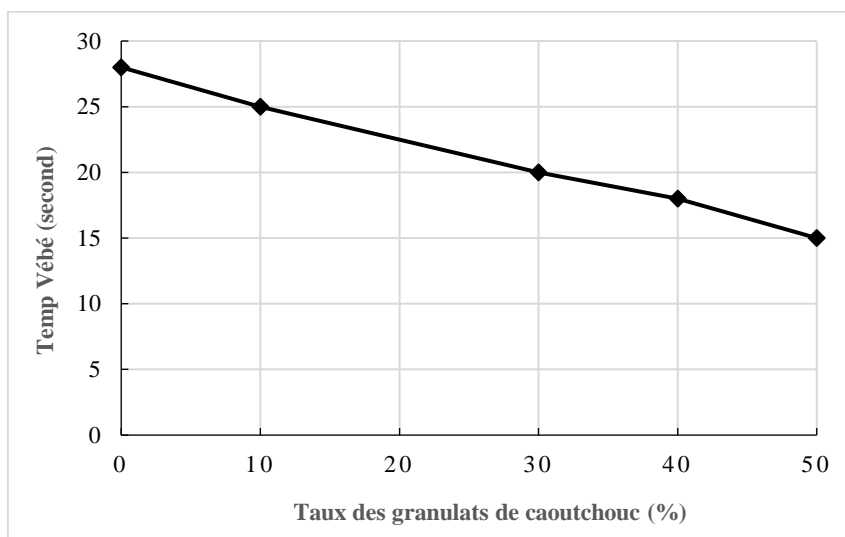


Figure 5.5 : Effet du caoutchouc sur la maniabilité du béton de sable compacté (BSC)

L'incorporation des granulats de caoutchouc diminue le temps de compactage (temps Vébé). Les valeurs de temps obtenus étaient comprises entre 28 s à 15s. La diminution du temps Vébé serait due :

- La nature hydrophobe des granulats de caoutchouc, responsable du piégeage des bulles d'air.
- La faible absorption du caoutchouc par rapport aux granulats naturels, ce qui augmente la quantité d'eau libre dans le mélange et par conséquent le processus de compactage est devenu plus facile [94].

V.3.2 Les essais à l'état durci :

V.3.2.1 Résistance à la compression :

Les résultats obtenus en compression sont présentés dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Résistances à la compression des bétons de sable compactés testés en deuxième étape.

Désignation du mélange	Energie de compactage	Fc 7jours (MPa)	Fc 28jours (MPa)
BSC 0	E1	8,22 – 8,05 – 7,78	12,30 – 12,21 – 12,94
BSC 0	E2	9,40 – 9,03 – 8,95	13,55 – 12,84 – 12,57
BSC 0	E3	9,42 – 9,73 – 10,38	15,08 – 15,70 – 15,90
BSC 0	E4	10,53 – 10,80 – 11,04	15,78 – 16,20 – 15,80
BSC 10	E1	7,88 – 7,30 – 7,62	11,90 – 11,20 – 11,70
BSC 10	E2	8,66 – 8,31 – 9,32	12,21 – 11,55 – 12,77
BSC 10	E3	8,61 – 8,98 – 9,29	15,14 – 14,88 – 15,10
BSC 10	E4	9,62 – 9,40 – 9,97	15,10 – 15,56 – 15,70
BSC 30	E1	4,80 – 5,14 – 4,53	8,77 – 7,95 – 8,21
BSC 30	E2	5,28 – 5,12 – 6,23	8,65 – 8,90 – 8,54
BSC 30	E3	6,30 – 5,73 – 6,20	10,28 – 9,35 – 9,87
BSC 30	E4	6,89 – 7,40 – 6,80	11,12 – 11,68 – 10,30
BSC 40	E1	4,20 – 4,56 – 3,94	7,02 – 7,33 – 7,80
BSC 40	E2	4,70 – 4,52 – 5,63	8,13 – 7,69 – 7,82
BSC 40	E3	5,71 – 5,14 – 5,64	9,46 – 8,53 – 9,10
BSC 40	E4	6,32 – 9,80 – 5,95	10,20 – 10,46 – 9,52
BSC 50	E1	3,62 – 3,96 – 3,34	6,42 – 6,64 – 6,98
BSC 50	E2	4,12 – 4,34 – 4,66	7,56 – 7,11 – 7,70
BSC 50	E3	5,14 – 4,56 – 5,05	8,64 – 7,71 – 8,27
BSC 50	E4	5,53 – 5,77 – 5,45	9,06 – 9,30 – 8,90

Les Figures (5.6 et 5.7) montrent l'influence du pourcentage d'addition des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression.

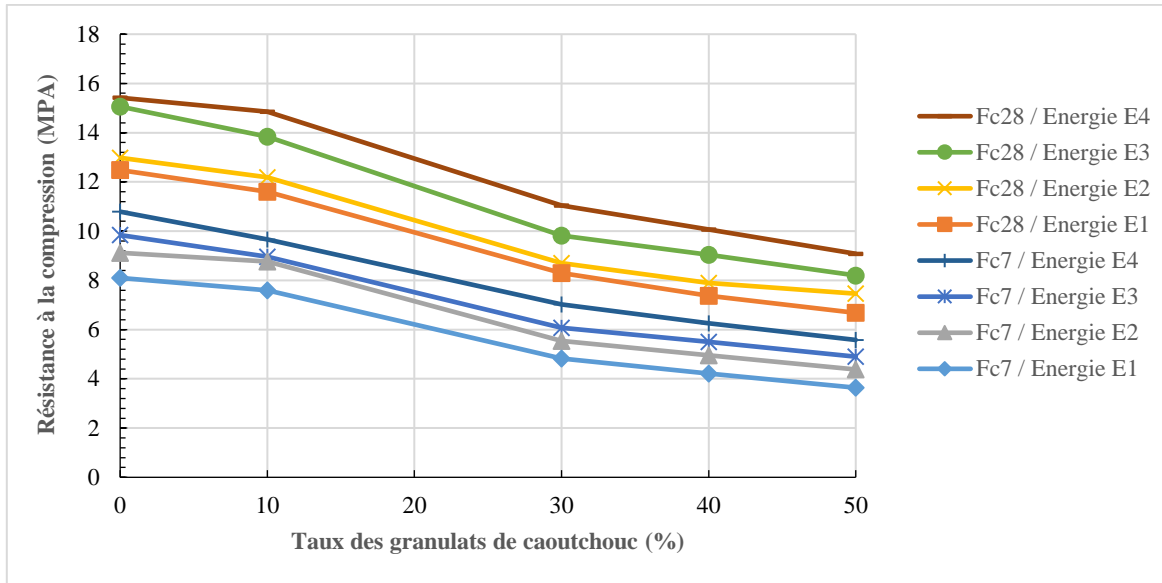


Figure 5.6 : Influence du pourcentage d'addition des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression.

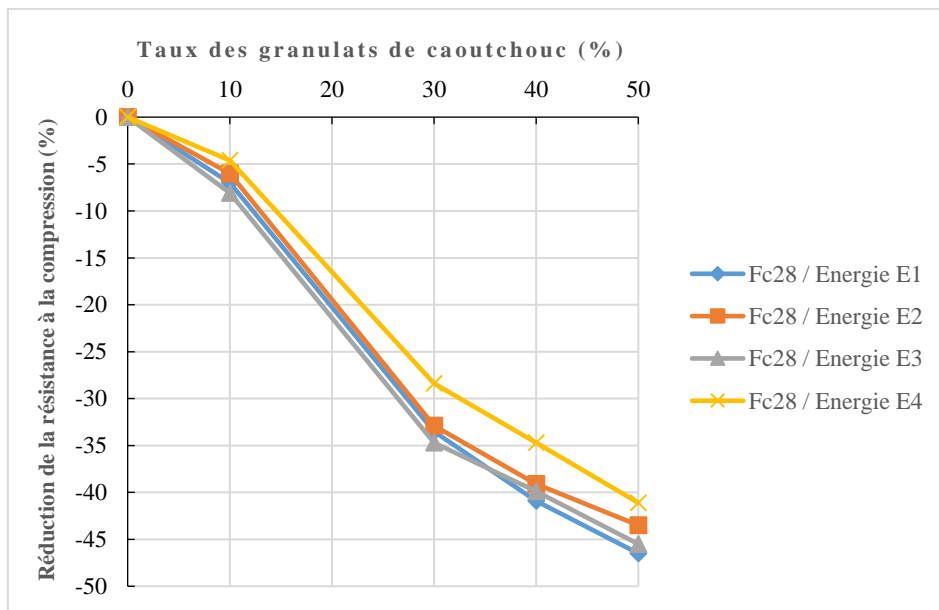


Figure 5.7 : Perte de résistance à la compression par rapport au béton témoin (béton sans substitution et compacté avec la même énergie)

La résistance augmente normalement avec l'âge du béton. L'incorporation des granulats de caoutchouc diminue sensiblement la résistance à la compression du béton (voir Fig. 5.6 et Fig.5.7). Par exemple, la perte de résistance à la compression par rapport au béton témoin (Béton sans substitution et compacté avec la même énergie) est comprise entre 40 et 50% pour le béton de sable compacté avec 50% des granulats de caoutchouc. On constate que la résistance à la compression est très sensible à l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes [92,95].

Les Figures (5.8 et 5.9) montrent l'effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression à 7 jours et 28 jours.

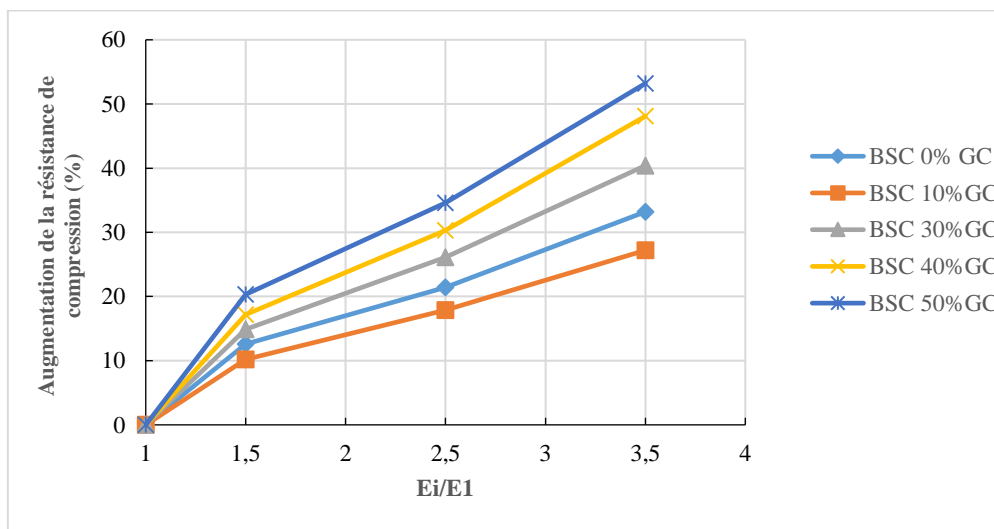


Figure 5.8 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression à 07 jours.

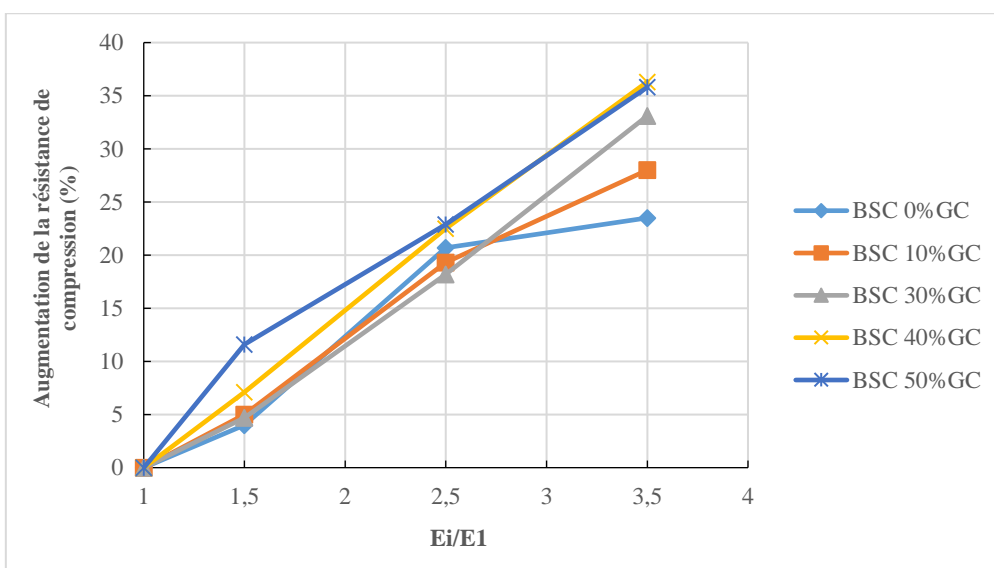


Figure 5.9 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression à 28 jours.

L'augmentation de l'énergie de compactage améliore la résistance à la compression de tous les bétons testés. L'étude réalisée par Arquie et al. [96] confirme ces résultats. Nous avons constaté la même différence de comportement entre 7 jours et 28 jours (voir Figure 5.8 et Figure 5.9).

La Figure 5.10 illustre l'amélioration de la résistance à la compression par augmentation de l'énergie de compactage sur les bétons de sable compactés à base des granulats de caoutchouc.

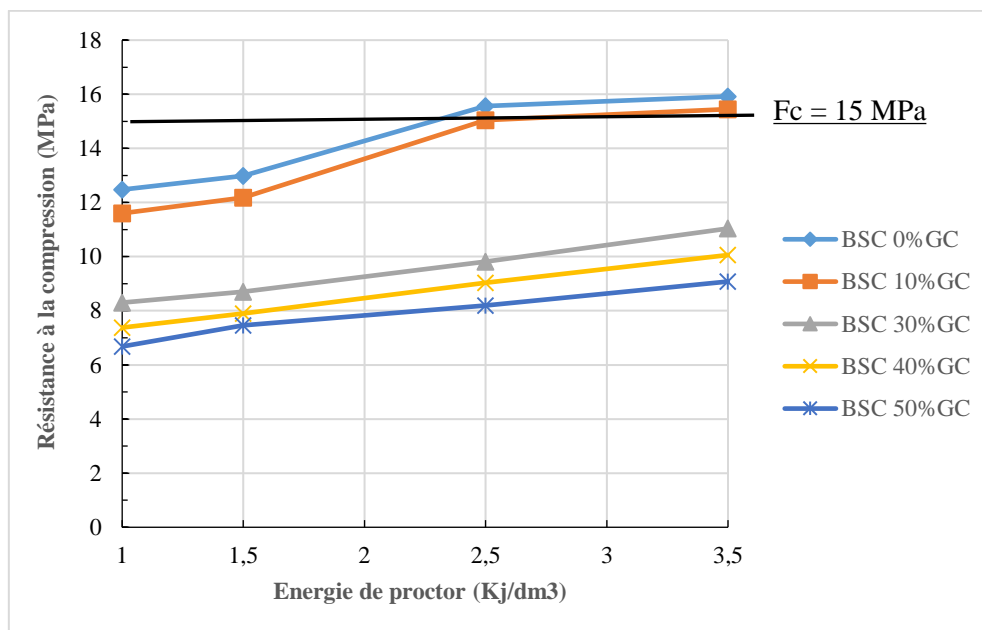


Figure 5.10 : Amélioration de la résistance à la compression par augmentation de l'énergie de compactage

Si l'on prend une résistance de référence à 28 jours du béton de sable compacté ($f_c = 15$ MPa), cette résistance dans la substitution de 0 % ou 10 % de sable peut être atteinte par des granulats de caoutchouc en appliquant l'énergie Proctor E3 et E4.

Avec ces résultats, ce type de béton peut être classé, selon la classification de la norme française NF P 98-170 [97] relative aux bétons routiers, en classe 1.

V.3.2.2 Résistance à la traction par fendage :

Les résultats obtenus en traction par fendage sont présentés dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Résistances à la traction des bétons de sable compactés testés en deuxième étape.

Désignation du mélange	Energie de compactage	Ft 7jours (MPa)	Ft 28jours (MPa)
BSC 0	E1	1,12 – 1,08 – 1,04	1,53 – 1,50 – 1,47
BSC 0	E2	1,19 – 1,14 - 1,10	1,64 -1,59 – 1,56
BSC 0	E3	1,24 – 1,27 – 1,29	1,72 – 1,74 – 1,77
BSC 0	E4	1,25 – 1,30 -1,26	1,75 – 1,79 – 1,76
BSC 10	E1	1,09 – 1,04 – 1,06	1,49 – 1,44 – 1,46
BSC 10	E2	1,12 – 1,10 - 1,17	1,57 – 1,52 – 1,60
BSC 10	E3	1,18 – 1,20 – 1,23	1,65 – 1,67 – 1,69
BSC 10	E4	1,24 – 1,23 – 1,28	1,74 – 1,72 – 1,76
BSC 30	E1	0,85 – 0,87 – 0,79	1,17 – 1,20 – 1,12
BSC 30	E2	0,89 – 0,86 – 0,95	1,23 – 1,19 – 1,31
BSC 30	E3	1,05 – 0,99 – 1,01	1,44 – 1,38 – 1,41
BSC 30	E4	1,09 – 1,11 – 1,04	1,50 – 1,53 – 1,47
BSC 40	E1	0,79 – 0,82 – 0,74	1,09 – 1,13 – 1,04
BSC 40	E2	0,85 – 0,83 – 0,92	1,15 – 1,13 – 1,25
BSC 40	E3	1,02 – 0,95 – 0,98	1,38 – 1,31 -1,35
BSC 40	E4	1,06 – 1,09 – 1,03	1,44 – 1,48 – 1,41
BSC 50	E1	0,76 – 0,78 – 0,69	1,02 – 1,06 – 0,96
BSC 50	E2	0,80 – 0,77 – 0,86	1,08 – 1,05 – 1,18
BSC 50	E3	0,96 – 0,90 – 0,92	1,32 – 1,25 – 1,29
BSC 50	E4	0,99 – 1,04 – 0,97	1,38 – 1,43 - 1,36

Les Figures (5.11 et 5.12) montrent l'influence du pourcentage d'addition des granulats de caoutchouc sur la résistance à la traction par fendage.

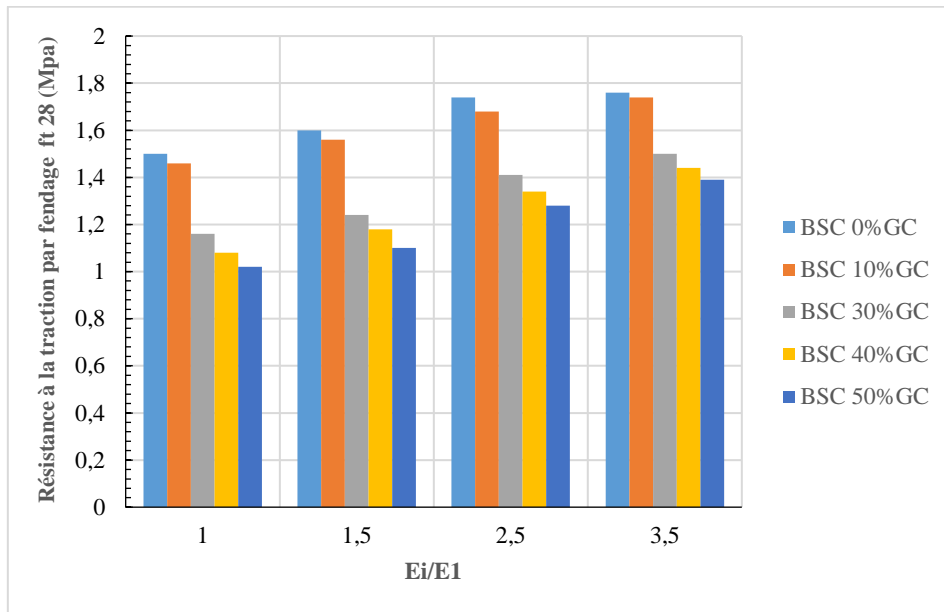


Figure 5.11 : Influence du pourcentage d'addition des granulats de caoutchouc sur la résistance à la traction par fendage

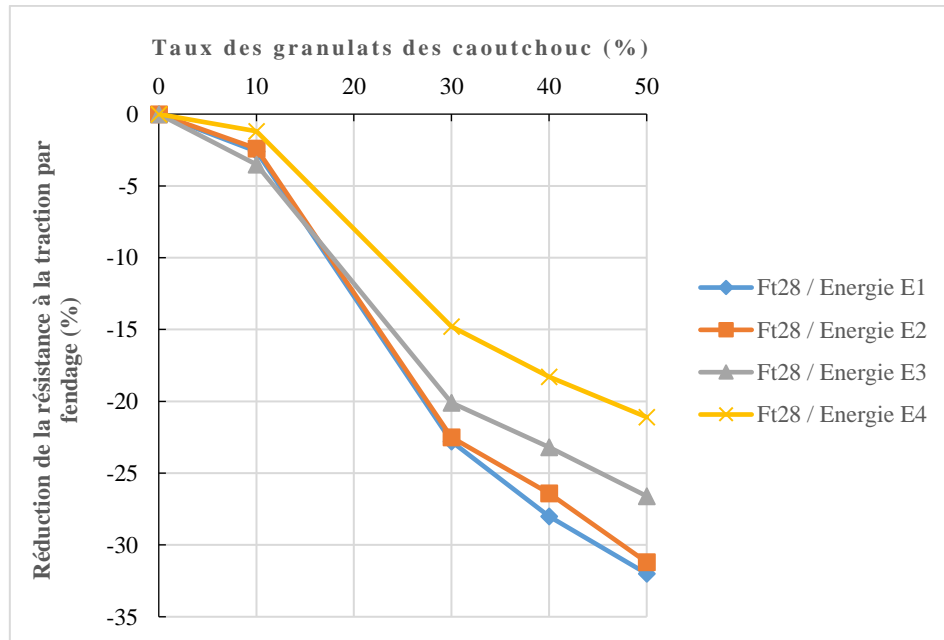


Figure 5.12 : Perte de la résistance à la traction par rapport au béton témoin (Béton sans substitution et compacté avec la même énergie).

Pour tous les bétons et pour quatre énergies Proctor, les résultats montrent que la résistance à la traction par fendage diminue avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc d'une manière similaire à celle observée pour la résistance à la compression. Cependant, la réduction de la résistance à la traction par fendage est moins importante que celle de la résistance à la compression (voir Figures 5.7 et 5.12). Par exemple, la perte de résistance à la traction, par rapport au béton témoin, se situe entre 30 et 35% pour le béton de sable compacté avec 50% des granulats de caoutchouc. On constate que la résistance à la traction par fendage est très sensible à l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes [94,98].

Les Figures (5.13 et 5.14) montrent l'effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction par fendage à 7 jours et 28 jours.

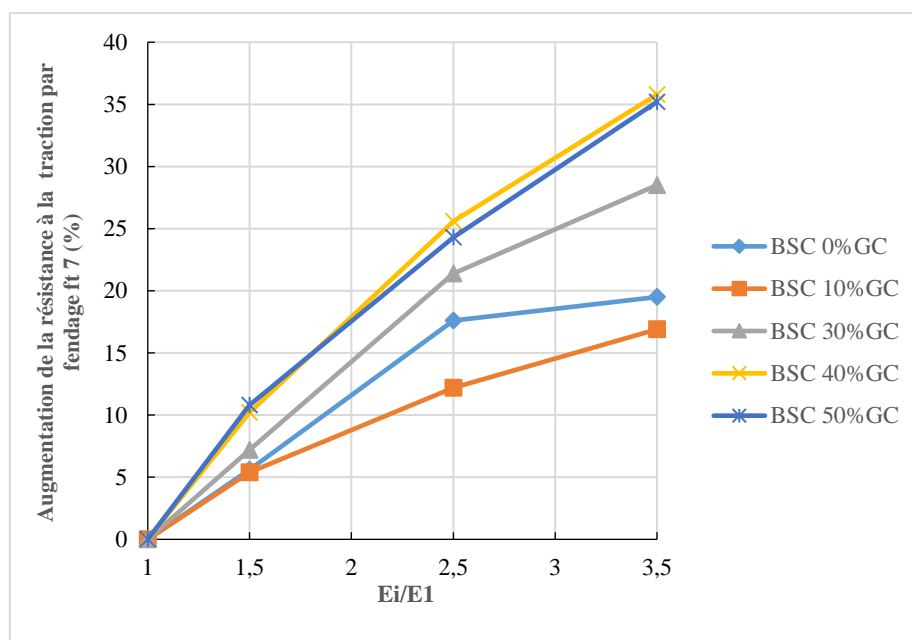


Figure 5.13 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction à 07 jours.

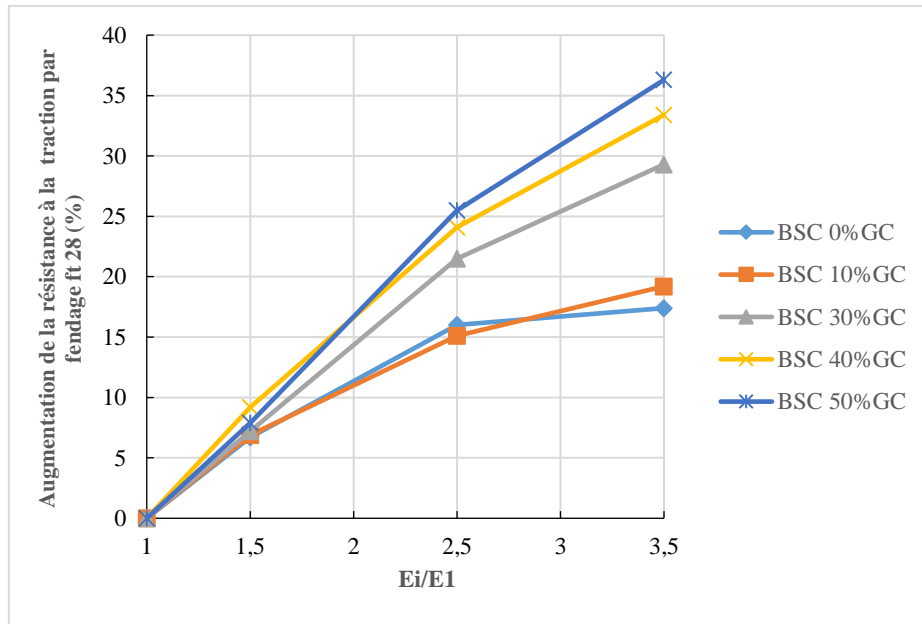


Figure 5.14 : Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction à 28 jours.

L'augmentation de l'énergie de compactage améliore la résistance à la traction de tous les bétons testés. Les études réalisées par [96,99] confirment ces résultats. Nous avons constaté la même différence de comportement entre 7 jours et 28 jours (voir Figure 5.13 et Figure 5.14).

V.3.2.3 Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage :

La Figure 5.15 illustre la relation entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression des BSC.

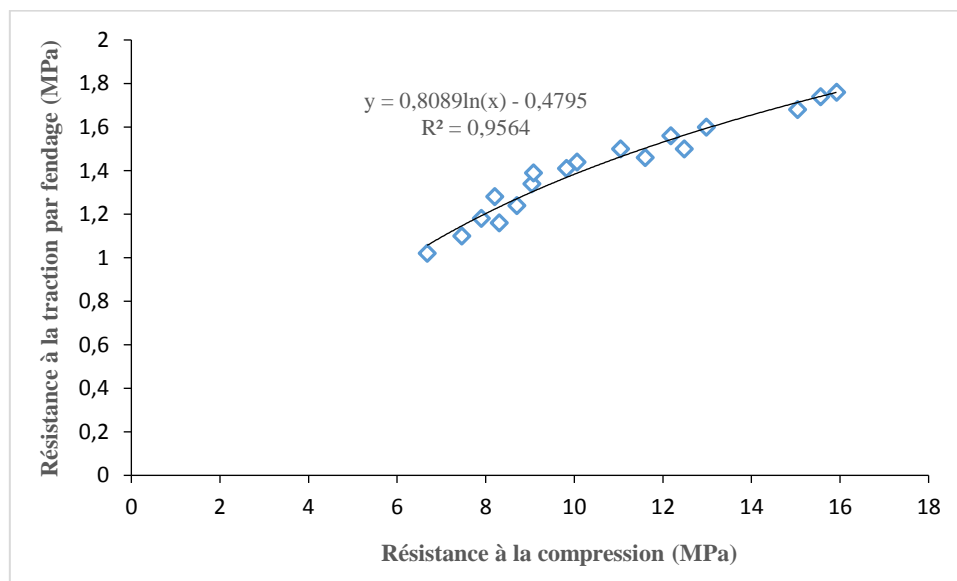


Figure 5.15 : Relation entre résistance à la traction par fendage et résistance à la compression.

Le rapport calculé entre la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons testés varie entre 6,74 et 9,11. Ce rapport est considéré comme un rapport faible par rapport à celui des bétons ordinaires, qui est d'environ 12.

V.4 Conclusion :

De la présente étude sur le béton de sable compacté, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- La densité sèche maximale varie un peu lorsque la teneur en eau varie sensiblement. Cette forme de courbe montre que le béton de sable compacté est un matériau peu sensible à la variation de la teneur en eau, et qu'il est très difficile de déterminer le Proctor optimale.
- Les valeurs d'humidité optimale (W_{opt}) des mélanges de béton avec l'ajout des granulats de caoutchouc sont plus élevées que celles sans ajout. Cette eau ne participe pas à l'hydratation du ciment mais entraîne une réduction de la densité spécifique apparente sèche des mélanges.
- La masse volumique à l'état frais diminue avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc
- L'incorporation des granulats de caoutchouc diminue le temps de compactage (temps Vébé).
- L'incorporation des granulats de caoutchouc diminue sensiblement la résistance à la compression du béton. La perte de résistance à la compression par rapport au béton témoin est comprise entre 40 et 50% pour le béton de sable compacté avec 50% des granulats de caoutchouc. On constate que la résistance à la compression est très sensible à l'augmentation de la teneur en caoutchouc.
- L'augmentation de l'énergie de compactage améliore la résistance à la compression de tous les bétons testés. Nous avons constaté la même différence de comportement entre 7 jours et 28 jours.
- Le béton de sable compacté a montré une résistance à compression au-dessus de 15 MPa, pour la substitution de 0 % ou 10 % du sable par des granulats de caoutchouc en appliquant l'énergie Proctor E3 et E4. Avec ces résultats, ce type de béton peut être classé,

selon la classification de la norme française NF P 98-170 [97] relative aux bétons routiers, en classe 1.

- Pour tous les bétons et pour quatre énergies Proctor, les résultats montrent que la résistance à la traction par fendage diminue avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc d'une manière similaire à celle observée pour la résistance à la compression. La perte de résistance à la traction, par rapport au béton témoin, se situe entre 30 et 35% pour le béton de sable compacté avec 50% des granulats de caoutchouc. On constate que la résistance à la traction par fendage est très sensible à l'augmentation de la teneur en caoutchouc.
- L'augmentation de l'énergie de compactage améliore la résistance à la traction par fendage de tous les bétons testés. Nous avons constaté la même différence de comportement entre 7 jours et 28 jours.
- Le rapport calculé entre la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons testés varie entre 6,74 et 9,11. Ce rapport est considéré comme un rapport faible par rapport à celui des bétons ordinaires, qui est d'environ 12.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale et Perspectives

Ce travail qui s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux disponibles et facilement accessibles a pour but d'étudier l'effet de caoutchouc sur le comportement des bétons de sable autoplaçant et compactés afin de valoriser ces déchets dans la confection du béton, et cela nous permet d'éliminer ces déchets par recyclage d'où protection de l'environnement et de trouver un autre source d'utilisation de ce nouveau matériau en technique routière.

Sur la base des résultats de cette étude expérimentale, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- **Sur le béton de sable Autoplaçant (BSAP) :**
 - Une diminution de la masse volumique à l'état frais est observé avec l'augmentation de taux des poudrettes de caoutchouc. Cette réduction peut s'expliquer par la faible masse volumique des poudrettes de caoutchouc.
 - L'incorporation de granulats de caoutchouc dans des bétons de sable autoplaçant (BSAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant l'augmentation de l'affaissement lorsqu'en augmente du taux d'incorporation.
 - Une diminution de temps à l'entonnoir V-Funnel avec l'augmentation du taux des poudrettes de caoutchouc. Les valeurs de temps de l'entonnoir V-Funnel sont situées à l'intérieur de l'intervalle recommandé par la norme (NF EN 12350 – 9, 10).
 - On remarque que la teneur en air occlus augmente en augmentant le dosage des poudrettes de caoutchouc.

- La masse volumique sèche diminue avec l'augmentation du taux des poudrettes de caoutchouc.
- Les granulats de caoutchouc font chuter la résistance à la compression (R_{c28}) des bétons étudiés.
- On remarque que la résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du dosage des poudrettes de caoutchouc.
- Les granulats de caoutchouc incorporés dans les mélanges étudiés augmentent le retrait à tous les âges avec l'augmentation de leurs teneurs.
- L'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le mélange.
- **Sur le béton de sable compacté (BSC) :**
 - La densité sèche maximale varie un peu lorsque la teneur en eau varie sensiblement. Cette forme de courbe montre que le béton de sable compacté est un matériau peu sensible à la variation de la teneur en eau.
 - Les valeurs d'humidité optimale (W_{opt}) des mélanges de béton avec l'ajout des granulats de caoutchouc sont plus élevées que celles sans ajout. Cette eau ne participe pas à l'hydratation du ciment mais entraîne une réduction de la densité spécifique apparente sèche des mélanges.
 - La masse volumique à l'état frais diminue avec l'augmentation du taux des granulats de caoutchouc. Cette réduction est due la faible masse volumique des granulats de caoutchouc.
 - L'incorporation des granulats de caoutchouc diminue le temps de compactage (temps Vébé).
 - L'incorporation des granulats de caoutchouc diminue sensiblement la résistance à la compression du béton. La perte de résistance à la compression par rapport au béton témoin est comprise entre 40 et 50% pour le béton de sable compacté avec 50% des granulats de caoutchouc. On constate que la résistance à la compression est très sensible à l'augmentation de la teneur en caoutchouc.

- L'augmentation de l'énergie de compactage améliore la résistance à la compression de tous les bétons testés. Nous avons constaté la même différence de comportement entre 7 jours et 28 jours.
- Le béton de sable compacté a montré une résistance à compression au-dessus de 15 MPa, pour la substitution de 0 % ou 10 % du sable par des granulats de caoutchouc en appliquant l'énergie Proctor E3 et E4. Avec ces résultats, ce type de béton peut être classé, selon la classification de la norme française NF P 98-170 [97] relative aux bétons routiers, en classe 1.
- Pour tous les bétons et pour quatre énergies Proctor, les résultats montrent que la résistance à la traction par fendage diminue avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc d'une manière similaire à celle observée pour la résistance à la compression. La perte de résistance à la traction, par rapport au béton témoin, se situe entre 30 et 35% pour le béton de sable compacté avec 50% des granulats de caoutchouc. On constate que la résistance à la traction par fendage est très sensible à l'augmentation de la teneur en caoutchouc.
- L'augmentation de l'énergie de compactage améliore la résistance à la traction par fendage de tous les bétons testés. Nous avons constaté la même différence de comportement entre 7 jours et 28 jours.
- Le rapport calculé entre la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons testés varie entre 6,74 et 9,11. Ce rapport est considéré comme un rapport faible par rapport à celui des bétons ordinaires.

Cette étude montre clairement qu'il existe une grande opportunité d'utiliser des granulats de caoutchouc dans des bétons de sable autoplaçant et compactés.

Les résultats obtenus nous encouragent d'utiliser les bétons de sable autoplaçant (BSAP) et compactés (BSC) en technique routière au vu des avantages économiques et environnementaux.

Perspectives

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier l'effet de l'optimisation du pourcentage de caoutchouc, du dosage du ciment, de l'utilisation d'adjuvants, des niveaux d'énergie et des méthodes de prétraitement des granulats de caoutchouc sur les caractéristiques mécaniques des bétons de sable.

Une grande quantité des granulats de caoutchouc est défavorable à la résistance mécanique; cependant, on peut améliorer cette résistance en augmentant l'énergie de compactage qui peut en retour améliorer les propriétés mécaniques.

La fabrication sur chantier du béton de sable compacté est une opération nécessitant une technicité particulière. En effet, une parfaite maîtrise et une attention doivent être apportées au contrôle des différents dosages particulièrement le dosage en eau.

Il est recommandé de réaliser d'une planche d'essai à l'échelle réelle au nouveau d'une route présentant un trafic significatif, afin d'observer le comportement réel de ce type de structure.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- Trouzine, T.H., Asroun, A., Belabdouahab, F., Long, N.T. Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. Revue Nature et Technologie. 2011, 5: 28-35.
- [2]- Sablocrete. Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris1994: 235 pages.
- [3]- NF P 18-500. Béton. Béton de Sable.AFNOR.1994.
- [4]- NF P15-433. Méthodes d'essais des ciments. Février 1994.
- [5]- Chauvin, J.J., Grimaldi, G. Les bétons de sable. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) 157. pp 9-15.
- [6]- NF P18-101.Normes française. Granulats. Définitions et classifications. Expérimentale. Décembre 1990.
- [7]- NF P18-301. Normes française. Granulats. Granulats naturels pour bétons hydrauliques. Homologuée décembre 1983.
- [8]- Benaïssa, A., Morlier, P., Tram V. Le béton de sable un matériau non fissurant. Algérie équipement 06.1992, pp 7-10.
- [9]- NF P 18-103. Adjuvants pour béton. Août 1989.
- [10]- NF P 18-303. Eau de gâchage pour béton. Août 1999.
- [11]- Mimouni, M., Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de construction. Algérie équipement 15, 2-7.1994.
- [12]- PENPC. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Béton de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation. France 1994.
- [13]- Abidelah, A., Bouchair, A., Kerdal, D.,Ayed, K. Characterization of a Self-Compacting Sand-concrete using the quarry waste. Canadian Journal of Civil Engineering.2009, pp36.
- [14]- Bouziani, T., Benmounah, A., Bedrina, M., Lamara, M. Effect of marble powder on the properties of Self-Compacting Sand-Concrete. The Open Construction and Building Technology Journal.2011. Vol. 5, pp. 25-29.

- [15]- Association Française de Génie Civil. Bétons Auto-plaçant. Recommandations provisoires, Documents scientifiques et techniques, juillet 2000.
- [16]- Djebien, R., Belachia, M., Hebhouh, H. Effect of marble waste fines on rheological and hardened properties of sand concrete. *Structural Engineering and Mechanics*.2015, pp.1241-1251
- [17]- Tsvilisa, S., Batisa, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, Gr., Theodossisa, D. Propertie and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cement and Concrete Res.*2000,30 p.
- [18]- Ahmed Chaouche Ali. Etude des caractéristiques des bétons de sable de dune. Mémoire de Magister. ENP Alger.1993, 108 pages.
- [19]- Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M.M., Bali, A. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Université Amar Thélidji Laghouat*.2005, 668 p.
- [20]- C.E.B.T.P. Synthèse de connaissance sur le béton de sable. Opération 52 G 119 ; LRPC de bordeaux. Décembre 1986.
- [21]- Chauvillard et coll., Chanvillard G., Basuyaux O. Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées. *Bulletin de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris* 1996, pp 49-63.
- [22]- Benaissa, A., Morlier, P., Viguier, C ., Cauvin, J.J . Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable. *Annales de L'ITBTP*.juin 1992 N°504.
- [23]- Chauvin, J.J. ; Grimaldi, G. Les bétons de sable. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)*. Sept 1988 N°157, pp.9-15.
- [24]- Bederina, M. Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux: Effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau. Mémoire de Magister, Université Amar Thélidji Laghouat. Octobre 2000.110 pages.
- [25]- GORISSE, F. Etudes des micro-bétons pour modèle de structures. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. France*. Dec 1972 N° 291.
- [26]- BENMALEK M L. Le béton de sable de dune : un matériau de construction performant pour le monde Arabe. *First Arab Mechanics Congress, Damaascus, Syria* 1997, 261p

- [27]- Gauthier P., Marchand J., Boisvert L., Ouellet E. et Pigeon M. Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtement en béton compacté au rouleau. Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Département de génie civil, Université Laval, pagination multiple. Canada 2000.
- [28]- Gauthier, P., & Marchand, J. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association des constructeurs de routes et de grands travaux du Québec.2002.
- [29]- Gagné, R. High-performance roller compacted concrete for pavement - Mixture design, application and durability .International symposium on engineering materials for sustainable development, Novembre 2000, Okayama, Japon, pp. 74-88.
- [30]- Site de l'American concrete Pavement Association, <http://www.pavement.com>.
- [31]- Piggott, R. Ten years of heavy-duty pavement in western Canada. Concrete International, Desing & Construction. 1987, February 9(2), pp. 37-42.
- [32]- Harrington, D. et al. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report. National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Jowa State University.2010
- [33]- Gauthier, P. et Marchand, J. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, pagination multiple.2004.
- [34]- Marchand, J., Gagné, R., Ouellet, E., & Lepage, S. Mixture proportioning of roller compacted concrete, a Review. Concrete Technology Special Publication SP-171-22.1997, pp 457-487.
- [35]- ACI Committee. State-of-art report on roller compacted concrete pavements. American Concrete Institute, ACI 325-95.1995
- [36]- Gagné, R. Proportioning for non-air-entrained RCCP . Concrete International,21(5). May 1999, pp. 37-41.
- [37]- Pilon, B. Propriétés mécaniques et durabilité au gel des bétons obtenus par retraitement à haute performance. Québec 1998.
- [38]- Kokubu, K., Cabrera, J., & Ueno, A. Compaction Properties of Roller Compacted Concrete. Cement & Concrete Composites, 1999, pp. 109-117.

- [39]- Lepage, S. Etude d'un nouveau procédé de production de béton compacté au rouleau par addition de coulis dans un mélange granulaire. Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke.1996
- [40]- Neville, A.M. Propriétés des bétons. Centre de recherche interuniversitaire sur le béton CRIB, Sherbrooke, Laval, Eyrolles, France.2000. pp. 255-401.
- [41]- Marchand, J. Durabilité au gel-dégel et à l'écaillage des revêtements de béton compacté au rouleau. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Département de génie civil, Québec.1989
- [42]- Pigeon, M., & Marchand, J. Frost resistance of roller compacted concrete. Concrete International. Juillet 1996 18(7), pp. 22-26.
- [43]- LCPC–SETRA. Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide Technique.1994.
- [44]- Fiche technique. Société des ciments de Hadjar-Soud, filiale du groupe GICA. Skikda.
- [45]- NF P 18-500. Béton, Béton de Sable.AFNOR.1994
- [46]- Notice technique. MEDAPLAST SP 40, superplastifiant –haut réducteur d'eau. Granitex. 93.
- [47]- NF EN 12350-8, Essai pour béton frais, partie 8 : Béton auto-plaçant, Essai d'étalement au cône d'Abrams, juin 2000.
- [48]- NF EN 12350-9, Essai pour béton frais, partie 9: Béton auto-plaçant, Essai d'écoulement au cône d'Abrams, juin 2000.
- [49]- NF EN 12350-7, Essai pour béton frais, partie 7: Teneur en air occlus. Avril 2012.
- [50]- NF EN 12390-7. Essai pour béton durci, Partie 7: masse Volumique du béton. Avril 2012.
- [51]- NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments, Partie 1: détermination des résistances mécaniques Indice de classement. Avril 2006.
- [52]- NF P15-433. Méthodes d'essais des ciments: détermination du retrait et du gonflement. Février 1994.
- [53]- NF EN 480-5. Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis - Méthodes d'Essai -Partie5: détermination de l'Absorption Capillaire. Janvier 2006.

- [54]- Boudaoud, Z., Breysse, D. Etude des effets du cobroyage d'un sable et d'un clinker sur les propriétés d'un béton de sable. *Materials and Structures. Matériaux et Constructions. RILEM Publications.* Vol. 35, 310-316. June 2002.
- [55]- Beddar, M., Boudaoud, Z., Aziz Chikouche, M., Saadia M'hammedi, H. Experimental Plans Method to Formulate a Resin Concrete. *Journal of Civil Engineering and Architecture. DAVID PUBLISHING.* Vol 6, pp. 1376–1383. Oct. 2012.
- [56]- Alexis, J. Pratique industrielle de la méthode Taguchi. Les plans d'expériences. AFNOR 1995.
- [57]- Pillet, M. Introduction aux plans d'expérience par la méthode Taguchi, Les éditions d'organisation, 1992.
- [58]- Sado, G., Sado, M.C. Les plans d'expériences: De l'expérimentation à l'assurance qualité, AFNOR, 1991.
- [59]- Walter Tinsson. Constructions et analyses statistiques Plans d'expérience. 2000.
- [60]- Baron, J., Ollivier, J.P. Les bétons bases et données pour leur formulation. Edition, Eyrolles. Mars 1996.
- [61]- Opoczky, L., Evolution de la distribution granulométrique lors du cobroyage d'un mélange clinker-calcaire. *ZKG international.* 1992.
- [62]- Benoit, D., Tourbier, Y. Germain-Tourbier, S., Les plans d'expériences. Construction et analyse. Lavoisier 1994.
- [63]- ASTM D1557. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort .2007. D1557-07, pp.1–13.
- [64]- NF 94-093. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau- Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié. Octobre 2014.
- [65]- Bartos, P.J.M., Sonebi, M., Tamimi, A. Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests. Report of RILEM Technical Committee TC145 WSM - Workability of Special Concrete Mixes, RILEM Publications Paris. 2002
- [66]- NF EN 12350-3. Essai pour béton frais-essai Vébé. Avril 2012.
- [67]- NF EN 12390-3. Essai pour béton durci, Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes. Avril 2012.
- [68]- NF EN 12390-6. Essai pour béton durci, Partie 6: détermination la résistance en traction par fendage d'éprouvettes. Avril 2012.

- [69]- Fadiel, A., Al Rifaie, F., Abu-Lebdeh, T., Fini, E. Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014, 7(1): 1 -11.
- [70]- Eiras, J.N., Segovia, F., Borrachero, M.V., Monzó, J., Bonilla, M., Payá, J. Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires. *Materials and Design*. 2014, 59: 550-557.
- [71]- Bharani Raj, J., Ganesan, N., Shashikala, A.P. Engineering properties of self-compacting rubberized concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2011, 30(23): 1923-1930.
- [72]- Garros, M. Composites cimentaires incorporant des granulats de caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Thèse de doctorat. Université Paul Sabathier-Toulouse. France. 12 juin 2007.
- [73]- Ganesan, N., Bharati Raj, J., Shashikala, A.P. Strength and durability studies of self-compacting rubberized concrete . *The Indian Concrete Journal*. 2012, 15-24.
- [74]- Aziz, F.N.A.A., Bida, S.M., Nasir, N.A.M., Jaafar, M.S. Mechanical properties of lightweight mortar modified with oil palm fruit fibre and tire crumb. *Construction and Building Materials*. 2014, 73: 544-550.
- [75]- Kaloush, K., Way, G., Zhu, H. Properties of crumb rubber concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005, 1914: 8-14.
- [76]- Siddique, R., Naik, T.R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview. *Waste Management*. 2004, 24(6): 563-569.
- [77]- Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(1): 109-117.
- [78]- Boukour, S., Benmalek, M.L. Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate. *Construction and Building Materials*. 2016, 120: 473–481
- [79]- Bendjillali, K., Makhoulfi, Z. Etude de l'effet de la nature des granulats sur le comportement mécanique du béton en zones chaudes et arides « Contribution de la cure ». 2^{ème} Séminaire International d'innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, Rabat, 23 et 24 Mai 2011, 06 pages.

- [80]- Benabed, B., Azzouz, L. et Damene, Z. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de sable de dune. Colloque CMEDIMAT, Oran, 06 et 07 Décembre 2005, 08 pages.
- [81]- Boudaoud, Z., Beddar, M. Effects of Recycled Tires Rubber Aggregates on the Characteristics of Cement Concrete. *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 2 No. 4, 2012, pp. 193-197.
- [82]- Brian, J.O., Mutuku, R.N., Kabubo, C.K. Mechanical characteristics of normal concrete partially replaced with crushed clay bricks. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2015, 6(1):62-75.
- [83]- Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B. Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(12): 2283-2289.
- [84]- Li, Z., Li, F., Li, J. Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. *Magazine of Concrete Research*. 1998, 50(4): 297-304.
- [85]- Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezzeb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M. Physicomechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites*. 2007, 29(10): 732-740.
- [86]- Kumutha, R., Vijai, K. Strength of concrete incorporating aggregates recycled from demolition waste. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2010, 5(5): 64-71.
- [87]- Cabrera, F., Gomez, J., Almaral, J., Arredondo, S., Corral, R. Mechanical properties of mortars containing recycled ceramic as a fine aggregate replacement. *Journal of construction*. 2015, 14(3): 22-29.
- [88]- Rana, J., Rughooputh, R. Partial replacement of fine aggregates by rubber in concrete. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*. 2014,5(5):312-317.
- [89]- Pedro, D., De Brito, J., Veiga, R. Mortars made with fine granulate from shredded tires. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*. 2013, 25(4): 519-529.
- [90]- Sukontasukkul, P., Tiamlom, K. Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size. *Construction and Building Materials*. 2012, 29: 520-526.

- [91]- Cao, W. Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*. 2007, 21: 1011-1015.
- [92]- Topçu, I.B. The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995, 25(2): 304-310.
- [93]- Zdiri, M. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux. Thèse Cotutelle entre l'Ecole Nationale d'Ingénieur (Tunisie) et l'Université d'Artois (France). Octobre 2008.219 pages.
- [94]- Meddah, A., Beddar, M. & Bali, A. Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*.2014,72, pp.187–192.
- [95]- Khatib, ZK., Bayomy, FM Rubberized Portland cement concrete. *J Mater Civ Eng*.1999 11(3):206–213.
- [96]- Arquie, G., Morel, G. *Le Compactage*. Eyrolles France.1988, pp. 1-48.
- [97]- NF P 98-170. *Chaussées en béton de ciment*. AFNOR, France.2006.
- [98]- Segre, N., Joekes, I Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cem Concr Res*.2000. 30(9):1421–1425.
- [99]- Nanni, A., Ludwing, D. A., Shoenberger J. E. Phsico-Mecanical Proprieties and Load Transfer efficiency of RCC Pavement, *ACI Materials Journal*, N° 93-M40. Juillet 1996, pp. 356-361.