REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département du Génie de la Matière

Filière Génie Civil

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Construction et Matériaux

Thème

LE BÉTON DE SABLE À BASE DE DÉCHETS DE CAOUTCHOUC

Réalisé par :

Mr. SAHRAOUI Mohamed

Mr. NEBIH Islam

Encadré par :

Pr. KADERI El-hadj

Dr. DEBIEB Farid

Co-encadré par: Mr. GUENDOUZ Mohamed

JUIN 2015

REMERCIEMENTS

Nous remercions tous d'abord le tout puissant et miséricordieux: DIEU, qui nous a accordé sante, énergie et volonté, pour que nous soyons aujourd'hui ici avec ce parcours et ce travail.

Nous tenons à remercier vivement en premier lieu, nos promoteurs Pr KADRI El-Hadj, Dr DEBEIB Farid ainsi que Mr GUENDOUZ Mohamed pour leur aide et leurs conseils.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall technologique surtout Mlle BOUKHELKHAL Djamila pour son aide et sa disponibilité.

Un grand merci pour les ingénieurs du Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

Notre profonde gratitude s'adresse à tout le personnel du département du Génie de la matière et l'ensemble des enseignants qui en font partie.

Et nous n'oublions certainement pas nos parents nos amis ainsi tous ceux qui nous ont aidés dans notre tâche, nous leur dirons merci.

Dédicaces

Avant de penser aux " dédicaces ", je veux dédier ce simple travail à la personne qui était, et reste l'exemple qui m'inspire toujours : à ma chère tante F.Zohra

À mes adorables parents Qui ont tant sacrifié afin que j'arrive à devenir ce que je suis devenu aujourd'hui.

À ma grand-mère et ma tante.Z

À mon frère Mohamed et mes sœurs Amina et Faiza et leurs époux Fares et Kader

Et aux adorables petits Wassim, Yanis et Mira

À toutes les famille NEBIH et RAÏS

À mes copains durant ces cinq ans spécialement Mustapha Oussama et mes pines du laboratoire

À tout le groupe قل قل

À toute la promo de juin 2015 spécialement génie civil construction et matériaux et à tous les gens que je connais.

Et sans oublier à la fin mon binôme SAHRAOUI Mohamed qui m'accompagnait dans cette " mission " et à toute sa famille.

ISLAM

Dédicaces

Je dédie ce travail de mémoire couronnement

de mes études universitaires à

ma mère sans qui rien n'aurait été possible

Sans oublié ma grand-mère

A mes tantes mes oncles, et toute ma famille.

A tous mes collègues de promotion de Juin 2015

A mon copain Mustapha REBAHI

Et à la fin mon binôme Islam et toute sa famille .

Mohamed

RESUME

ملخـص

تشكل النفايات المطاطية مجمعات من البقايا بسبب الحجم الذي تحتويه، مشوهة بذلك للطبيعة مع تواجدها لسنين طويلة.ولهذا وجب تشجيع إعادة تصنيعها. ولهذا يهدف مشروعنا إلى استعمال النفايات المطاطية (نعال الأحذية) المعادة في تصنيع الخرسانة الرملية . نوعان اثنان من نفايات نعال الأحذية (المرنة والصلبة) أضيفت إلى الخرسانة و ذلك بنسب تتغير من 10 إلى 40 % من كتلـة الاسمنت ، كما أن خصائـص الخرسانة قد تم تحليلـها و مقارنتـها في الحالة الرطبة و الصلبة مع خرسانة شاهدة. من النتائـج التجريبيـة يمكـن أن نستخلـص أن إضافة هذا النوع من النفايات إلى الخرسانة يؤدي إلى تحسين بعض الخصائص كالعزل الحراري مثلا.

كلمات مفتاح البحث : الخرسانة، المطاط، نعال الأحذية، الرسكلة.

RESUME

Les déchets en caoutchouc génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est, dans la plupart des cas, faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage. Ce projet a pour but d'étudier la faisabilité de valorisation des déchets de caoutchouc en général et celle des semelles des chaussures en particulier dans le béton de sable (BS). Deux types des déchets de semelles des chaussures (souple et rigide) sont ajoutés dans le BS par ajout avec des pourcentages varient de 10 % ,20% ,30% et 40% par rapport à la masse du ciment. Les propriétés à l'état frais et durci des différents bétons réalisés sont analysées et comparées. Les résultats expérimentaux, ont révélé que l'ajout de ce type de déchet dans le BS est bénéfique pour ce dernier et améliore certaines de ces propriétés comme l'isolation thermique.

Mots clés : caoutchouc, semelles des chaussures, valorisation, béton de sable.

ABSTRACT

The rubber waste materials generate bulky waste relative to their weight. Their release into the wild is sustainable and unattractive as their biodegradability is in most cases low. It is therefore appropriate to encourage recycling of this waste. This project aims to study the feasibility of recycling waste rubber in general and especially shoes soles waste in sand concrete (SC). Two types of shoes soles waste are added to the SC (10 %, 20%, 30% and 40%) by weight of cement. The fresh and hardened properties of different concretes made are analyzed and compared. The experimental results show that the addition of this type of waste in SC is benefit for this concrete and improves certain its properties such as thermal insulation.

Key words: Rubber, boots insoles, valorization, sand concrete.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

INTRODUCTION GENERALE:……1

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 VALORISATION ET RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL :.....2
I.1.1 Introduction : 2
I.1.2 Valorisation et recyclage des déchets dans le domaine de génie civil : 2
I.1.2.1 Les déchets :.....2
I.1.2.2 Origine de la production de déchets : 4
I.1.2.3 Constitution chimique du déchet.....4
I.1.2.4 Différents déchets utilisés en génie civil : 5
I.2 L'ACTIVITE DU RECYCLAGE DES DECHETS EN CONSTRUCTION.....6
I.2.1Recyclage des déchets : 6
I.2.2 Type de recyclage : 7
I.2.2.1 le recyclage in situ :.....7
I.2.2.2 le recyclage sélectif : 7
I.2.2.3 le recyclage en site fixe :.....7
I.2.3 Impacts du recyclage sur l'environnement : 7
I.3 CAOUCHOUC ET DECHETS DE CAOUCHOUC :.....8
I.3.1.1 Historique :.....8
I.3.1.2 définition :.....9
I.3.1.3 Composition chimique d'un caoutchouc [6] :.....10
I.3.1.4 Processus de fabrication des matières caoutchouc 15
I.3.1.5 Les type de caoutchouc.....16
I.3.1.5.1 Les pneus : 16
I.3.1.5.2 Les semelles des chaussures :.....18
I.3.1.6 Propriétés de matière caoutchouc [7]: 19
I.3.1.7 Durée de vie du caoutchouc [7] :.....21
I.3.2 les déchets de caoutchouc.....21
I.3.2.1 généralité :.....21
1.3.2.2 chiffres : 22
1.3.2.3 Recyclage de caoutchouc 23
I.4 LE BETON DE SABLE ET LES BETON A BASE DE DECHETS DE CAOUTCOUC : 24

I.4.1 Le béton de sable : 24
I.4.1.2 Introduction : 24
I.4.1.2 Historique: 24
I.4.1.3 définition de béton de sable : 27
I.4.1.4 Les composants du béton de sable : [17] 28
I.4.1.5 propriétés des bétons de sable : 32
I.4.1.6 formulation des bétons de sable : 49
I.4.1.7 déformation des bétons de sable : 60
I.4.1.8 exemples d'applications des bétons de sables [34] : 65
I.4.2 les bétons à base de déchets de caoutchouc : 67
I.4.2.1 L'histoire du béton : 67
I.4.2.2 les Bétons spéciaux : 67
I.4.2.2 béton de déchets de caoutchouc : 68
I.5- CONCLUSION : 82

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

II.1- Introduction : 83
II.2 Matériaux utilisés : 83
II.2.1 Les sables 83
II.2.2 Ciment : 85
II.2.3 Déchets de semelles des chaussures : 87
II.2.4 Eau de gâchage : 89
II.2.5 adjuvant «plastifiant » : 89
II.2.6Filler calcaire : 90
II.3 Mode opératoire : 91
II.4 Composition des mélanges : 92
II.5 Confection des éprouvettes 93
II.6 Essais réalisés : 94
II.6.1 Essai réalisé à l'état frais 94
A. L'Ouvrabilité 94
B. La densité : 96
II.6.2 Essais réalisé à l'état durci 96
A. La porosité [83]: 97

B.Essais de compression : 98
C.Essais de traction par flexion 99
D.Le module d'élasticité [84] : 100
E.Variation dimensionnelle 100
F.Absorption capillaire 103
G.Les Propriétés thermiques [92] 103
H.La résistance au feu [93] 105
II.6.3 Variables étudiées : 106

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

III.1 Introduction 109
III.2 Béton frais 109
III.2.1 Maniabilité 109
III.2.2 Air occlus 113
III.2.3 La densité 116
III.3 Béton durci : 118
III.3.1 La porosité 118
III.3.2 Résistances mécanique : 121
III.3.2.1 Résistances à la compression : 121
III.3.3.2 Résistances à la traction : 126
III.3.3 Le module d'élasticité : 131
III.4 Approche de durabilité : 133
III.4.1 Absorption d'eau : 133
III.4.2 Mesure des variations de longueur : 138
A. Retrait : 138
B. Gonflement : 142
III.4.3 Mesure des variations de masse : 147
A. Perte de masse : 147
B. Gain de masse : 150
III.4.4 Propriétés thermiques : 154
III.4.5 La résistance au feu : 157
A. La perte de masse : 157
B. La résistance à la compression : 161
III.5 Conclusion : 166

CONCLUSIONS ET RECOMMENDATIONS

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEX.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Tableau I.1 Quantités de déchets produits : évolution 2008 [69] 6

Tableau I. 2- composition moyenne d'un pneu VL en Europe [12] 17

Tableau I. 3- caractéristiques physiques d'un pneu [12] 17

Tableau I.4 : Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde 21

Tableau 1.5 : Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [17] 29

Tableau 1.6- dosages et résistances à la traction des bétons de sable de dunes [26] 40

Tableau 1-7 : Composition des bétons d'essais (BS-BO) [30] 60

Tableau 1-8 : Caractéristiques mécaniques des bétons d'essais (BS-BO) [30] 60

Tableau 1-9: Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D), [42] 75

Tableau 1-10 : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc, [54] 79

CHAPITRE II : Matériaux et Essais

Tableau II-1 : Caractéristiques physiques des sables. 85

Tableau II-2 : La composition chimique du ciment utilisé [94] 86

Tableau II-3 : Composition minéralogique du ciment utilisé [94] 87

Tableau II-4 : Caractéristiques des déchets de caoutchouc utilisées 89

Tableau II-5 : caractéristiques physiques des fillers calcaire utilisées 90

Tableau II-6 : L'analyse chimique des fillers calcaire utilisées 90

Tableau II-7 : composition des mélanges réalisé (pour 1 m³) 93

Tableau II.8 : Essais sur bétons frais. 94

Tableau II.9 : Essais sur bétons durcis. 97

CHAPITRE III : Résultats et interprétation

Tableau III.1 **:** les pourcentages de chute de la résistance de compression en fonction de pourcentage de l'ajout de déchets de semelles……125

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Figure I-1 : Structure des monomères [70] 10
Figure I-2 : La polymérisation d'un éthylène [71] 11
Figure I-3 : différents exemples de polymères linéaires [72] 12
Figure I-4 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b) [72] 12
Figure I-5 : polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes [72]. 13
Figure I-6 : Différents composition des matières caoutchouc 14
Figure I-7 : Processus de fabrication des matières caoutchouc 15
Figure1.8 : Incendie sur le site de stockage des pneus usagés[73] 16
Figure1-9 : Vieilles chaussures dans les déchets [74] 18
Figure I-10: Comportement d'un caoutchouc soumis à une contrainte mécanique [8] 20
Figure 1-11 : Différentes sollicitations mécaniques [75] 20
Figure I-12 : La production mondiale de caoutchouc naturel en 2014 [76] 22
Figure I-13 : Processus de recyclage de déchets de caoutchouc [8]. 23
Figure1-14 : phare de Port-Saïd 1969. (Egypte) [79] 25
Figure1-15 : Le pont de Brooklyn1871-72New York [79] 25
Figure 1-16 : La maison de COIGNET [78] 26
Figure1-17 : Aqueduc des eaux de captation de la rivière "La Vanne"[79] 27
Figure I-18 : BS, BS chargé et BO [79] 27
Figure I-19 : Evolution de la porosité en fonction du module de finesse) [81] 34
Figure I-20 : Variation du coefficient de compacité en fonction du diamètre .....
maximal des grains de sable (D_{max}) [81]. 34
Figure I-21 : Effet du dosage en filler sur la compacité du béton de sable [81] 35
Figure I-22 : Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables [81]36
Figure I-23 : Effet des ajouts sur la maniabilité du béton de sable [81]. 37
Figure I-24 : Effet du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire [81]. 37

Figure 1-25 : Effet du dosage en filler surla résistance (sable de dune) [81]. 38

Figure 1-26 : Effets du dosage et de la finesse de l'ajout sur la résistance à la compression [81]. 39

Fig. 1-27 : Effet de la granulométrie du sable et du rapport C/E .....

(ciment/eau) sur la résistance [81]..... 40

Fig. I-28: Evolution de déformation avec l'augmentation de la contrainte de .....

chargement [81]..... 42

Figure. I-29: Evolution du retrait dans le béton de sable [81]. 43

Figure. I-30: Evolution du retrait dans le béton de sable [81]. 44

Fig. I.31: Evolution du fluage dans le béton de sable [81]. 44

Fig I.32 : Eprouvettes non vibrées non piquées [65]..... 45

Figure1-33 : Aspect du Béton de sable de dune [20]. 48

Figure.1-34: Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [65] 51

Figure 1-35: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable. [65] [68] 52

Fig.1-36: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée 53

Figure1-37 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [65]..... 55

Fig 1-38: temps d'écoulement en fonction du dosage en fines d'addition. [65]..... 59

Fig 1-39: masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition. [65] 59

Figure 1-40 : Retrait total en fonction du taux de séchage BS [32] 62

Figure 1-41: Evolution de la perte en poids (%) dans le temps (jours) [30] 63

Figure 1-42 : Fluage propre (BS et BO) [33]..... 63

Figure 1-43 : Taux de déformation du fluage propre (BS et BO) [33]..... 63

Figure 1-44 : Modèle du fluage propre du BS [33]..... 65

Figure 1-45 : Pont de Saint-Martory .1724 [79] 66

Figure I -46 : Influence de G.C. sur l'affaissement [39]. 68

Figure I -47 : Influence de G.C. sur l'affaissement [40]. 69

Figure I-48: Variation de la masse volumique du béton incorporant des G.C [39] -a,[42]-b.70

Figure I-49 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [43]..... 71

Figure I-50: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0- 4mm remplacé par des G.C. 0-4mm) [46]..... 72

Figure I-51: Influence de l'adjonction de G.C. sur la résistance en compression, [43]..... 73

Figure I.52 : Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissement x100). 74

Figure I-53 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage, [39]..... 75

Figure I-54 : Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice, [39] 76

Figure I-55: Influence des G.C. sur le module d'élasticité, [50]..... 77

Figure I-56: Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en G.C., [51] 78

Figure I-57 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C., [54]..... 79

Figure I-58 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C., [46]..... 80

Figure I-59: Effet des G.C. sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel-dégel, Benazzouk A [57]. 85

CHAPITRE II : Matériaux et Essais

Figure II-1: L'aspect général des sables utilisées.....84

Figure II-2: La courbe granulométrique des sables et des déchets utilisés.....84

Figure II-3: Le ciment utilisé [94].....86

Figure II-4: Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 CHLEF. 86

Figure II-5:La forme des déchets de caoutchoucs rigides utilisés [91].....88

Figure II-6: La forme des déchets de caoutchoucs souple utilisés [91].....88

Figure II-7:Le type d'adjuvant Utilisées.....89

Figure II-8: La Roche calcaires broyées. 90

Figure II-10: Le malaxage des bétons au laboratoire 91

Figure II-11:Mesure de la maniabilité du béton de sable 95

Figure II-12: L'aéromètre à mortier. 96

Figure II-09 : Mesure de la densité du béton de sable. 96

Figure II-10: Mesure de la porosité accessible à l'eau 98

Figure II-11: Essais de compression [82] 99

Figure II-12: Essais de traction [82] 99

Figure II-13: Mesure du module d'élasticité en compression 100

Figure II-14 La mesure à l'aide de retractomètre 101

Figure II-15 : Mesure des variationsde masse 101

Figure II-16:Mesure de retrait et gonflement [82] 102

Figure II-17:Absorption d'eau par succion capillaire. 103

Figure II-18: Le CT-mètre 104

Figure II-19: La sonde 104

Fig II-20. Courbes de la température-Temps pour des expositions thermiques T200, T400, T600 et T800°C. 105

Figure II-21:Echauffement de l'éprouvette par le four a moufle. 106

Figure II.22 : Variables étudiées……. 108

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure 3.1 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Tamenrasset 108

Figure 3.2 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Bahbah 109

Figure 3.3 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Boughezoul 109

Figure 3.4 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable concassé 110

Figure 3.5 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Tamenrasset 111

Figure 3.6 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Bahbah 111

Figure 3.7 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Boughezoul. 112

Figure 3.8 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable concassé 112
Figure 3.9 : Air occlus des bétons à base de sable de Tamenrasset. 113
Figure 3.10 : Air occlus des bétons à base de sable de Bahbah 113
Figure 3.11 : Air occlus des bétons à base de sable de Boughezoul. 114
Figure 3.12 : Air occlus des bétons à base de sable concassé.....114
Figure 3.13: La densité des bétons à base de sable de Tamenrasset. 115
Figure 3.14: La densité des bétons à base de sable de Bahbah 116
Figure 3.15: La densité des bétons à base de sable de Boughezoul. 116
Figure 3.16: La densité des bétons à base de sable concassé.....117
Figure 3.17: La porosité des bétons à base de sable de Tamenrasset.....118
Figure 3.18: La porosité des bétons à base de sable de Bahbah 118
Figure 3.19: La porosité des bétons à base de sable de Boughezoul.....119
Figure 3.20: La porosité des bétons à base de sable concassé. 119
Figure 3.21: Résistance à la compression a 7j des bétons à base de sable de Tamenrasset ...120
Figure 3.22: Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable de Tamenrasset .121
Figure 3.23 : Résistance à la compression a 7j des bétons à base de sable de Bahbah 121
Figure 3.24 : Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable de Bahbah 122
Figure 3.26 : Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable de Boughezoul .123
Figure 3.28 : Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable concassé.....124
Figure 3.29 : Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable de Tamenrasset 126
Figure 3.31: Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable de Bahbah.....127
Figure 3.33: Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable de Boughezoul.....128
Figure 3.35 : Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable concassé 129
Figure 3.36 : Résistance à la traction à 28j des bétons à base de sable concassé 129
Figure 3.37 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable de Tamenrasset ..130
Figure 3.38 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable de Bahbah 131
Figure 3.39 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable de Boughezoul ...131
Figure 3.40 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable concassé.....132
Figure 3.41 : Absorption d'eau des BSTS 133
Figure 3.42 : Absorption d'eau des BSTR.....133
Figure 3.43 : Absorption d'eau des BSBHS 134
Figure 3.44 : Absorption d'eau des BSBHR.....134
Figure 3.45 : Absorption d'eau des BSBGS 135

Figure 3.46 : Absorption d'eau des BSBGR.....135
Figure 3.47 : Absorption d'eau des BSCS.....136
Figure 3.48 : Absorption d'eau des BSCR.....136
Figure 3.49 : Retrait des bétons BSTS.....137
Figure 3.50: Retrait des bétons BSTR.....138
Figure 3.51 : Retrait des bétons BSBHS.....138
Figure 3.52: Retrait des bétons BBHR.....139
Figure 3.53 : Retrait des bétons BSBGS.....139
Figure 3.54 : Retrait des bétons BSBGR.....140
Figure 3.55: Retrait des bétons BSCS.....140
Figure 3.56 : Retrait des bétons BSCR.....141
Figure 3.57 : gonflement des bétons BSTS.....142
Figure 3.58 : gonflement des bétons BSTR.....142
Figure 3.59: gonflement des bétons BSBHS.....143
Figure 3.60 : gonflement des bétons BSBHR.....143
Figure 3.61 : gonflement des bétons BSBGS.....144
Figure 3.62: gonflement des bétons BSBGR.....144
Figure 3.63 : gonflement des bétons BSCS.....145
Figure 3.64 : gonflement des bétons BSCR.....145
Figure 3.65: Perte de masse des bétons BSTS.....146
Figure 3.66: Perte de masse des bétons BSTR.....146
Figure 3.67 : Perte de masse des bétons BSBHS.....147
Figure 3.68 : Perte de masse des bétons BSBHR.....147
Figure 3.69 : Perte de masse des bétons BSBGS.....148
Figure 3.70 : Perte de masse des bétons BSBGR.....148
Figure 3.71 : Perte de masse des bétons BSCS.....148
Figure 3.72 : Perte de masse des bétons BSCR.....149
Figure 3.73 : gain de masse des bétons BSTS.....150
Figure 3.74 : gain de masse des bétons BSTR.....150
Figure 3.75: gain de masse des bétons BSBHR.....150
Figure 3.76 : gain de masse des bétons BSBHR.....151
Figure 3.77 : gain de masse des bétons BSBGS.....151
Figure 3.78: gain de masse des bétons BSBGR.....152

Figure 3.79 : gain de masse des bétons BSCN 152
Figure 3.80 : gain de masse des bétons BSCR.....153
Figure 3.82 : La conductivité thermique des bétons à base de sable de Bahbah 154
Figure 3.83 : La conductivité thermique des bétons à base de sable de Boughezoul 154
Figure 3.84 : La conductivité thermique des bétons à base de sable concassé 155
Figure 3.85 Perte de masse des BSTS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 156
Figure 3.86 Perte de masse des BSTR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 157
Figure 3.87 Perte de masse des BSBHS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C.....157
Figure 3.88 Perte de masse des BSBHR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 158
Figure 3.89 Perte de masse des BSBGS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C.....158
Figure 3.90 Perte de masse des BSBGR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 159
Figure 3.92 Perte de masse des BSCNR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 160
Figure 3.93 : Résistance à la compression des BSTS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C .161
Figure 3.94 : Résistance à la compression des BSTR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C.161
Figure 3.95 : Résistance à la compression des BSBHS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 162
Figure 3.96 : Résistance à la compression des BSBHR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 162
Figure 3.97 : Résistance à la compression des BSBGS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 163
Figure 3.98 : Résistance à la compression des BSBGR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 163
Figure 3.99 : Résistance à la compression des BSCNS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 164
Figure 3.100 : Résistance à la compression des BSCNS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C 164

SYMBOLES ET ABREVIATION

(D) : Les fumées de silice

(F) : Les fillers

(P) : Pouzzolanes naturelles

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine,

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

$2CaO\ SiO_2$ (C_2S) : Le silicate bi-calcique impur (Bélite)

$3CaO\ Al_2O_3$, (C_3A) : L'aluminate tricalcique (Célite) :

$3CaO\ SiO_2$ (C_3S) : Le silicate tricalcique impur (Alite)

$4CaO\ Al_2O_3\ Fe_2O_3$ (C4AF) : L'alumino-ferrite tétra-calcique

Al_2O_3 : L'alumine

BO : bétons ordinaires

BDSD 10% : Béton de déchets de semelles dures a 10%

BDSD 20% : Béton de déchets de semelles dures a 20%

BDSD 30% : Béton de déchets de semelles dures a 30%

BDSD 40% : Béton de déchets de semelles dures a 40%

BDSS 10% : Béton de déchets de semelles souples a 10%

BDSS 20% : Béton de déchets de semelles souples a 20%

BDSS 30% : Béton de déchets de semelles souples a 30%

BDSS 40% : Béton de déchets de semelles souples a 40%

BSBGR : béton de sable de BOUGHEZOUL à base de déchet rigide.

BSBGS : béton de sable de BOUGHEZOUL à base de déchet souple.

BSBHR : béton de sable de BAHBAH à base de déchet rigide.

BSBHS : béton de sable de BAHBAH à base de déchet souple.

BSCR : béton de sable concassé à base de déchet rigide.

BSCS : béton de sable concassé à base de déchet souple.

BSSR : béton de sable à base de déchet rigide.

BSSS : béton de sable à base de déchet souple.

BST : béton de sable témoin (sans déchets)

BSTR : béton de sable de TAMENRASSET à base de déchet rigide.

BSTS : béton de sable de TA LENRASSET à base de déchet souple.

C : Dosage du ciment exprimé en Kg/m^3 ;

CaO : La chaux

CHF : Ciment de haut fourneau

CPA : Le ciment portland artificiel

CPJ : Le ciment portland composé

D.I.B : Déchets industriels banals

DIS : Déchets industriels spéciaux

DMS : Déchets ménagers spéciaux

f_{c28} : Résistance souhaitée du béton a 28 jours;

Fe_2O_3 : L'oxyde de fer

f_{mc} : *Résistance* nominale du ciment;

I : Moment d'inertie de la section transversale

K : Coef ;

L_0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

P : Pourcentage en volume des fibres

PE : Le polyéthylène

PEbd : polyéthylène basse densité

PEhd : polyéthylène haute densité

PET : le polyéthylène téréphtalate

PP : le polypropylène

PS : le polystyrène

PVC : chlorure de polyvinyle

R_C : La résistance a compression

R_t : La résistance a la traction

S : sable

SiO_2 : La silice

INTRODUCTION GENERALE

Depuis qu'il a été trouvé sur la terre, l'homme a essayé si dur pour lui faciliter la vie par le développement. Ce dernier devrait dû être plus attention à l'environnement.

Aujourd'hui les déchets qui résultent de l'industrie posent un véritable défi pour l'homme pour cela, déchets inertes ou dangereux, ménager ou industriels sont réutilisés ou un sujet de recherche pour la meilleur utilisation de ces types.

Le génie civil a montré qu'il est l'un des rares domaines qui peut traiter le sujet avec succès en les rentrants dans la formulation du béton par exemple. D'un autre coté la ville de Médéa et depuis des siècles est connue par la fabrication des chaussures qui repose sur le caoutchouc et qui produit une quantité considérable des matériaux inertes qui sont non biodégradables : les déchets de caoutchouc ou déchets de semelles de chaussures. Dans ce cadre ce travail de projet de fin d'études ayant pour thème: "Béton de sable à base de déchet de caoutchouc" est réaliser pour satisfaire quelques objectifs à savoir la protection de l'environnement, ainsi que la valorisation des matériaux locaux dans le béton.

Pour mener à bien ce travail, il a été organisé de la façon suivante :

- En premier lieu et après une introduction général une important partie de recherche bibliographique a été détaillée.
- Les matériaux et les essais utilisés font l'objet du deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats trouvés ainsi que leurs interprétations.
- Nous clôturons ce travail par une conclusion générale et des recommandations.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 VALORISATION ET RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL :

I.1.1 Introduction

L'Amélioration et le développement de la vie humaine nous ont imposé des sérieux problèmes sur notre environnement. La volonté de traiter ce problème a forcé les autorités nationales et régionales à définir une politique de valorisation des déchets qui sont souvent associés à la détérioration de notre écosystème et à de multiples risques pour la santé humaine.

De ce fait, il est nécessaire d'envisager des solutions de gestion favorables au niveau des déchets potentiels, à resserrer les liens dans ce domaine et à coordonner leurs actions pour promouvoir cette politique.

I.1.2 Valorisation et recyclage des déchets dans le domaine de génie civil :

I.1.2.1 Les déchets

A. Définition des déchets

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.».

D'après la loi française du 15 juillet 1975 : « Est ultime un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [1].

On peut classer les déchets selon quatre grandes catégories représentant l'essentiel de la production et rendant compte de leur diversité : [2].

a)- Les déchets organiques :

Ces déchets sont composés de matière organique et son issus d'organismes vivants végétaux ou animaux.

b)- Les déchets inertes

Ce sont des déchets composés d'éléments minéraux qui n'évoluent pas dans le temps (non putrescibles) et qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ce sont les gravats, résidus d'activité extractive.

c)- Les déchets banals

Ce sont des déchets qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ce sont des déchets ménagers et les déchets qui leur sont assimilables et peuvent être traités de la même façon. Ce sont les emballages, les déchets de bois, de plastiques…

d)- Les déchets spéciaux

Ces déchets contiennent des éléments nocifs en quantités variables impliquant des précautions particulières d'élimination. Ce sont les solvants, les produits phytosanitaires,…; certains déchets spéciaux doivent être stabilisés avant stockage. Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon à respecter certains seuils pour différents paramètres (pH, siccité, fraction soluble…).

B. La Valorisation des déchets

La valorisation est définie comme "L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances " [2].

C. Méthodes de la valorisation

a) - Valorisation matière

Elle est appelée également, recyclage mécanique, il s'agit de l'opération globale consistant à la production d'une nouvelle matière à partir d'un déchet. Dans ce cas, il n'y a pas de destruction majeure de la structure chimique du polymère [2].

b) - Valorisation énergétique

Elle est appelée également, recyclage énergétique, elle vise la production d'énergie calorifique [2].Plusieurs techniques permettent d'atteindre cet objectif dont les plus connus sont l'incinération, la pyrolyse ou la thermolyse. Cette énergie calorifique peut être utilisée

sur place ou transformée par la suite en énergie électrique, en fonction des besoins du moment ou du lieu de traitement [2].

c) - Valorisation chimique

Il s'agit de tout processus chimique permettant la transformation d'un déchet en des produits chimiques utilisables comme intermédiaires réactionnels dans l'industrie chimique ou l'industrie de la transformation des matières plastiques [2].

I.1.2.2 Origine de la production de déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- **A. Chimiques:** Tout résidu d'un processus analytique, de réaction, transformation ou d'utilisation de substances ou produits chimiques dans les établissements de recherche et d'études, d'enseignement et de formation, d'activités de soin humain ou animal.
- **B. Technologiques :** Les déchets dits technologiques résultent de l'exploitation des usines et laboratoires. Certains sont solides : gants, déchets de démantèlement... D'autres sont liquides tels que les effluents de décontamination. Même si l'activité mise en jeu est beaucoup plus faible que celle des déchets de procédés, les volumes des déchets technologiques peuvent être relativement importants, et le fait de mettre en œuvre des matières radioactives conduit, bien évidemment, à utiliser pour leur traitement une méthodologie particulière et adaptée .
- **C. Biologiques :** Ce sont les résidus d'origine végétale ou animale qui peuvent être dégradés par les micro-organismes pour lesquels ils représentent une source d'alimentation.
- **D. Economiques :** Tous les déchets qui ne sont pas des déchets ménagers.
- **E. Ecologiques :** Les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.
- **F. Accidentelles :** Les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

I.1.2.3 Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de

particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [68].

I.1.2.4 Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous-produits industriels dans des conditions spécifiques. [3].

A. Déchets inertes

Tout déchet qui ne produit pas de réaction physique ou chimique tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués où contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments.

B. les déchets ménagers

Les déchets ménagers englobent tous les déchets produits par les ménages et assimilés (certaines collectivités et certains commerçants). Ce sont donc les déchets que tout particulier produit dans sa vie quotidienne. Les déchets ménagers regroupent les ordures ménagères (non recyclables ou pas encore recyclées), les déchets recyclables secs (journaux, papiers, carton, magazines, verre, aluminium, plastique) et les recyclables dits humides, organiques ou fermentescibles (déchets alimentaires, herbes, bois...)

C. Les déchets industriels banals (D.I.B.)

Ensemble des déchets non inertes et non dangereux générés par les entreprises, industriels, commerçants, artisans et prestataires de services ; ferrailles, métaux non ferreux, papiers-cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc.

Tableau I.1 : Quantités de déchets produits : évolution 2008 [69]

Catégorie de déchets	Production de déchets en tonnes
bois	5 529 740
métaux	3 960 337
déchets en mélange	2 160 388
papiers cartons	1 997 818
plastiques	467 333
verre	305 495
caoutchouc	81 220
textile	22 877
TOTAL DECHETS BANALS	14 525 208

D. Déchets toxiques

Un déchet toxique est un déchet, qui peut s'avérer nuisible à la santé d'un être vivant. Les déchets toxiques sont généralement rejetés par les usines ou les puissances industrielles.

I.2 L'ACTIVITE DU RECYCLAGE DES DECHETS EN CONSTRUCTION

I.2.1Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

Réduire, **Réutiliser**, **Recycler**. Ce sont trois réponses au problème de la gestion des déchets. Un Français produit en moyenne 450 kg de déchets par an. La règle des 3 R peut permettre de produire moins de déchets ou de valoriser ses déchets par :

La réduction de la production de déchets (choix de matériaux recyclables non polluants, choix de produits à emballage limité).
La réutilisation des déchets

Le recyclage des déchets (compostage, transformations...)

Le principe des 3 R permet de réduire la production d'ordures ménagères nécessitant un traitement collectif. Or la réduction du volume de déchets signifie automatiquement la réduction du nombre de camions poubelle sur nos routes, la réduction de déchets incinérés ou mis en décharge...

I.2.2 Type de recyclage

Il existe trois types de recyclage [4]:

I.2.2.1 le recyclage in situ

Consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple, la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

En revanche, la possibilité de retrait de certaines impuretés est réduite et la qualité des granulats est irrégulière. De ce fait, le champ d'utilisation des granulats ainsi fabriqués reste limité.

I.2.2.2 le recyclage sélectif

Il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ; il nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.

I.2.2.3 le recyclage en site fixe

Les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site. Il s'effectue dans des conditions industrielles.

I.2.3 Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables :

- il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.
- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;

- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 L d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois. [5].

I.3 CAOUCHOUC ET DECHETS DE CAOUCHOUC :

I.3.1.1 Historique

La véritable histoire du caoutchouc débute bien avant la fin du XVe siècle, lorsqu'à la suite des Grandes découvertes, les Européens commencent à observer, en Amérique centrale et en Amérique du Sud, l'usage séculaire que font les populations autochtones d'une matière alors inconnue en Europe. Provenant du latex issu de différentes plantes - dont l'hévéa et le guayule -, les Amérindiens confectionnent des objets courants, fabriqués par moulage sur argile : balles, toiles enduites, torches, qu'ils rendent étanches en les passant à la fumée.

Ils en consomment aussi comme médicament et l'associent aux mythes de création, de la course du monde : dans le « juego de pelota » (jeu de balle précolombien), la balle en caoutchouc (appelée « ulli de ollin » - mouvement en nahuatl - et « kik » en maya - liquide séminal), avec son rebondissement incessant, mime la course du Soleil. La matière caoutchouc devient ainsi sacrée.

- 1736-1747 : Les naturalistes français Charles Marie de La Condamine et François Fresneau de la Gataudière redécouvrent le caoutchouc naturel au Pérou, en Équateur et en Guyane. La Condamine effectue la première description scientifique de cette matière appelée caotchuen quechua Cao signifie bois et tchu qui pleure, et par rapprochement phonétique il francise son nom ; Fresneau en fait de même pour l'hévéa1.
- 1770 : Le chimiste anglais Joseph Priestley découvre que l'on peut effacer des marques d'encre en les frottant avec du caoutchouc2. Cette découverte sera à l'origine des premières gommes à effacer.
- 1783 : Le chimiste français Jacques Charles, lancé dans une compétition avec les frères Montgolfier pour réaliser le premier vol habité, fait construire un ballon — on disait

alors un « globe » — fait d'une étoffe de soie imperméabilisée par un vernis à base de caoutchouc.

- 1811 : L'Autrichien Johann Nepomuk Reithoffer (de) fabrique les premiers produits en caoutchouc (tissus, lacets).
- 1842 : Charles Goodyear découvre la vulcanisation, qui permet de stabiliser le caoutchouc afin qu'il résiste mieux aux écarts de température (il fond à température haute et devient cassant à température basse) 2.
- 10 décembre 1845 : l'Écossais Robert William Thomson invente la roue aérienne (le premier pneu) qui, ne s'adaptant pas aux chariots lourds, tombe dans l'oubli.
- 1854 : Hiram Hutchinson ouvre la première usine utilisant le caoutchouc en France, dans l'usine de Langlée, à Châlette-sur-Loing (Loiret).
- 1868 : Invention des pneus pleins pour vélocipèdes.
- 1870 : Apparition des premiers préservatifs à base de caoutchouc de latex.
- 23 juillet 1888 : John Boyd Dunlop dépose un brevet qui permet d'utiliser le caoutchouc pour la fabrication de pneus2. C'est la naissance du pneu à valve. L'invention des pneus (appuyée plus tard par l'explosion de la production automobile) et le succès des bicyclettes provoquent le boom de la production du caoutchouc à la fin du XIXe siècle.
- 24 juillet 1904 : Création d'une commission internationale pour enquêter sur les pratiques utilisées dans la production du caoutchouc.
- 1907 : Synthèse de caoutchouc par l'Allemand Fritz Hofmann.
- 1980 : Le guayule naturel mexicain peut être mécanisable avec un rendement supérieur à l'hévéa.
- 2003 : Amerityre Corporation développe les pneus increvables (no-flat, air-no-air), basés sur le polyuréthane.

I.3.1.2 définition

La **matière caoutchouc** ou familièrement un **caoutchouc** désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un produit semi-fini ou à un objet. Le mot «**caoutchouc** » dérive de **cao tchu** « bois qui pleure » lors de son expédition géographique en Amérique du Sud, après la redécouverte de cette substance élastique.

Les caoutchoucs synthétiques (ou artificiels) sont un type d'élastomère, invariablement polymères. Comme les matières plastiques, ils sont souvent issus d'un combustible fossile. Un élastomère possède une meilleure déformation élastique sous contrainte que la plupart des matériaux et revient à sa forme initiale sans aucune déformation permanente.

Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. Le terme de caoutchouc est un synonyme usuel d'élastomère.

I.3.1.3 Composition chimique d'un caoutchouc [6]

La matière caoutchouc est composée en générale en trois composants qui sont :

- Résine de base (polymères).
- Adjuvants.
- Additifs.

Matière caoutchouc = *résine de base + adjuvants + additifs*

A-résine de base

Les résines de base qui formé les matières plastiques sont le **polymère.**

A.1 Polymère

Enchainement répété d'un même motif que l'on appelle le **monomère.**

Monomère

Molécules de faible masse atomique constituées généralement d'atomes de carbone (ex : C_2H_4)

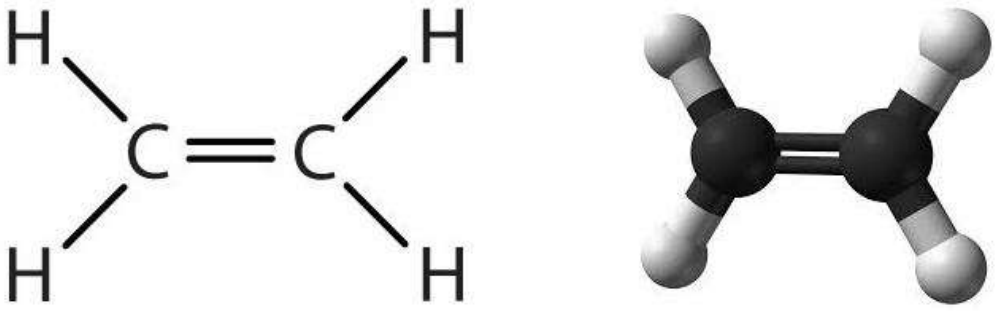


Figure I-1 : Structure des monomères [70]

A.2 La polymérisation

Définition

Procédé de transformation d'un monomère en un polymère (polymérisation) ou d'un mélange de deux (ou plus) monomères en un copolymère (copolymérisation).

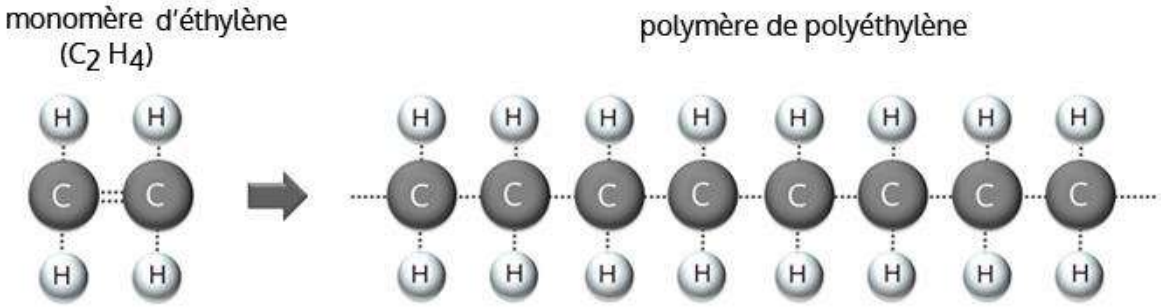


Figure I-2 : La polymérisation d'un éthylène [71]

A.3 Structure des polymères (macromolécules)

La soudure des groupes moléculaires du monomère peut donner naissance à trois types Principaux de macromolécules :

- Polymères linéaires.
- Polymères ramifiés.
- Polymères réticulées

a. Polymères linéaires

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin.

Exemples : Le polyéthylène (PE), l'alcool polyvinylique et le chlorure de polyvinyle (PVC).

La figure 1.3 donne différents exemples de polymères linéaires :

a. homopolymère
b. copolymère statistique
c. copolymère alterné

d. copolymère séquence

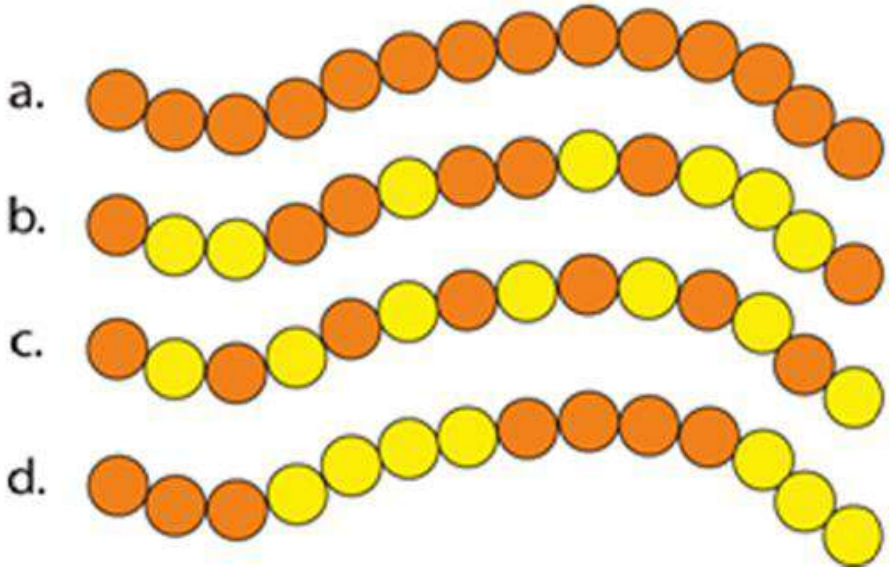


Figure I-3 : différents exemples de polymères linéaires [72]

b. Polymères ramifiés

Un polymère linéaire qui, dans certains cas, présente des « accidents » de polymérisation conduisant à des branchements, est qualifié de **ramifié**.

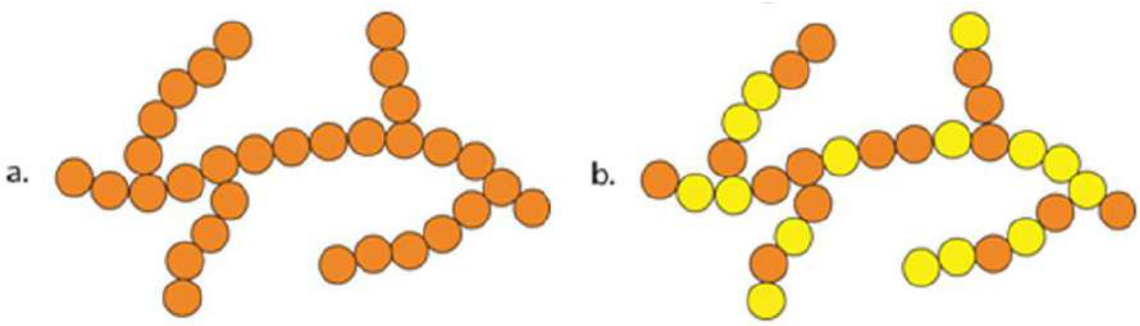


Figure I-4 : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b) [72]

c. Polymères réticulés (tridimensionnels)

Certaines molécules peuvent se lier entre elles, elles se nomment alors **réticulées**. Il s'agit d'un pontage entre les chaînes. Le plus souvent, ces liaisons sont tridimensionnelles, C'est-à-dire qu'elles se développent dans les trois directions de l'espace, donnant une structure en volume (parfois bidimensionnelles, ne se développant que dans un plan). Il arrive que la totalité de la masse, une pièce entière par exemple, ne forme qu'une seule macromolécule.

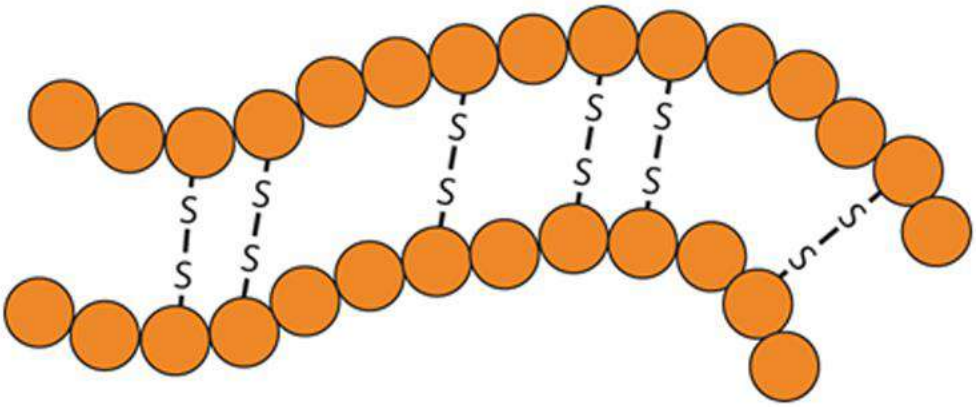


Figure I-5 : polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes [72].

B. Adjuvants

B.1 Anti-oxygène

Ils sont utilisés dans la plupart des polymères hydrocarbonés, en particulier PE, PP, caoutchoucs et copolymères divers. Ils sont utilisés en concentration généralement inférieure à 1 % (sauf le noir de carbone) et dans ces conditions, ne modifient pas sensiblement la couleur et les propriétés physiques des polymères. Leur but est de retarder l'oxydation thermique au cours de la transformation et de l'utilisation.

B.2 Plastifiants

Ils diminuent la rigidité. Ils permettent la mise en forme à des températures inférieures à la température de décomposition de certains polymères linéaires.

B.3 Stabilisants

Ces produits permettent de réduire les phénomènes de vieillissement dus à la chaleur, les UV, etc.

C -Les additifs aux résines

Ce sont en général des produits organiques qui, ajoutés aux polymères, modifient leurs propriétés chimiques et physiques.

C.1 Pigments et colorants

Selon que l'on désire colorer un produit opaque ou transparent, on utilise un pigment insoluble ou soluble.

C.2 Lubrifiants

Ils améliorent l'écoulement des polymères lors de leur mise en forme.

C.3 Ignifugeants

Ils améliorent la résistance au feu.

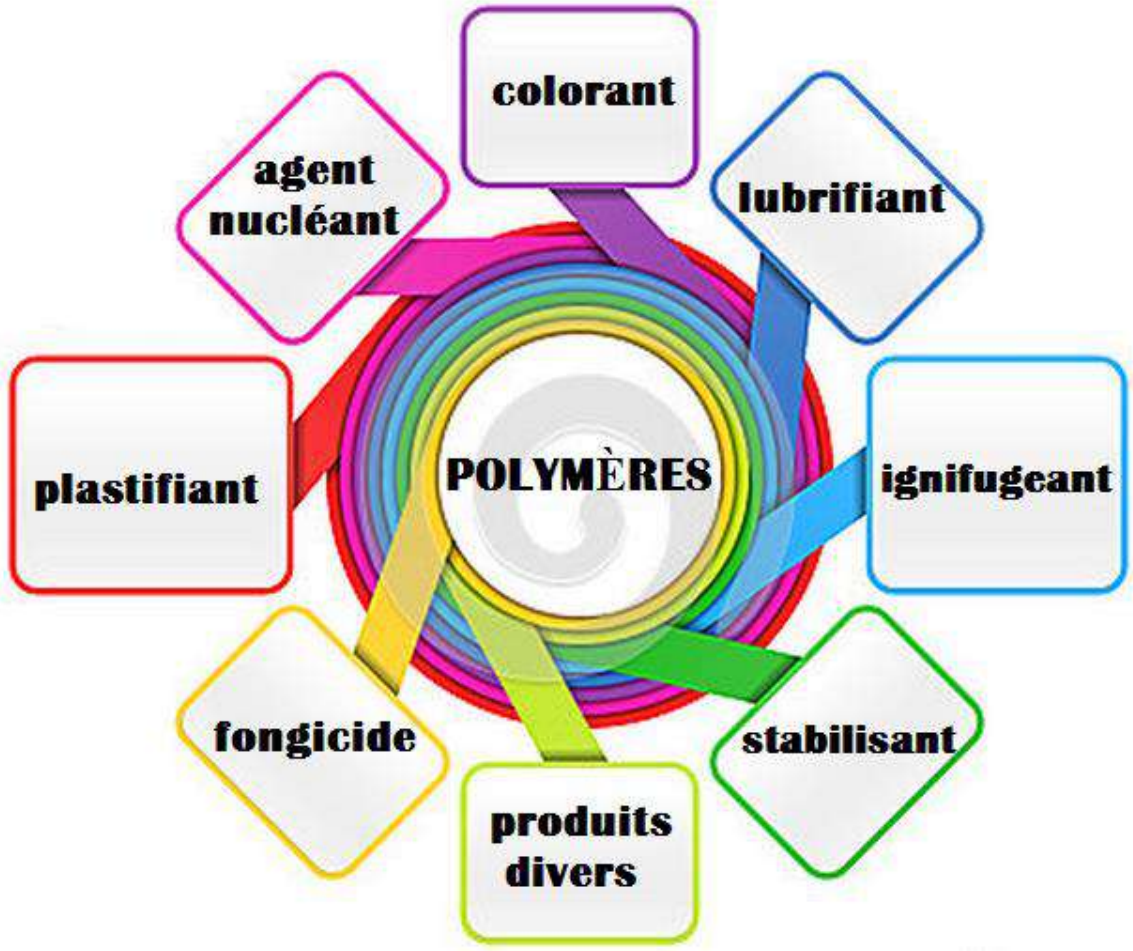


Figure I-6 : Différents composition des matières caoutchouc

I.3.1.4 Processus de fabrication des matières caoutchouc

La matière première généralement utilisée est le **pétrole** duquel sont extraites des molécules d'hydrocarbure. Elles sont ensuite unies entre elles pour former des molécules de masse plus importante : c'est les **polymères.** 4% du pétrole est utilisé pour fabriquer des matières caoutchouc. En sus de la résine, les additifs et adjuvants sont là pour améliorer les

propriétés chimiques et physiques du matériau, notamment la résistance aux chocs, la couleur, la plasticité, la résistance au vieillissement, etc. [80].

Le schéma suivant illustre l'importance et la structure sommaire de la filière des matières Caoutchouc.

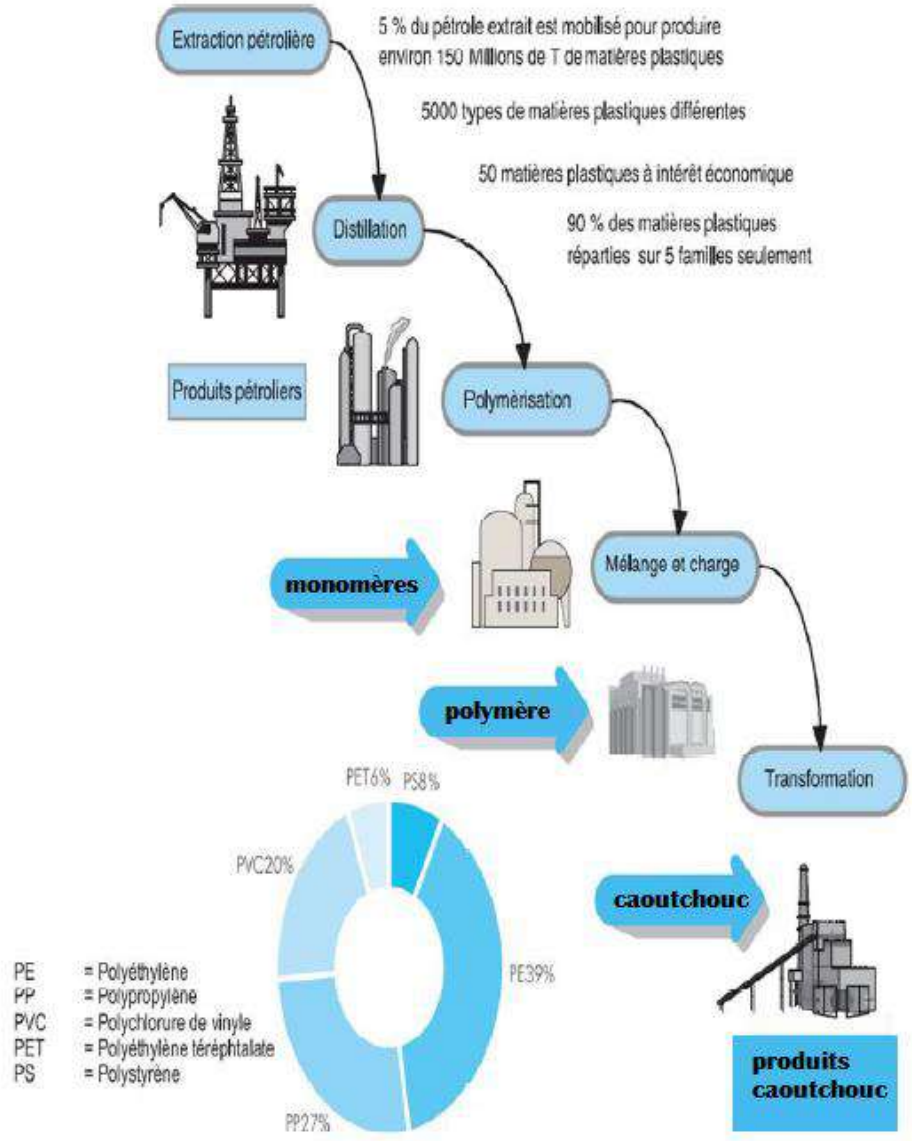


Figure I-7 : Processus de fabrication des matières caoutchouc [103].

I.3.1.5 Les type de caoutchouc

I.3.1.5.1 Les pneus

A. Définition

Un pneu de voiture ou d'engin est composé principalement d'un mélange de caoutchouc, de noir de carbone, d'aciers et de textile divers. Les pneus usés ne sont pas catégorisés comme

déchets toxique ou dangereux, mais en cas d'incendie un dépôt de pneus présente un danger pour la santé et l'environnement. Mis en décharge, les pneus provoquent une instabilité du sol de la décharge, se dégradant très lentement et créant des lieux propices à la nidification des moustiques et des rats. De plus, cela constitue un énorme gaspillage vu qu'un pneu à un pouvoir calorifique élevé. Une directive européenne interdit la mise en décharge de pneus entiers à partir de 2003[11].



Figure1.8 : Incendie sur le site de stockage des pneus usagés [73]

B. Caractéristiques physique et chimique des pneus

Sur le plan chimique, un pneu est un mélange à base de caoutchouc synthétique ou naturel, dans lequel sont ajoutées des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité, tels les plastifiants, les charges renforçant (noir de carbone), et les agents vulcanisant (dont le souffle). D'autres composés chimiques sont ajoutés pour rendre plus performante la délicate opération de vulcanisation (accélérateur ultra accélérateur, activateurs, oxyde de zinc odorants) [2].

Le tableau (I.2), donne la composition moyenne d'un pneu pour véhicule léger (VL) :

Tableau I. 2- composition moyenne d'un pneu VL en Europe [12]

Matériaux /éléments	**Pourcentage massique**
Caoutchoucs	48%
Noir de carbone	22%
Acier	15%
Textile	5%
Oxyde de zinc	1%
Soufre	1%
Additif	8%

Le Tableau (I.3), présente aussi d'autres caractéristiques des pneus:

Tableau I. 3- caractéristiques physiques d'un pneu [12]

Caractéristiques	**Tourisme (VL)**	**Poids lourds (PL)**
Poids moyen	7Kgs	
Densité moyenne	0.2 entier	0.4 déchiqueté
Nombre de pneu /m³	20	3
Présence de métal	15%	25%

C. Valorisation et domaine d'application des pneumatiques

Les problèmes engendrés par la dispersion de déchets de pneus rendent difficiles leur collecte et leur valorisation. Ces déchets constituent alors une menace de nuisance pour notre environnement : dépôts sauvages, émission de fumées toxiques dues au brûlage; la mise en décharge constitue un gaspillage de matière et d'énergie.

Cependant les pneus usagés peuvent suivre différentes filières de valorisation [12] :

a) Le réemploi

Rechapage, revente d'occasion, réutilisation en ensilage par les agriculteurs.

b) La valorisation énergétique

Le caoutchouc à un pouvoir calorifique élevé. Les déchets de pneus peuvent donc servir de combustible de qualité dans les cimenteries et chaudières industrielles [12].

c) La valorisation en matière :

Broyage en poudrette pour une utilisation en revêtement de sol [12].

d) La valorisation en travaux publics

Le broyage de pneus utilisés comme : remblais, confortement de digue et le recyclage sous forme de déchiquetés, granulats dans les applications du type enrobés, etc.
Utilisation de granulats en caoutchouc issus de broyage de pneus usagés, en substitution volumique des granulats naturels dans la confection du béton [13] .Les fibres métalliques peuvent être utilisées comme renfort, c'est l'objectif de notre étude.

I.3.1.5.2 Les semelles des chaussures

Le marché de la chaussure dans le monde est un marché porteur. La consommation de chaussures par les ménages français par exemple atteignait **350 millions** de paires, soit une moyenne de plus de **5 paires** de chaussures par an et par habitant, Par contre. L'Algérie importe annuellement une moyenne de **70 millions** des paires de chaussures et ne produit qu'un million de paires. Ces produits ayant une durée de vie très variable, dépendant de leur utilisation, mais aussi en grande partie des effets de mode, représentent en fin de vie un gisement annuel de déchets potentiel énorme qui reste à ce jour un chiffre inconnu.
Actuellement une petite quantité des semelles des chaussures sont collectées par des particulières et recyclés dans la fabrication de nouvelles semelles mais la grande diversité de modèles et de matériaux utilisés dans la conception des chaussures rend leur recyclage difficile à mettre en œuvre. Cependant, Les temps ont bien changé. La volonté d'améliorer l'environnement par le besoin d'un cadre de vie plus agréable, a amené les pouvoirs politiques nationaux et régionaux à définir une politique de valorisation des déchets, à resserrer leurs liens dans ce domaine, à coordonner leurs actions pour promouvoir cette politique [6].



Figure1-9 : Vieilles chaussures dans les déchets [74]

I.3.1.6 Propriétés de matière caoutchouc [7]

Le caoutchouc brut (latex coagulé) est un polymère naturel blanc ou incolore, dont la plus petite unité est l'isoprène, de formule (C5H8). A la température de l'air liquide (environ 195 °C). Le caoutchouc brut est un solide dur et transparent de 0 °C à 10 °C, il est cassant et opaque ; au-dessus de 20 °C, il devient mou, élastique et translucide. Lorsque le caoutchouc est malaxé mécaniquement ou chauffé au-dessus de 50 °C, il devient plastique et collant. Il se décompose au-dessus de 200 °C.

Le caoutchouc brut est insoluble dans l'eau, les bases et les acides faibles ; il est soluble dans le benzène, le pétrole, les hydrocarbures chlorés et le sulfure de carbone. Il est facilement oxydé par les oxydants chimiques et lentement par l'oxygène de l'air.

A. Propriétés mécaniques

Ce qui rend les élastomères spéciaux, c'est leur capacité de collisions élastiques, tel le rebondissement et l'étirement élastiques, qui leur permet de reprendre leur forme initiale après l'arrêt de la sollicitation. Cette caractéristique spéciale est acquise par la présence d'enchevêtrements et de nœuds de réseau (ces liaisons sont respectivement occasionnelles et définitives ; les ponts jouent le rôle de « ressorts »).

Un élastomère supporte de très grandes déformations (jusqu'à environ 1 000 %) avant rupture, presque totalement réversibles. Au contraire, un polymère rigide qui serait déformé de 100 % garderait une déformation importante : il est qualifié d'« élasto-plastique ».Cette distinction entre les élastomères et les autres polymères correspondent au comportement que l'on observe à température ambiante. En effet, le comportement des polymères dépend de la température, de la vitesse de sollicitation et de la déformation.

De par leur grande déformabilité, les élastomères induisent une décélération progressive. Exemples d'application : amortissement des vibrations et des chocs des pneumatiques, des semelles de chaussures de sport, des silentblocs.

Les grandes déformations sont quasiment réversibles. Exemples : élastiques, ballons, balles de pelote basque (rebond important).

Ils sont incompressibles (ou très peu compressibles), ce qui équivaut à un coefficient de Poisson théorique de 0,5.Exemple : joints d'étanchéité.

Parmi les autres applications, on relève les gants médicaux (traditionnellement fabriqués en latex), les courroies, les durits, les bandes transporteuses, les tuyaux d'arrosage.

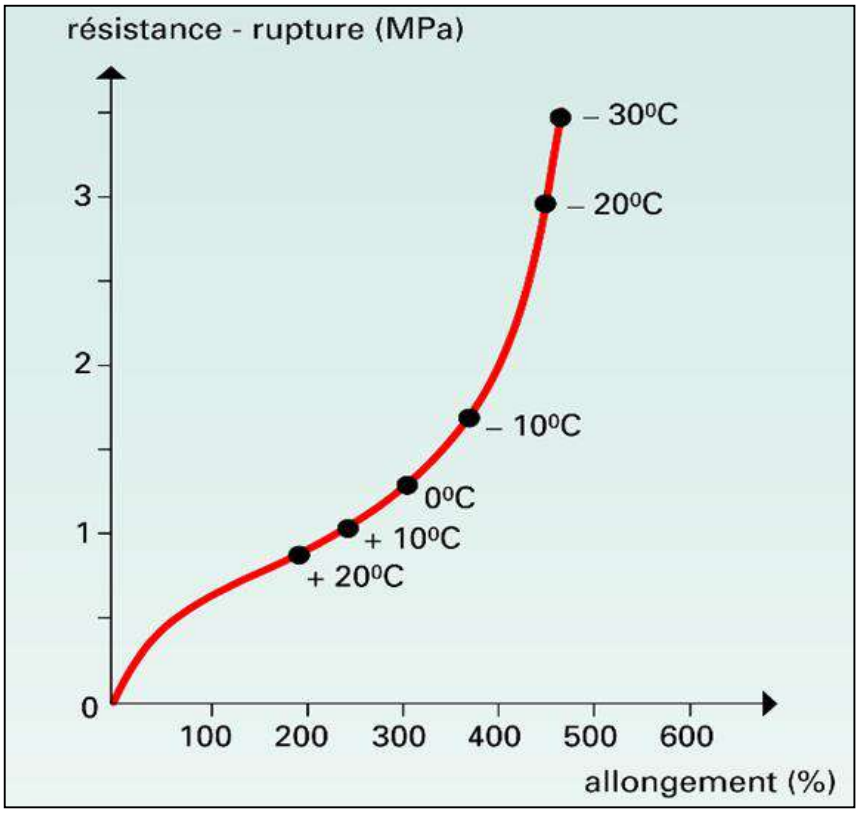


Figure I-10: Comportement d'un caoutchouc soumis à une contrainte mécanique « Traction » [8]

Les propriétés mécaniques décrivent le comportement des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques telles que des pressions, des étirements, des torsions, des frottements, des cisaillements, des chocs ou sous l'effet de la pesanteur. Elles dépendent fortement du type de contrainte appliquée.

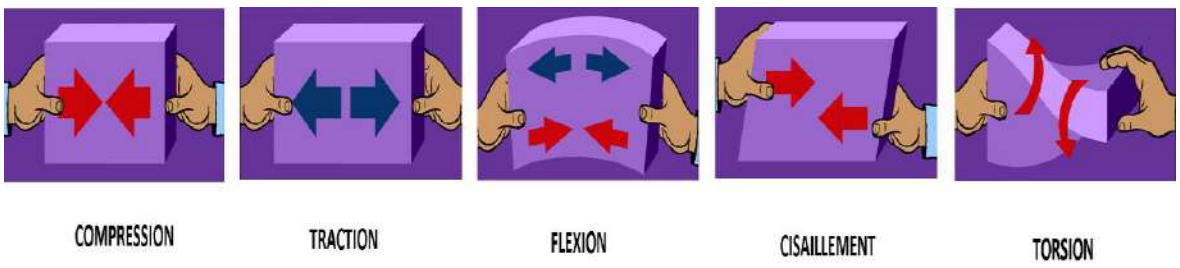


Figure 1-11 : Différentes sollicitations mécaniques [75]

I.3.1.7 Durée de vie du caoutchouc [7]

Une dizaine d'années plus tard (≈1850), la technologie du caoutchouc connut une nouvelle avancée avec l'apparition des fours à vieillissement accéléré permettant d'étudier la détérioration du caoutchouc dans le temps. On put alors mesurer rapidement les pertes de propriétés dans différentes conditions, en particulier lors de l'exposition à l'oxygène atmosphérique. L'utilisation de ces fours permit de tester différents produits chimiques et d'ajouter des antioxydants qui augmentent la durée de vie des produits en caoutchouc, comme les pneus pour les véhicules et les articles souples, tels que gants, toiles et tuyaux.
D'autres progrès vinrent de l'utilisation du latex non coagulé. On introduisit des méthodes permettant d'extruder le caoutchouc en fils minces pour l'utilisation textile ; on put également déposer le caoutchouc sur des métaux et d'autres matériaux.

I.3.2 les déchets de caoutchouc

I.3.2.1 généralité

Le déchet de caoutchouc est réutilisable dans des domaines très variés. 3R transforme les déchets de caoutchouc technique vulcanisé en poudrettes et granulats. Les industries qui utilisent ces granulats commercialisent leurs produits dans les domaines suivants : Sols sportifs, isolation phonique et dalles de sécurité. La poudrette est d'une telle qualité qu'elle peut être mélangée à du caoutchouc de premier emploi

1.3.2.2 chiffres

On produit 10.9 millions de tonnes de caoutchouc par an dans le monde, soit 340 kilos de caoutchouc par seconde (compteur) ; essentiellement produit par les hévéas et consommé par l'industrie automobile pour les pneumatiques [9].

Tableau I.4 : Productions, en 2010, en milliers de tonnes. Monde

Région	**Productions en milliers de tonnes**
Asie-Océanie	7 065
Union européenne	2 481
Amérique du Nord	2 458
Reste de l'Europe	1 403
Amérique latine	653
Afrique	66

En 2010, la production dans l'Union européenne est de 798 346 t d'ABS (dont Espagne : 97 809 t, Italie : 96 931 t) et de 188 322 t de SAN (dont Italie : 16 450 t, Royaume Uni: 762t [10].

La production mondiale de caoutchouc naturel s'est élevée à 11,8 millions de tonnes en 2014. La part de l'Asie dans ce chiffre est supérieure à 91%.

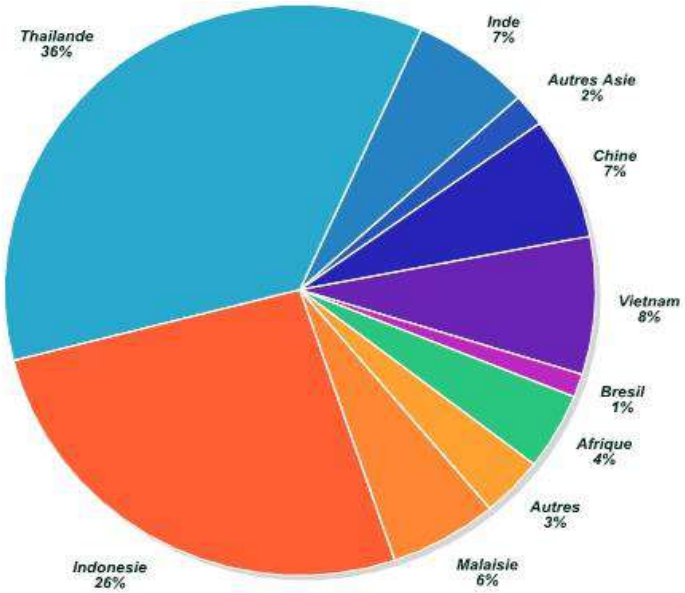


Figure I-12 : La production mondiale de caoutchouc naturel en 2014 [76]

1.3.2.3 Recyclage de caoutchouc

Les difficultés liées au recyclage des caoutchoucs sont nombreuses, à la fois économiques et techniques. La consommation apparente de produits finis vulcanisés s'établit à 700000 Van, ils sont répartis en deux grandes catégories : les déchets de pneumatiques (60%) et les déchets de caoutchoucs industriels (40%) Dans une optique de valorisation, il est essentiel de considérer le gisement disponible, c'est-à-dire celui qui peut être récupéré et traité dans des conditions économiquement viables : en France, le gisement disponible de déchets industriels banals (DIB) à base de caoutchouc industriel a été estimée par l'ADEME à 188 000 tonnes en 1997. Ces déchets ne représentent qu'un pourcentage très faible du total des déchets produits (environ 0,13%) mais les tonnages ne sont pas négligeables. La quantité de déchets de fabrication à base de caoutchouc a, quant à elle, été estimée à environ 50 000 tonnes par an, par le SNCP (Syndicat National des Caoutchoucs et Plastiques) [77].

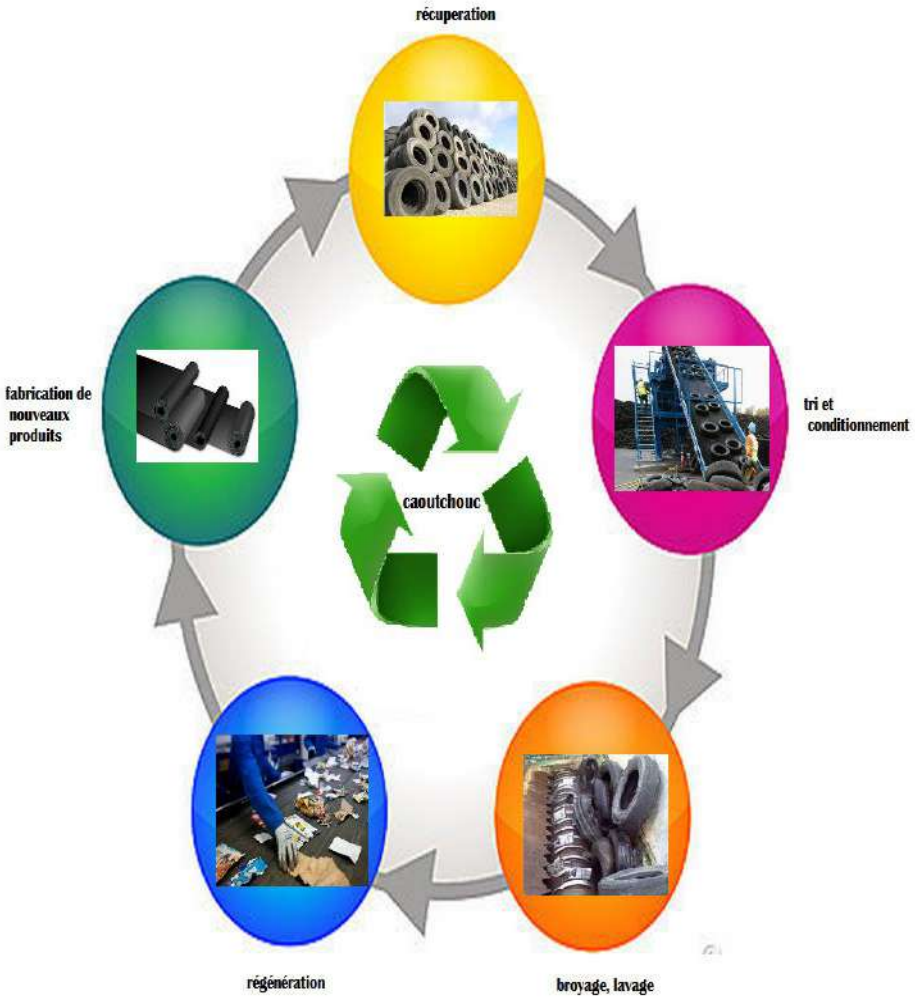


Figure I-13 : Processus de recyclage de déchets de caoutchouc [8].

I.4 LE BETON DE SABLE ET LES BETON A BASE DE DECHETS DE CAOUTCOUC :

I.4.1 Le béton de sable

I.4.1.2 Introduction

Comme tous les pays en voie de développement, l'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, et notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de

grands gisements de fines naturels et artificiels. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire [14].

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou par un faible dosage en gravillon. Il se différencie également des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par son domaine d'application. L'emploi de béton de sable en remplacement des bétons classiques peut constituer une variante de structure rigide intéressante sur le plan économique lorsque le sable est facilement accessible et à un coût moindre que les granulats courants [15].

I.4.1.2 Historique

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel.

Selon POIEVIN [16], ce matériau trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré". Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

COIGNET qui est à l'origine de ce matériau construisit pour sa famille en 1851 à saint Denis (nord de Paris, France) une maison 60m de long et 7m de hauteur, du type R+2, avec mur de soutènement. Cet ouvrage fût entièrement édifié en béton aggloméré, des fondations jusqu'au toit [17].

POITEVIN [16] rapporte encore qu'entre 1869 et 1872 un aqueduc de 40km fut partiellement construit en béton aggloméré afin de relier Fontaine bleu à Orléans

(France). Le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontaine bleu, 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 400kg/m³, plus proche de celui des bétons de sable que des mortiers. Mis en service en 1869, le phare de Port-Saïd (Egypte) de 52m de hauteur fut également construit en béton aggloméré composé de sable d'une plage avoisinante et de chaux importé de France.



Figure1-14 : phare de Port-Saïd 1969. (Egypte) [79]

COIGNET exporte sa technique jusqu'aux USA, où son entreprise "New York and Longisland Coignet stone compagny" construit en 1871-72 en blocs de béton aggloméré le pont de Brooklyn à New York [16].



Figure1-15 : Le pont de Brooklyn1871-72New York [79]



Figure 1-16 : La maison de COIGNET [78**]**

Vers la fin du XIX*ème* et au début du XX*ème* siècle, marquant la période de l'apparition du béton utilisant des granulats de gros calibres ainsi que l'utilisation de ciment à la place de la chaux qui a engendré une augmentation de résistance (allant jusqu'à 20MPa) furent facilement obtenus. A compter de là, le béton aggloméré ancêtre du béton de sable a cédé la place au béton connu jusqu'à nos jours [18].

En 1918 une expérience a été faite à **St-Petersburg**, par le conte **M. Nicolas** de **ROCHEFORT**. Elle consistait à broyer en même temps sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Ces idées furent reprises après quelques décennies plus tard au milieu du XX siècle (1954) par le professeur académicien REHBINDER comme base de ces propres recherches sur le béton de sable, et le mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker. Il conclut que le principe physique du phénomène semble être qu'au concassage on libère des surfaces physico-chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant, ce qui permet l'utilisation de ce matériau dans de nombreux domaines (chaussées, pistes d'aviation, éléments de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, etc.)



Figure1-17 : Aqueduc des eaux de captation de la rivière "La Vanne"[79]

I.4.1.3 définition de béton de sable

La norme Française A.F.N.O.R. NF P 18 500 (juin 1995) définit le béton de sable comme suit : "Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s) et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons [19].

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø<6mm.

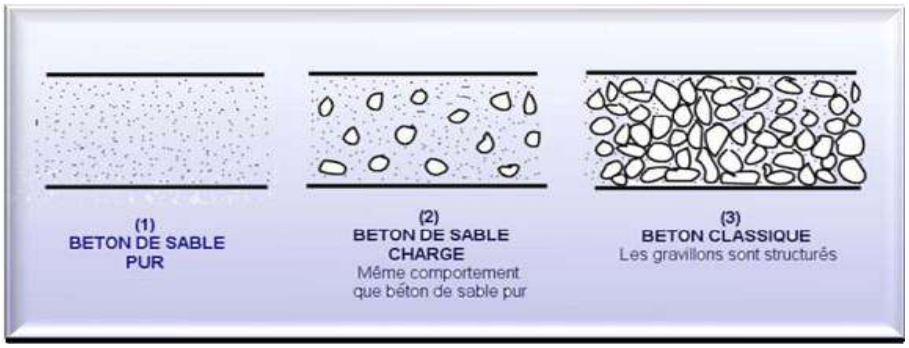


Figure I-18 : BS, BS chargé et BO [79]

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

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable (Dmax= 5mm), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimal étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400à 600) Kg/m3 [20].

I.4.1.4 Les composants du béton de sable [17]

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

A. Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-540etNF P 18-101 il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un O/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

B. Les fines d'ajout (filler)

La qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [17] :

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

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles. Le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Et ces fines sont du ciment, puisque la qualité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle bien connue de : $C = 550/\sqrt[5]{D}$ ou $C = 700/\sqrt[5]{D}$

(selon l'usage du béton). Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.

Tableau 1.5 : Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [17]

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	**550/**$\sqrt[5]{D}$	**700/**$\sqrt[5]{D}$	
0/25 0/20 0/16 0/8	1.904 1.821 1.741 1.516	290 300 315 360	370 385 400 460	**BETON**
0/6.3	1.445	380	480	
0/4 0/2 0/1	1.320 1.149 1.000	415 480 550	530 610 700	**MORTIER**

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

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre **70** et **220** Kg/m^3 et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

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

Nous citerons un type de fines (fillers) que nous allons utiliser Dans notre étude nous allons utiliser un type de fine (filler) : les fillers calcaire.

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

L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage…) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration…) [21] .L'effet du

filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

a). Filler calcaire

Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif. Son avantage est sa finesse qui peut être utilisée pour optimiser la granulométrie de mélanges de béton [22].

L'addition de filler calcaires peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fin, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable. Les fillers peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton [21].

C. Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu…et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine [17].

D. L'eau

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

E. Les adjuvants [23]-[17]

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires.

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois l'usage du plastifiants ou superplastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la

défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui on été utilisés dans cette étude.

Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103.

Les plastifiants [23]- [24]

Les plastifiants sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du polynaphtaléne sulfoné, et les sels de sodium de la polymélamine sulfonée.

Les plastifiants sont des réducteurs d'eau. Leur mode d'action principal est d'augmenter la maniabilité des bétons. Cependant, comme il est expliqué dans cette section, il est possible de les utiliser comme réducteurs d'eau afin de diminuer le rapport **E/C** et d'ainsi augmenter la résistance en compression des bétons avec tous les bénéfices que cela comporte. L'utilisation de plastifiant permet d'abaisser la teneur en eau tout en maintenant une même maniabilité.

D. Autres ajouts

a). Les fibres [17]

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

On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe.

- **Les fibres polypropylènes [25]**

Les fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui, une fois dans le malaxeur, se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus courantes varient de 10 à 50mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns.

Les fibres polypropylènes améliorent la résistance aux chocs, à l'écaillage et limitent les risques de fissuration dus au retrait dans les premiers âges du béton. Par ailleurs leur ajout ne diminue pas la maniabilité du béton mais au contraire aurait tendance à l'améliorer.

Le type de fibres à utiliser dépend essentiellement de la dimension des granulats, les fibres les plus courtes étant choisies pour des micro- bétons, les plus longues pour ceux dont le

« D » est important. Les quantités à mettre en œuvre sont de l'ordre de 0.5 Kg jusqu'à un maximum de2 Kg par m3 de béton, soit entre 0.05 et 0.2% en volume. Dans la majorité des cas les dosages habituels sont de 600 g/m3 ou 900g/m3 et très rarement 1200 g/m3.

b). Les gravillons

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70. G/S< 0,70 [17].

c). 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 [17].

I.4.1.5 propriétés des bétons de sable

Un concepteur qui retient le béton de sable comme matériau pour un élément de construction a une démarche de « pensée béton », c'est-à-dire qu'il adopte un matériau répondant aux critères qui ont permis le succès du béton, en termes de performances et durabilité, mais aussi d'image et de comportement.

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. La maniabilité dépend non seulement du rapport E/C, mais aussi du module de finesse de sable, et elle dépend surtout du type et de la teneur en fines d'ajouts. Nous avons vu qu'il nécessite plus d'eau qu'un béton classique. D'autre part, il apparaît évident que le mélange ciment- sable présentera une porosité plus élevée que la porosité du béton traditionnel. Cet inconvénient est compensé par l'ajout de fines de bonne nature pour améliorer la compacité. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulaire. Il s'agit de trouver un compromis entre la maniabilité du béton et sa compacité [26].

I .4.1.5.1 Propriété générale

A. La compacité

La compacité d'un béton est définie comme le volume occupé par les éléments solides rapportés au volume total. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité.

Caquot a pu établir expérimentalement une relation mathématique pour un béton entre la porosité d'un empilement granulaire, celui-ci étant caractérisé par un diamètre d des éléments les plus fin et un diamètre D des éléments les plus gros

$P = P_0 (d / D)^{0.2}$……..……(1.1)

P0 : constante expérimentale;

d : diamètre des éléments les plus fin;

D: diamètre des éléments les plus grands.

Notons que la validité de cette équation est limitée aux mélanges dont les proportions de chaque constituant dans l'étendue granulaire (E.G) sont également optimisées en terme de compacité. Autrement dit la compacité optimale ne dépend pas uniquement de l'étendue granulaire, mais également de la répartition granulométrique des grains [81]. Rappelons que pour les bétons de sable le diamètre de granulats (D≤5mm), de ce fait, il est évident que le mélange sable- ciment présentera une porosité très élevée en comparaison avec celle d'un béton ordinaire. Cette porosité est due à une augmentation de la surface spécifique, en effet, plus le module de finesse augmente plus la porosité diminue (Figure I.19) Donc pour garder une compacité maximale la solution la plus facile est d'augmenter le dosage en ciment. Techniquement cette solution n'est pas souhaitable, vu le risque du retrait hydraulique, ainsi que l'élévation du coût global. Dans ces conditions, il est plus que nécessaire l'ajout d'un filler dont la granulométrie est voisine à celle d'un ciment, afin de combler une partie des vides de sable, dans le but de limiter le dosage en ciment.

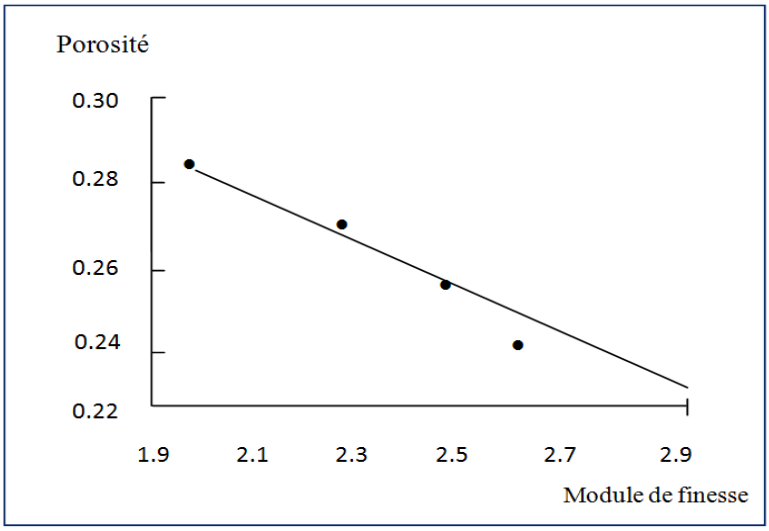


Figure I-19 : Evolution de la porosité en fonction du module de finesse) [81]

- **Effet de la granulométrie du sable sur la compacité**

Plus le sable est poreux plus le besoin en fines est élevé. La porosité dépend de la granulométrie du sable qui elle-même dépend de la nature du sable. A titre d'exemple, le sable alluvionnaire (Dmax =5 mm) nécessite moins de fines que le sable de dune (Dmax<1mm) (fig. I.20).[81]

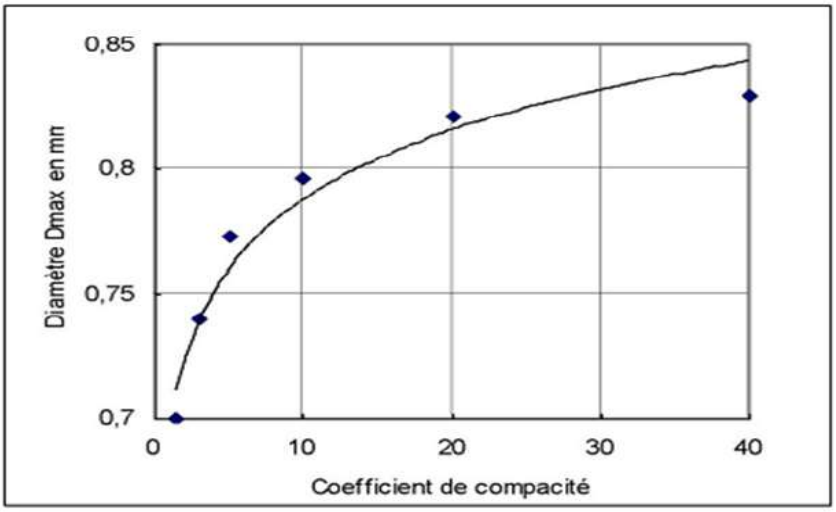


Figure I-20 : Variation du coefficient de compacité en fonction du diamètre maximal des grains de sable (D_{max}) [81].

➢ **Effet des ajouts de fines**

Généralement, plus le dosage en fines augmente, meilleure est la compacité [81] (fig. 1-21). En fonction de la finesse des fines et de la porosité du sable, il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer. Plus la finesse des fines est faible et plus cet optimum est faible [81].

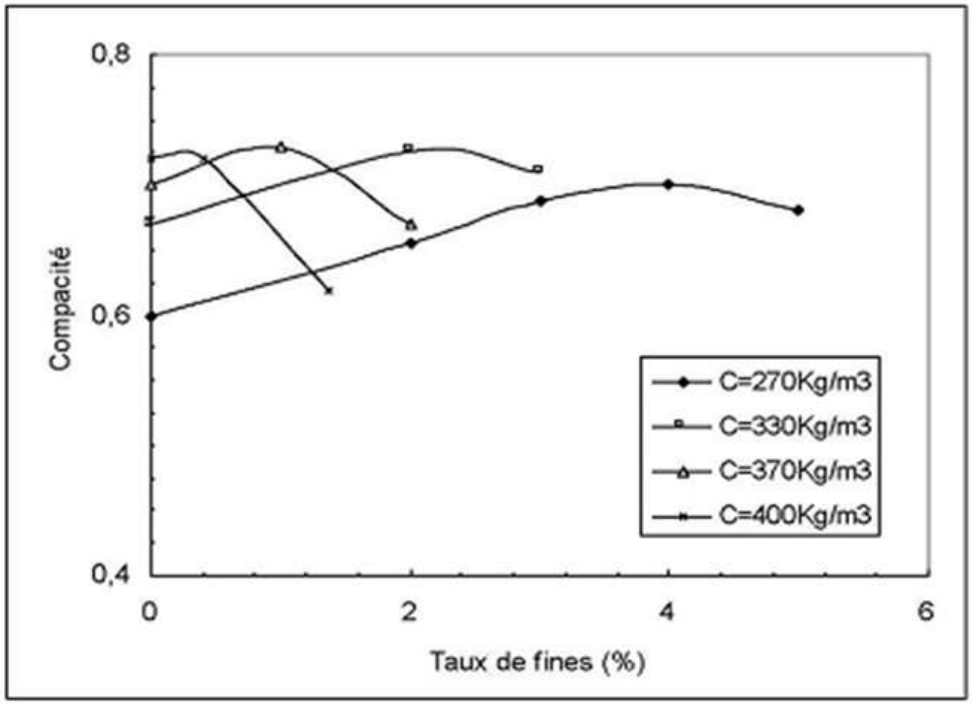


Figure I-21 : Effet du dosage en filler sur la compacité du béton de sable [81]

B. La Maniabilité

La maniabilité est une propriété physique spécifique du béton sans tenir compte des conditions particulières d'utilisation pour un type donné d'application. Elle est définie comme étant la propriété d'un mortier ou d'un béton fraîchement malaxé qui définit la facilité et l'homogénéité à être malaxé, mis en place, serré et fini [81].

Les bétons de sable demandent une quantité d'eau élevée par rapport aux bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement entre 0.6 et 0.7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange.

➢ **Effet de la granulométrie du sable**

A un même dosage en eau, le béton ordinaire est plus maniable qu'un béton de sable. De même, un béton de sable alluvionnaire est plus maniable qu'un béton de sable dunaire.

Ceci explique l'effet du diamètre maximal des grains sur la maniabilité. Plus le diamètre maximal est grand, meilleure est la maniabilité. Si nous parlons en termes de module de finesse, nous pouvons dire que la maniabilité s'améliore avec l'augmentation du module de finesse (Fig.1-22).

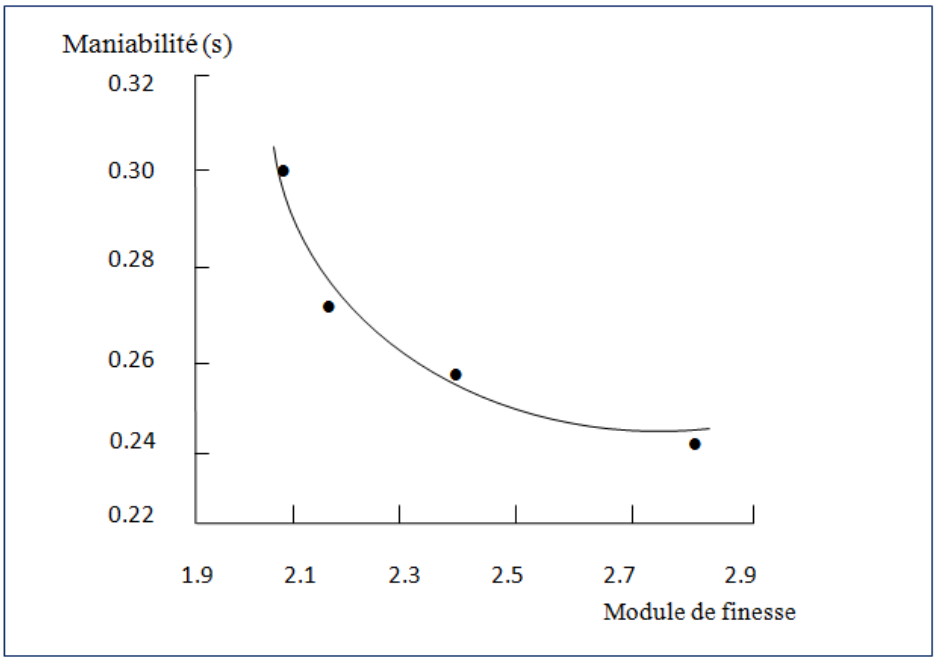


Figure I-22 : Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables [81]

Donc il est clair que plus le module de finesse augmente plus le temps d'écoulement diminue ce qui implique une amélioration de la maniabilité. Pour tester la maniabilité, plusieurs essais peuvent être appliqués : le Cône d'Abrams (Slump test), l'Essai VEBE, le Maniabilimètre LCPC (ou LCL pour mortiers), etc.

- **Effet des ajouts sur la maniabilité**

En général, selon la granulométrie du sable, le dosage des fines augmente la maniabilité. Pour certains sables, dunaires par exemple, elle diminue au début, mais après un certain optimum elle commence à s'améliorer (fig.1.23). La maniabilité dépend aussi de la nature des fines incorporées. Logiquement, de fines de type sphérique devrait rendre plus efficace et donc améliore la maniabilité.

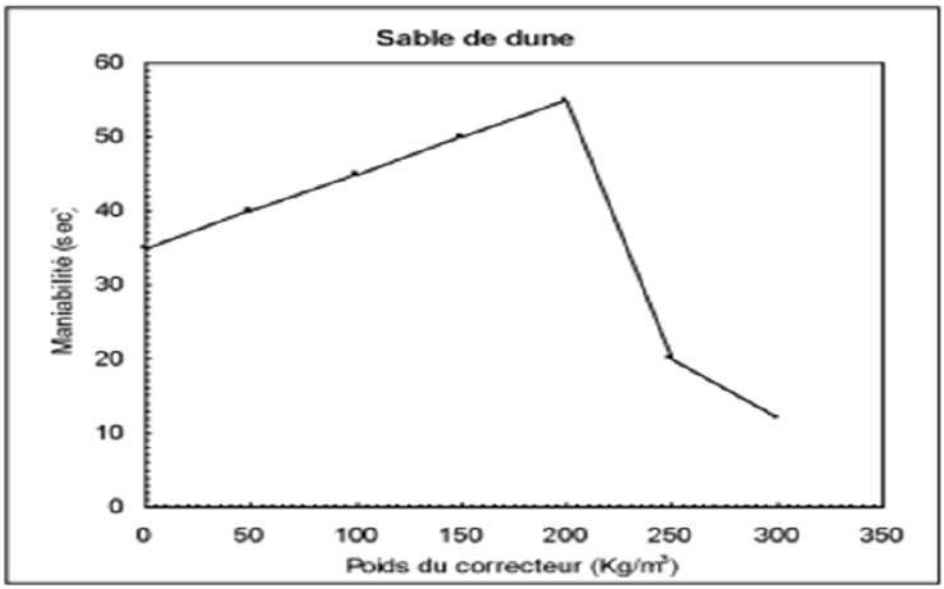


Figure I-23 : Effet des ajouts sur la maniabilité du béton de sable [81].

- **Effet du rapport E/C**

Comme pour tous les autres bétons, la maniabilité dépend du rapport E/C (ou E/(C+F) pour les bétons de sable). Généralement, l'augmentation de ces rapports augmente considérablement la maniabilité [81].

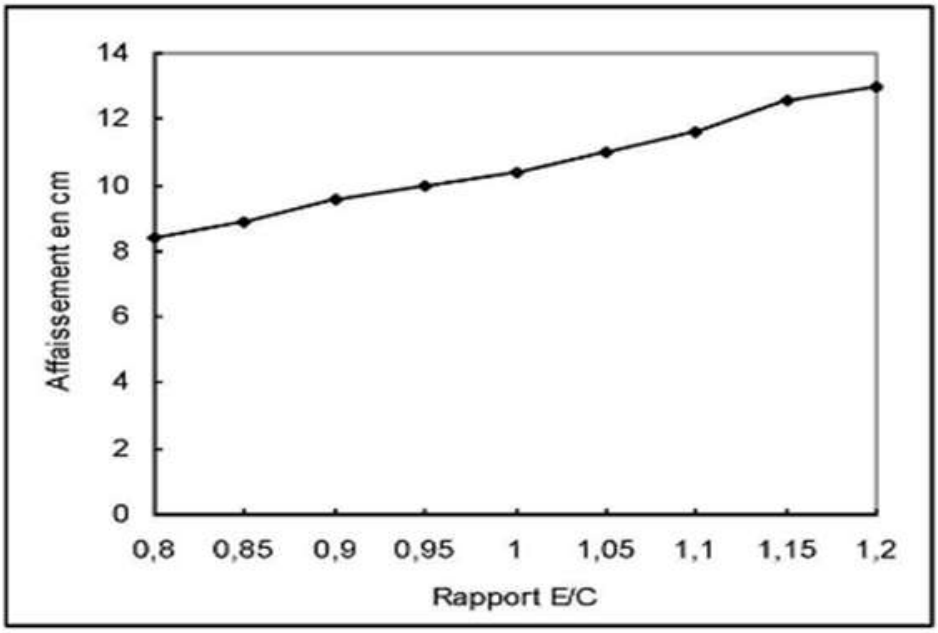


Figure I-24 : Effet du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire [81].

C. Propriétés mécaniques

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 ou en compression.

C.1 Résistance à la compression

Concernant la résistance à la compression des bétons de sable, et d'après les travaux de CHAOUCH, qui a été constaté que les valeurs de la résistance à la compression des quatre types de bétons de sable de dunes, cités précédemment, sont respectivement 140.61, 165.67, 149.41, 144.56 (bars). Ce qui nous permis de conclure, que ces derniers présente aussi une résistance à la compression relativement inférieure par rapport à celle d'un béton normal.

- **Effet des fines sur la résistance à la compression**

Le dosage, la finesse et la nature des fines influent sur la résistance du béton de sable. Le dosage augmente la compacité et qui à son tour augmente la résistance. La finesse des fines augmente davantage la compacité et par conséquent la résistance. 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 [81].

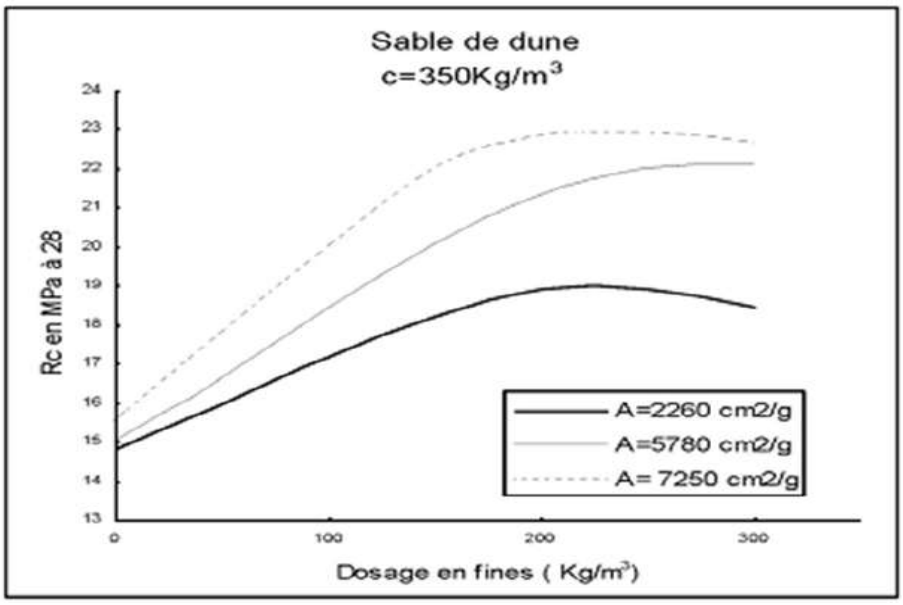


Figure 1-25 : Effet du dosage en filler sur la résistance (sable de dune) [81].

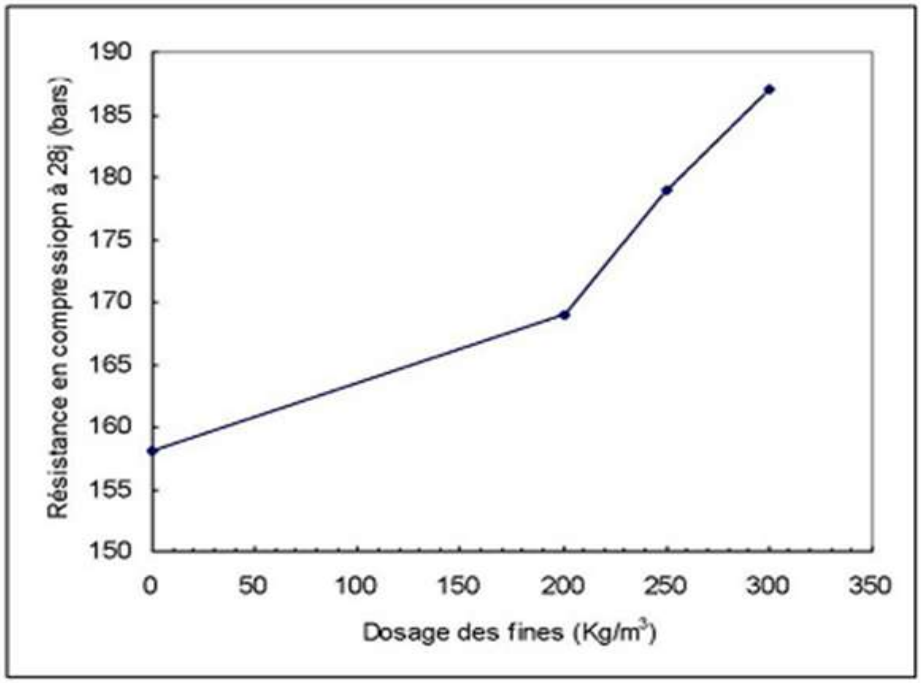


Figure 1-26: Effets du dosage et de la finesse de l'ajout sur la résistance à la compression [81].

- **Effet de la granulométrie du sable**

Si l'on maintient le rapport E/C fixe, la résistance n'est pas trop influencée par le diamètre maximal des grains de sable (D_{max}). 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} (Fig. 1-27). 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 (D_{max}=0.63mm) est nettement inférieure à celle du béton de sable alluvionnaire (D_{max}=5mm) [81].

- **Effet du rapport C/E**

Comme pour tous les bétons, la résistance du béton de sable augmente avec l'augmentation du rapport C/E.

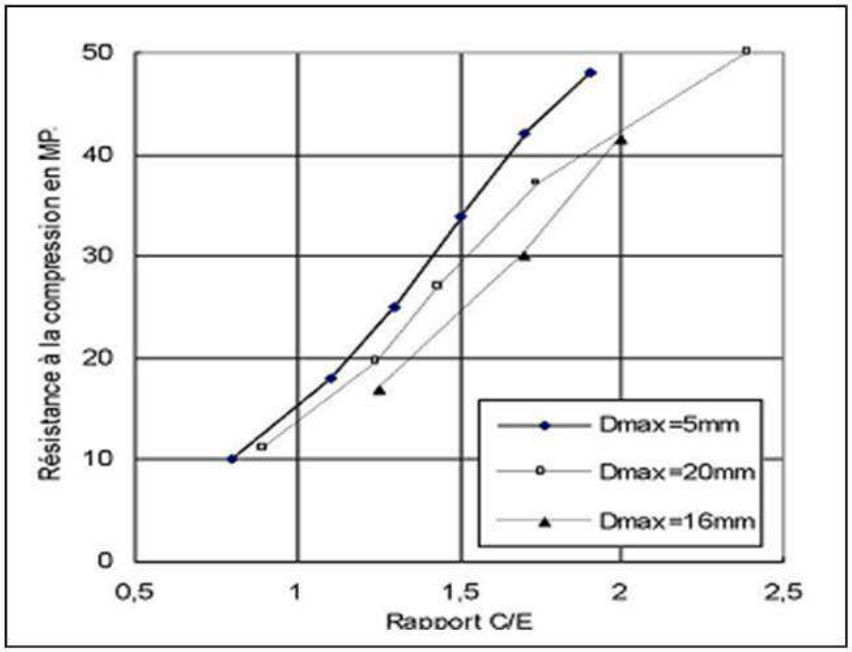


Fig. 1-27 : Effet de la granulométrie du sable et du rapport C/E (ciment/eau) sur la résistance [81]

C.2 Résistance à la traction

Diverses études ont été réalisées concernant la résistance à la traction des bétons de sable, nous citons les travaux réalisés par CHAOUCH [26], sur quatre types de bétons de sable de dunes dont leurs compositions ainsi que leurs résistances à la traction sont présentées dans le tableau (1.6) suivant :

Tableau 1.6- dosages et résistances à la traction des bétons de sable de dunes [26]

Constituant	Dosage en kg/m^3				Résistance à la traction en bars à 28 jours			
	Composition				Composition			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Ciment	350	400	350	300	10.25	15.67	11.50	10.67
Sable de dunes	1505	1420	1470	1560				
Eau	245	280	280	240				
E/C	0.7	0.7	0.8	0.8				

D'après les résultats donnés dans le tableau (1.6), nous constatons que la résistance à la traction des bétons de sable de dunes est relativement inférieure à celle du béton normal.

C.3 Module d'élasticité

Il s'agit du module tangent d'élasticité, déterminé à partir de la loi de comportement contrainte-déformation du béton, la mesure est opérée sur extensomètre mesurant la déformation d'une éprouvette cylindrique 16x32 sollicitée en compression simple conformément au processus d'essai LCPC.

On constate globalement que le comportement du béton de sable est similaire à celui des bétons classiques. La valeur du module d'élasticité du béton de sable voisine celles des bétons de F.GORISSE [16], 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.

Les travaux de F.GORISSE sur les micro-bétons ont montré qu'il existe une relation entre le module d'élasticité et le diamètre maximal des grains. Ce dernier propose la formule suivante pour le calcul du module d'élasticité :

$$E_i = 10^3 (6 \log D + 25) \qquad \text{(I-2)}$$

Avec D = diamètre maximal des grains (mm)

E_i = module d'élasticité (MPa)

Il obtient de ce fait

E_i = 22.000 MPa pour Dmax= 1.6mm

E_i = 26.000 MPa pour Dmax= 5mm

Cette formule serait valable pour une résistance moyenne voisine de 30MPa.

La formule (I-1) prévoit alors de faible valeur de E pour le béton de sable. La courbe contrainte- déformation (Fig.I-28) montre d'une part que les contraintes de rupture sont pratiquement les mêmes et d'autre part que les déformations à la rupture décroisent avec l'augmentation de $D_{max.}$

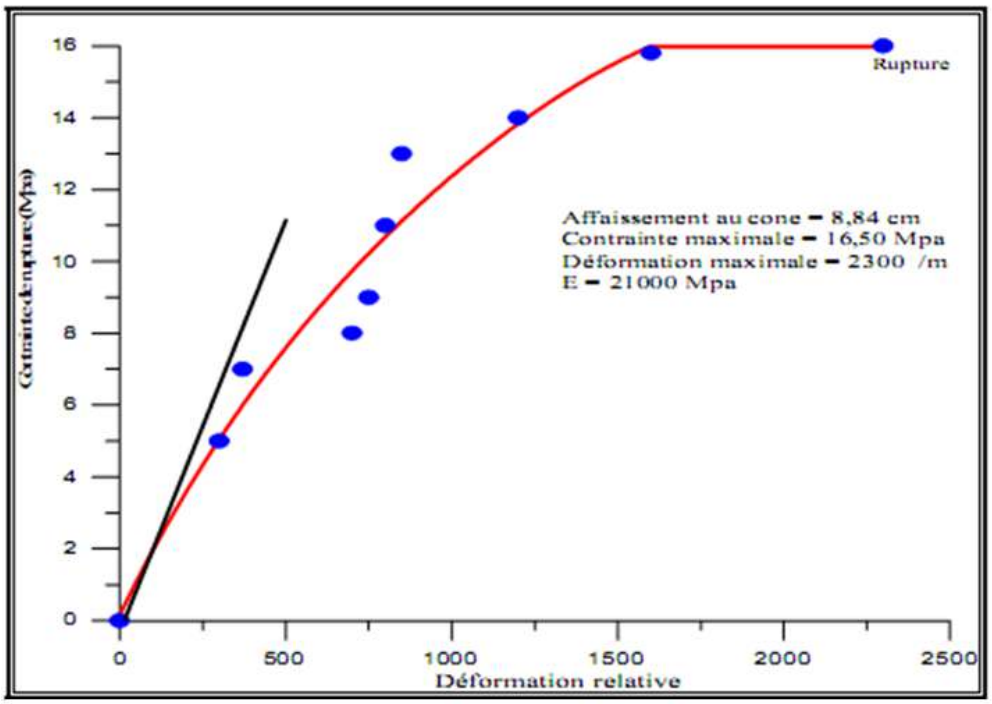


Fig. I-28: Evolution de déformation avec l'augmentation de la contrainte de chargement [81].

C.4 Autres propriétés

a. Adhérence aux armatures

Le béton de sable adhère bien aux armatures. La contrainte d'adhérence moyenne est comparable à celles des bétons traditionnels [15]. La granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel puisque à un même niveau de résistance, l'adhérence mesurée pour un béton de sable dunaire (très fin) est supérieure à celle obtenue pour un béton sable alluvionnaire [11]. La nature des aciers (lisse ou tors) ainsi que leur diamètre ont aussi une influence sur la valeur de l'adhérence [16].

b. Retrait

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons (béton de sable et béton ordinaire), en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondants globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48 .En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau

évaporable (taux de séchage). Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire.

Retrait d'auto-dessiccation

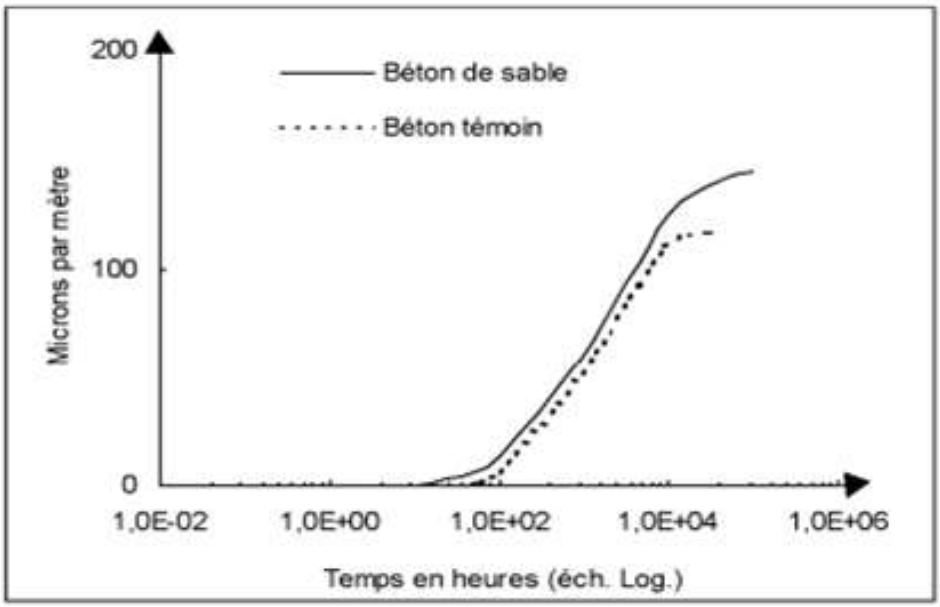


Figure. I-29: Evolution du retrait dans le béton de sable [81].

Retrait total

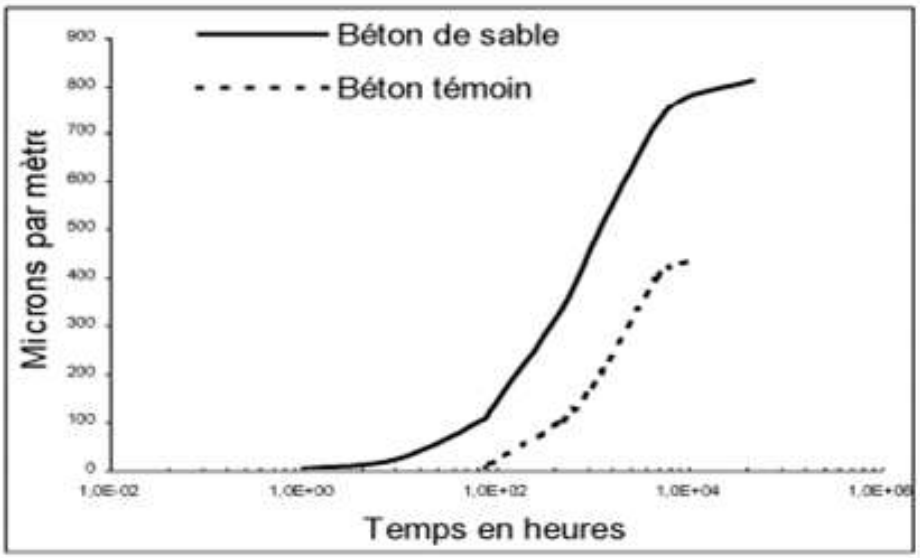


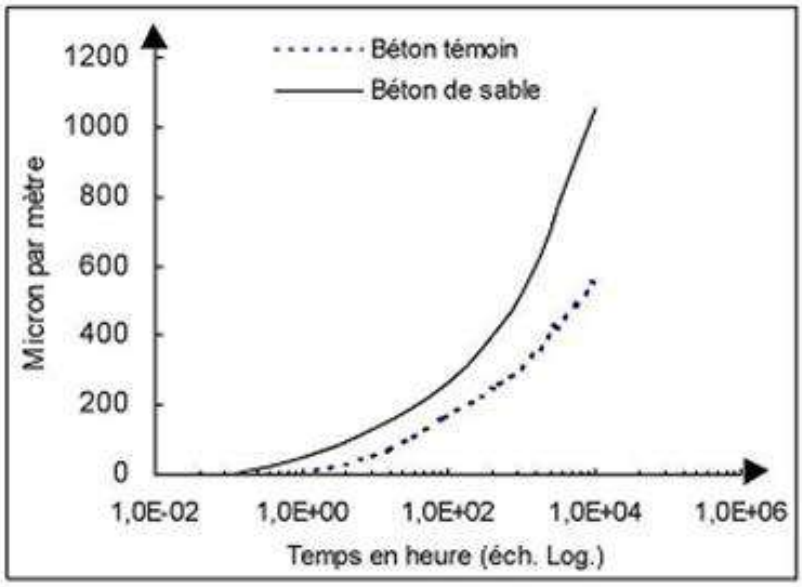
Figure. I-30: Evolution du retrait dans le béton de sable [81].

c. Fluage

La cinétique du fluage du béton de sable est plus rapide que celle du béton ordinaire.

Les valeurs du fluage du béton de sable sont deux fois plus importantes que celles du béton ordinaire. Notons que ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25 MPa. Un béton de sable plus résistant n'aura pas le même comportement et son fluage deviendra plus faible .

fluage d'auto-dessiccation



fluage total

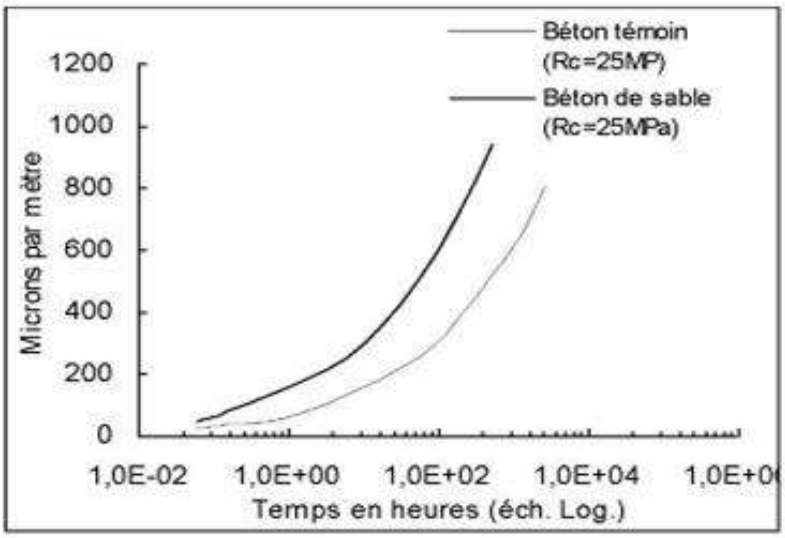
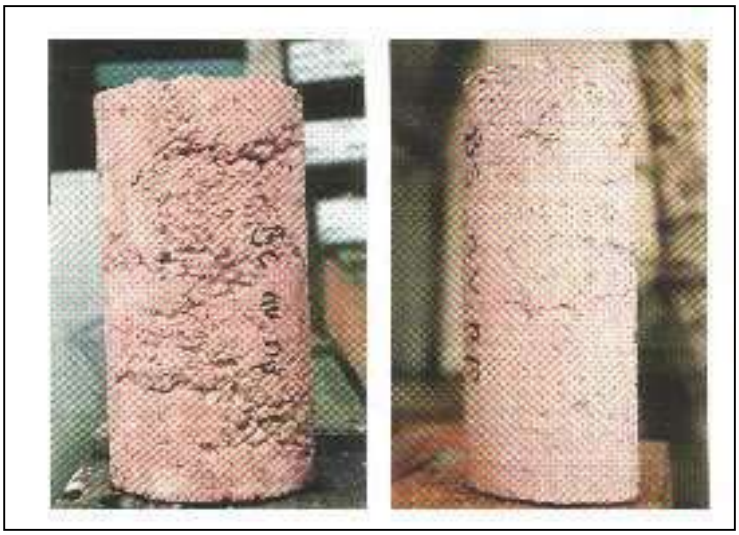


Fig. I.31: Evolution du fluage dans le béton de sable [81].

d. Résistance à la ségrégation

La grande homogénéité et la bonne maniabilité des bétons de sable confèrent un meilleur comportement vis-à-vis des phénomènes de ségrégation que les bétons traditionnels.



a) Béton ordinaire b) Béton de sable

Fig I.32 : Eprouvettes non vibrées non piquées [65]

e. Comportement thermique

La comparaison entre le béton classique et le béton de sable a montré que les deux n'étaient pas très différents du point de vue thermique. En effet, la chaleur massique est identique. Or la conductivité thermique (variable entre 1,4 et 1,8 $Wm^{-1}K^{-1)}$ du béton de sable est plus faible sachant que sa porosité est plus importante et donc plus isolante .Il faut savoir que même si le béton de sable est plus poreux, la répartition de ces pores ne facilite pas la migration de la vapeur d'eau [17].

I .4.1.5.2 Durabilité

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques……etc. C'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité. Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires

à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

Enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la Vanne, phare de Port –Saïd en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro a Paris, etc. [81]

A. L'absorption capillaire

L'absorption dépend essentiellement du taux et de la continuité des petits pores: un matériau qui présente un taux élevé de petits pores continus aura une absorption capillaire très élevée, et par conséquent une durabilité plus faible. Par contre s'il présente un taux élevé de petits pores discontinus, l'absorption capillaire sera moins élevée et la durabilité augmente, c'est le cas d'un béton de sable bien compacté.

B. La perméabilité

La perméabilité varie en fonction de la taille des pores et de leurs continuités; de ce fait un matériau ayant un taux de pores élevés, de tailles grandes et continues présente une perméabilité forte, ce qui conduit à une durabilité faible. En suivant cette hypothèse un béton de sable aura une perméabilité moins élevée d'où une durabilité plus forte.

Cette distribution poreuse particulière, observé sur beaucoup de béton de sable optimisé dans le cadre du projet SABLOCRETE, contribue pour une bonne part à leurs bons comportements vis-à-vis des essais de durabilité [17].

D'autres part, la perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques [17].

C. La carbonatation

La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores (<10µm) et de l'importance de l'absorption initiale. En effet

La dimension moyenne des pores du béton de sable classique (300A) favorise l'absorption.

Des résultats expérimentaux [Balayssac.j et al ,1993] laissent apparaitre une quasi-proportionnalité entre la profondeur carbonatée et l'absorption initiale.

D. La pénétration des ions chlore

Le comportement à la pénétration des ions chlore, que ce soit en milieu marin ou par le biais d'essais accélérés d'immersion-séchage, est comparable à celui bétons traditionnels. Par ailleurs, le temps de dé passivation traduisant la pénétration des ions chlore et le risque de corrosion d'éventuelles armatures est similaire à celui des bétons traditionnels de compacté comparable et utilisant un ciment identique.

E. La réaction alcali-granulat

L'étude de réaction de type alcali-granulat dans les bétons de sable semble révéler paradoxalement que [17] :

1°) pour une fraction granulaire inférieure à 80 µm, quel que soit le granulat (réactif ou non), le béton de sable présente un gonflement très faible similaire à celui du béton de base de granulat non réactif.

2°) au-delà de 80µm, si le granulat réactif est du quartzite, le gonflement est proportionnel à la dimension du granulat et par conséquent, le béton de sable gonflera beaucoup moins que le béton ordinaire ; si le granulat est du calcaire siliceux, le gonflement sera maximum pour la fraction 0,5/5mm et négligeable en dehors.

Autrement dit, les bétons de sable susceptibles d'être le siège de réaction d'alcali-granulat ont porté sur des granulats naturels de pierres et si des résidus industriels tels que les cendres sont utilisés comme ajouts, le comportement pourrait être différent.

En définitive, la spécificité des bétons de sable ne leur confère pas de problème particulier de durabilité à condition que la formulation et le mode de mise en œuvre soient bien adaptés aux agressions dues à l'environnement [17].

I .4.1.5.3 Microstructure du béton de sable

L'observation de fragments durcis du béton de sable au microscope électronique à balayage (MEB), permet de décrire le matériau comme étant dépourvue de fissures notables, avec une bonne homogénéité d'ensemble et une bonne adhérence pâte de ciment-grains de sable.

Des essais ont été effectuée par M.Bederina Madani [20].,basée sur l'observation par microscope électronique à balayage (MEB), sur trois types de béton de sable, a montré qu'une pâte de ciment durcie plus ou moins compacte homogène (Photo n°6,7) on constate

de nombreux hydrates avec forme d'aiguilles et de cristaux vu la taille des pores très petites, et peu de microfissures courtes et non connectées, ces microfissures résultent de l'important retrait d'autodissociation et la nature de séchage qui est uniforme en surface qu'à l'intérieure de l'éprouvette (le séchage atteint 80% entre le 3eet 5e jour et 100% avant le 10e jour).

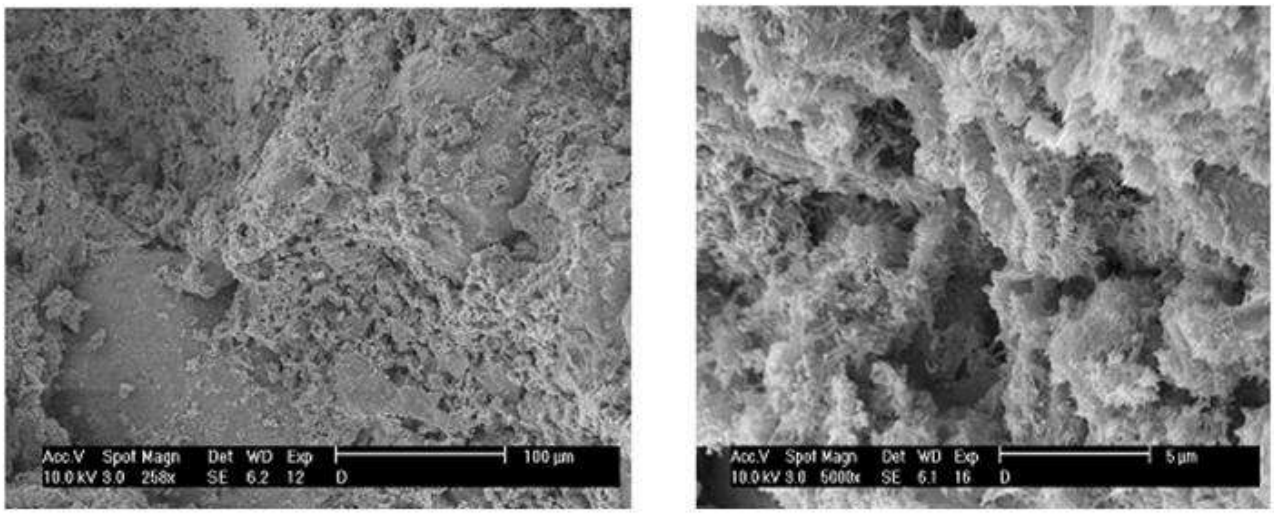


Photo n°6 : Liaison pâte granulats du Béton de sable de dune [20].

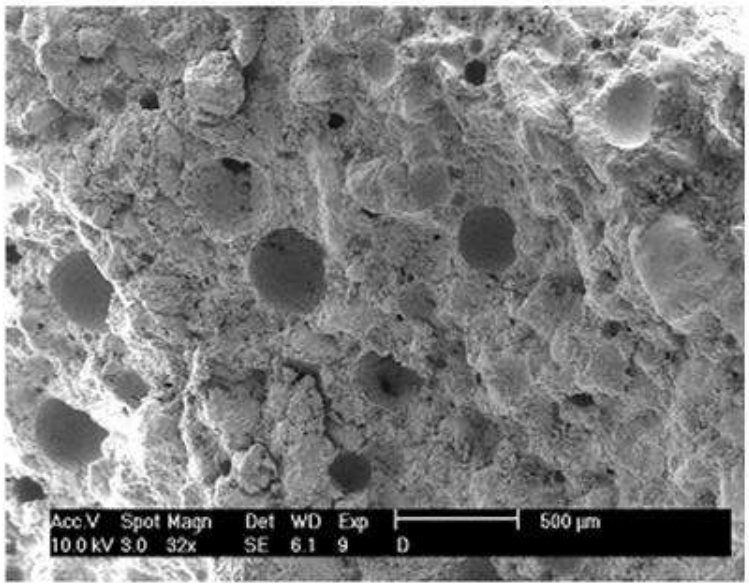


Figure1-33 : Aspect du Béton de sable de dune [20].

I.4.1.6 formulation des bétons de sable

I.4.1.6.1Définition

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

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

I.4.1.6.2Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci. Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [1] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/Dmax).
Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit [65] :

$$V = V0\ (d/Dmax)\ 1/5 \quad \text{(I.2)}$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;
V0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;
d : La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire ;

Dmax : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

A. Dosage en fines d'un béton de sable

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions:

1. Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 µm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.

2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80m m et le diamètre maximal du sable Dmax , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 µm. provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80m m et les étendues durables comprises entre 80 µm et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot:

$$Ps = V = 0.75\ (0.08/D)1/5 \quad \text{.....Éq. (I.3)}$$

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80m m et Dmax
Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.
La constante expérimentale (V0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7÷0.8).
Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement parla coupure 80m m, et à combler la porosité du sable ainsi calculée.
En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

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

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

$$[\text{Fines}] = 0.38\ (0.08/\text{Dmax})1/5. \quad \text{.....Éq. (I.4)}$$

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

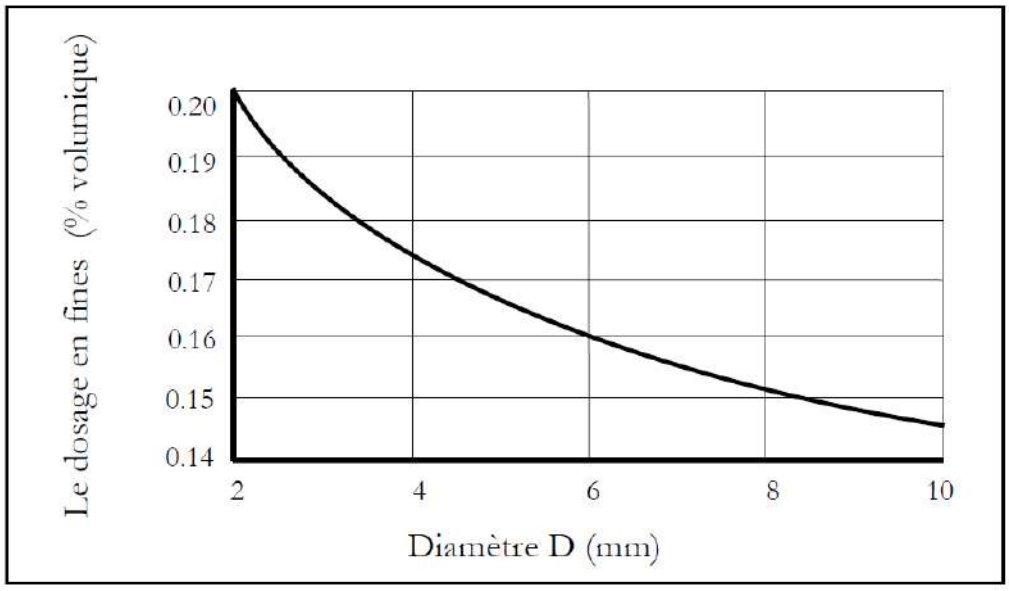


Figure.1-34: Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [65]

B. Dosage en eau d'un béton de sable

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

$$(e + v)\ min = 0.8\ (d/Dmax)\ 1/5 \ldots\ldots\ldots \text{Éq. (I.5)}$$

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

$d = (60 / (f))\ mm \times p$ ……Éq. (I.6)

Avec:

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

p: Densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 mm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme la figure (1.35) le montre :

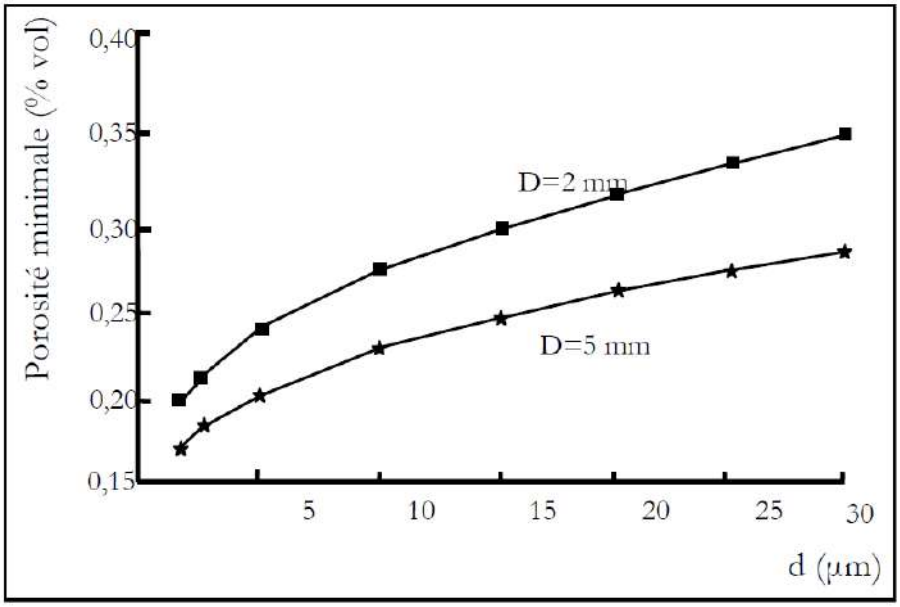


Figure 1-35: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable. [65] [68]

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v) En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la figure 1.36 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

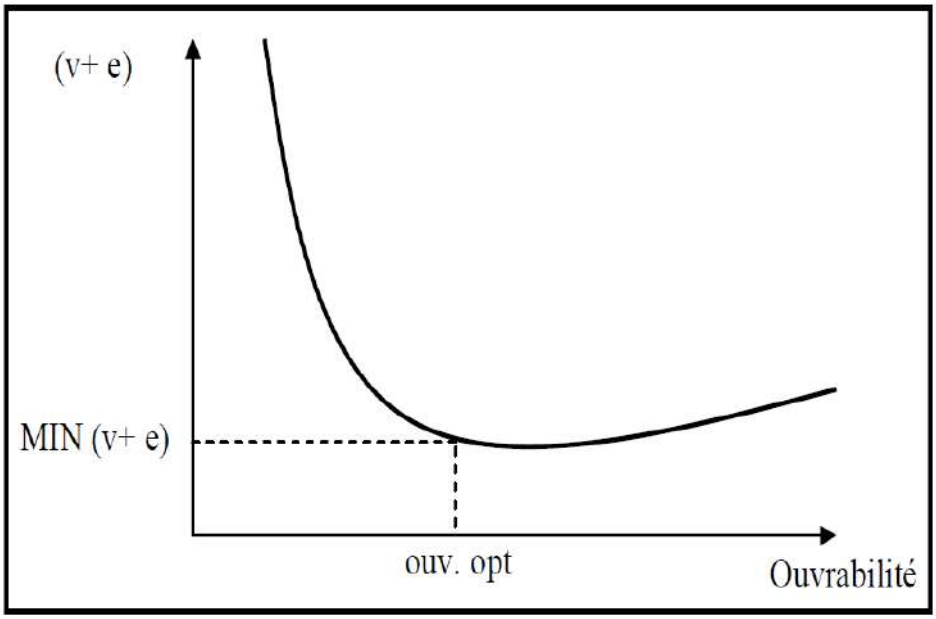


Fig.1-36: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée.

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

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

$$[\text{Vides}] = K\,[\text{eau}] \quad \text{……..Éq. (I.7)}$$

C. Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, (1m3), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide).

[Sable]=1000-[fines]-[eau]-[vide] (l/m3). …….Éq. (I.8)

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80mm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition.

E. Estimation de la résistance en compression

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.

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

$$R_b = \frac{Kf \times Rc}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \qquad \text{……Éq. (I.9)}$$

Avec :

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

E : dosage en eau total (l/m3) ;

V : air piégé (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

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

Avec :

K1 = Kcv (CV/C) +Kfs (FS/C) ;

0.2<Kcv<0.4 2<Kfs<3.3 K1 ≤0.5

K2= Kfil (Fil/C) ;

0<Kfil≤0.4 K1<0.2

K1 : coefficient pouzzolanique

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

Kcv, Kfs, Kfil : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente , alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

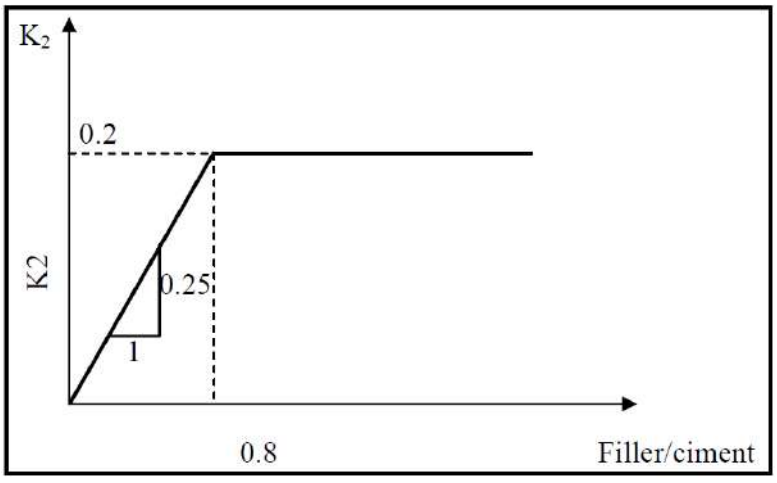


Figure1-37 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [65]

Sur la base de la remarque de l'activité des fillers, un autre paramètre s'ajoute pour le dosage en fines, tonte fois le dosage en fines est estimé en terme de compacité regroupant les fines d'addition et le ciment, alors que l'optimum de la résistance s'obtient en se fixant le rapport

des dosages en fines d'addition-ciment au maximum d'activité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples.

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

Il en résulte de tout ce qui précédé que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable.

Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

I.4.1.6.3 Méthode expérimentale de formulation

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons. D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au Maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction. [65]

I.4.1.6.3.1 Les différentes étapes de la formulation

A. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

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

a) Dosage en ciment

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

b) Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

c) Détermination du dosage en sable

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

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

$$Vair + VC + VE + V_{adj} + V_{sable} = 1000 \text{ (En litres)}.....\text{Éq. (I.10)}$$

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

d) Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Lorsqu'on fait la confection de la formule initiale du béton, et la détermination de :

- La valeur du temps d'écoulement 't' au Maniabilimètre à mortier LCL.
- La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

Cette formule doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm V \square\square\square M\ V_{sable} \text{ ..... Éq. (I.11)}$$

Tel que : MVAT et MVAR représentent respectivement la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle du béton.

Si le temps d'écoulement au Maniabilimètre est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si le temps d'écoulement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (-V dans l'équation). Après chaque correction, la masse volumique apparente théorique devra être comparée à la masse volumique apparente réelle.

D. Détermination du dosage en fines d'addition

Il faut maintenant introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides.

Notre objectif, est d'obtenir une formule de un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \text{ ……Éq. (I.12)}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées:

- Fine d'addition N° 1 : Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m3 de fines. Figures I.38, I.39

- **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.
- **Fine d'addition N° 3 :** Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m3de fines.

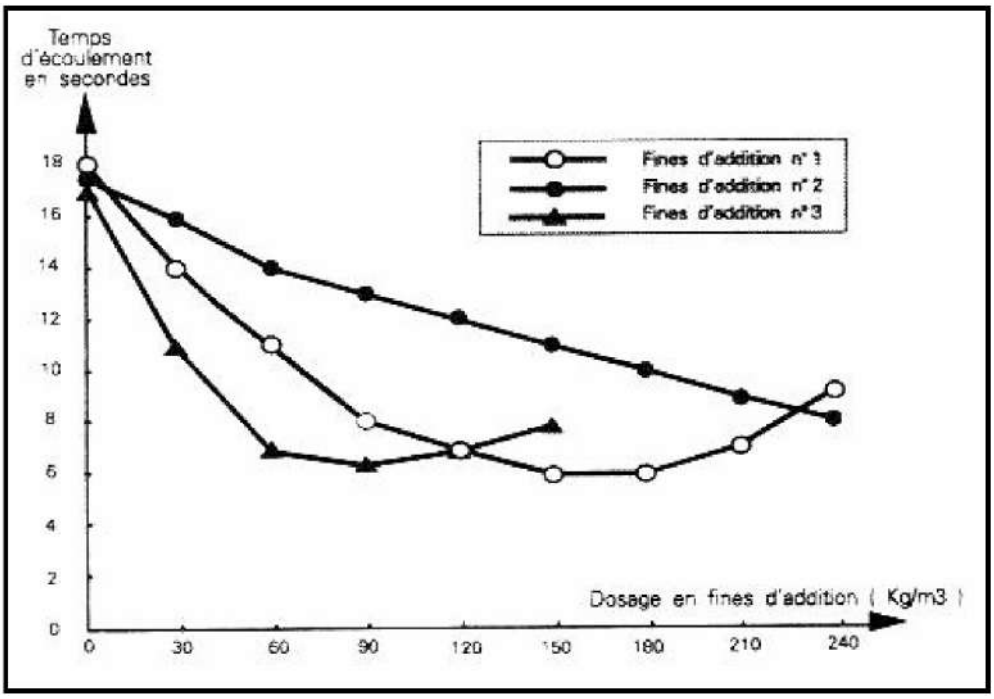


Fig 1-38: temps d'écoulement en fonction du dosage en fines d'addition. [65]

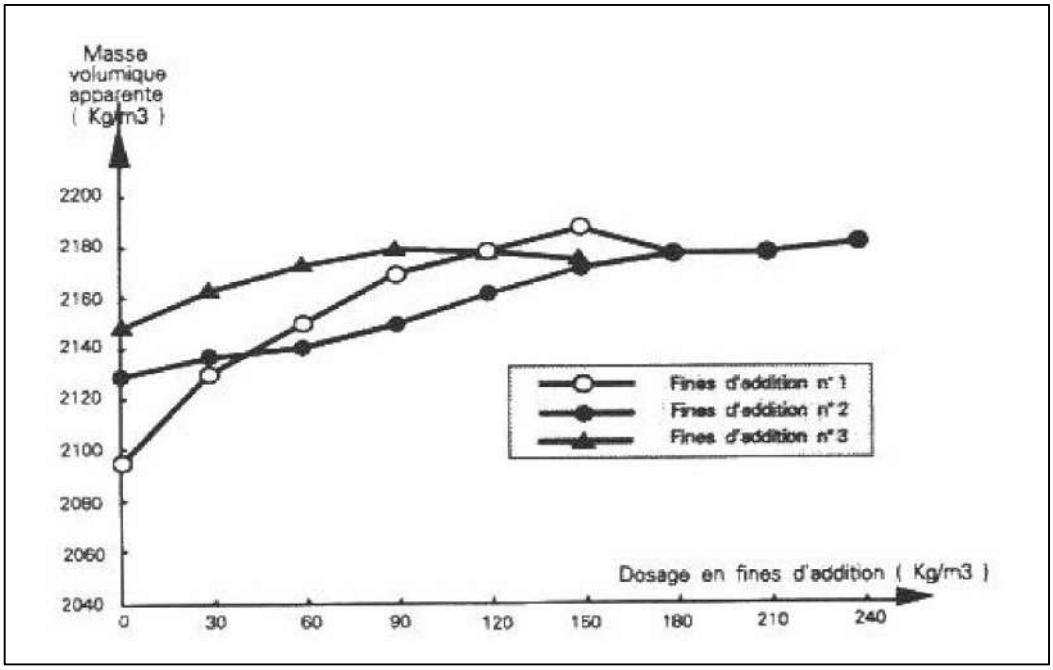


Fig 1-39: masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition. [65]

I.4.1.7 déformation des bétons de sable

Des travaux de recherches ont été effectués sur les bétons de sable, afin d'étudier leur comportement au fluage et au retrait [30].

A.Benaissa, P.Morlier, C.Viguier ont présenté une étude de recherche comparative faite parallèlement, sur un BS et un BO de même niveau de résistance à la compression à 28 jours.

Les compositions du BS et BO qui ont été étudié et leurs caractéristiques mécaniques sont présentés aux tableaux : (2.3 et 2.4) ci-dessous.

Tableau 1-7 : Composition des bétons d'essais (BS-BO) [30]

Composition	**Sable de Garonne roulé- siliceux (Kg)**	**Ciment CPJ 45 R PM (Kg)**	**Filler MEAC (Kg)**	**Superplastifiant (L)**	**Eau (L)**	**Granulats Kg/m^3 3/8**	**8/15**
BS	1550	350	200	7	190	/	/
BO	680	320	/	/	170	450	770

Tableau 1-8 : Caractéristiques mécaniques des bétons d'essais (BS-BO) [30]

Sollicitation	**Age (jours)**					
	Bétons	**3**	**7**	**14**	**28**	**90**
Rc (MPa)	**BS**	11	17	21.5	23.6	28.8
	BO	14	20	25	26	29
R_t (MPa) (Fendage)	**BS**	1.24	1.97	2.24	2.36	2.53
	BO	2.02	2.13	2.14	2.51	2.90
E (MPa)	**BS**	17000	19700	/	23000	23000
	BO	21000	27900	/	31000	32500

D'après Benaissa [31], le module d'élasticité du béton de sable qui est relativement faible implique une plus grande déformabilité que dans les bétons ordinaires et donc un moindre risque de fissuration. L'absence de gros granulats et aussi un facteur atténuateur de fissuration qui confirme le caractère peu fissurant du matériau.

A.Benaissa [31] a constaté aussi d'après les observations effectuées au MEB que le béton de sable est un matériau amorphe et homogène.

A. Le retrait des bétons de sable [14]

Le retrait d'auto- dessiccation (retrait endogène), présenté par la figure (2.6) est caractérisé par une cinétique semblable aux autres gammes de béton ordinaires. La différence de retrait de dessiccation ou de séchage s'explique par une perte en poids plus rapide pour le béton de sable que celle du béton ordinaire. Le retrait de dessiccation est une fonction croissante du taux de séchage. La figure (1.40) [32]-[14] montre la linéarité existante entre le retrait total et le taux de séchage, ce dernier étant pris comme le rapport de la perte de poids d'eau initial. L'aspect de la droite reste assez régulier, alors qu'on aurait pu s'attendre à un changement de pente en raison d'éventuelles fissures apparaissant au –delà d'un certain degré de séchage, mais ce n'est point le cas. Cette régularité de pente traduit une bonne homogénéité du béton et donc une absence de fissuration susceptible qui ne peut s'expliquer que par un séchage uniforme. Afin de vérifier cette hypothèse, A.Benaissa a fait analyser au banc gamma (étude gamma métrique : perte de densité en fonction du temps et de l'épaisseur) une éprouvette de béton de sable dont les faces planes ont été rendues étanches subissant un séchage radial. Il a affirmé que l'uniformité du séchage et l'homogénéité du béton de sable, sont les facteurs déterminants l'absence de fissures. Cet état explique, au moins partiellement, le retrait de dessiccation du béton de sable plus important que celui du béton ordinaire. [32]-[14]-[30].

A.Benaissa, P.Mollier, C.Viguier et Chauvin en concluent que si la présence de fissures réduit le retrait, ceci n'est pas en soi un avantage car la fissuration peut exposer dangereusement la durabilité du matériau, donc ils affirment que le BS pour peu que sa perméabilité soit faible, présente une meilleure résistance aux milieux agressifs. De plus ils pensent que la déformation de retrait de dessiccation du BS se stabilise plus rapidement que celle du BO ou la stabilisation est éloignée dans le temps de sorte que les écarts à très long terme s'atténuent. Cette hypothèse est non seulement justifiée par le séchage plus rapide du béton de sable, mais aussi par la porométrie de ce matériau.

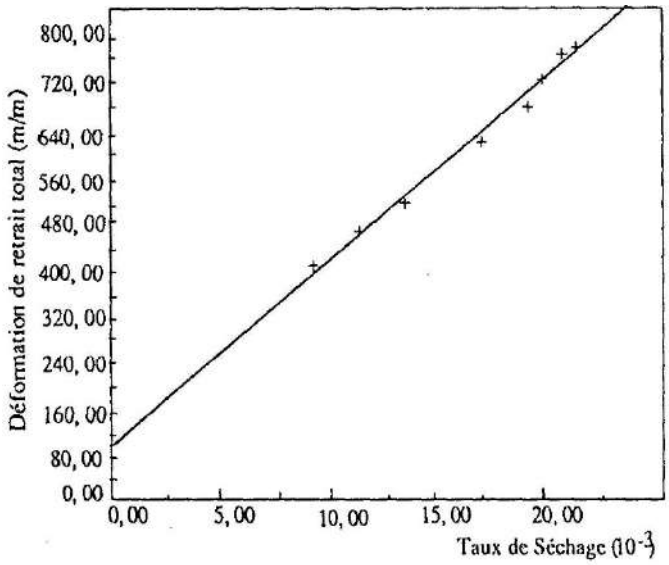


Figure 1-40 : Retrait total en fonction du taux de séchage BS [32]

La réaction d'hydratation est stoppée plus rapidement dans le béton de sable car les produits d'hydratation non pas suffisamment d'espace dans les micro-pores, alors que dans le béton ordinaire, ces réactions puisent dans l'espace des macro-pores. Cette hypothèse est vérifiée par les travaux de nombreux chercheurs [14].

B. Comportement des bétons de sable au fluage [30]

A.Benaissa [30], a étudié le comportement des bétons de sable au fluage, ou il les a comparés avec les bétons ordinaires. Il a trouvé que le fluage de dessiccation est une fonction croissante de la perte en poids. C'est-à-dire que cette déformation est d'autant plus forte que la quantité d'eau évaporable est grande; d'ailleurs, les courbes de fluage de dessiccation varient bien dans le sens de variation des courbes de pertes en poids (Fig. 1.41). Les cinétiques du fluage propre des deux bétons (BS et BO) (fig.1.42) manifestent quelques différences pendant les vingt premiers jours. Au-delà, l'écart de développement des taux de déformations entre les deux bétons s'atténue peu à peu pour s'annuler (fig.1.43).

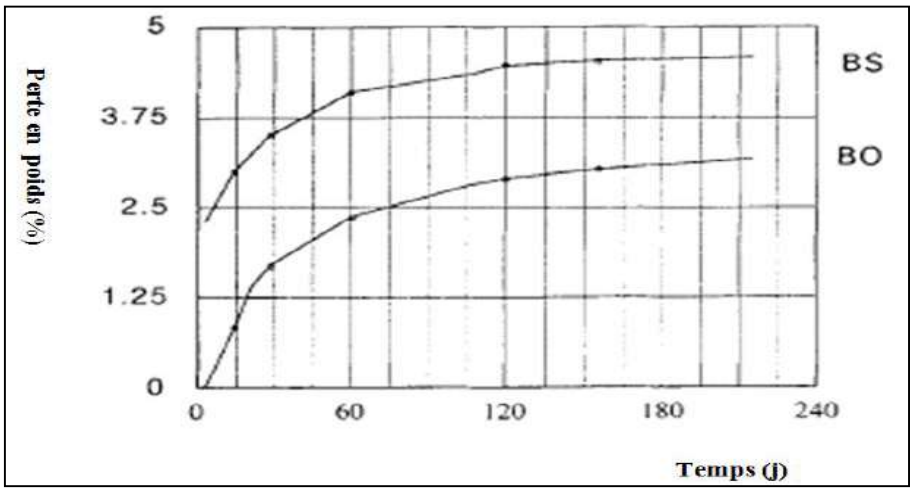


Figure 1-41: Evolution de la perte en poids (%) dans le temps (jours) [30]

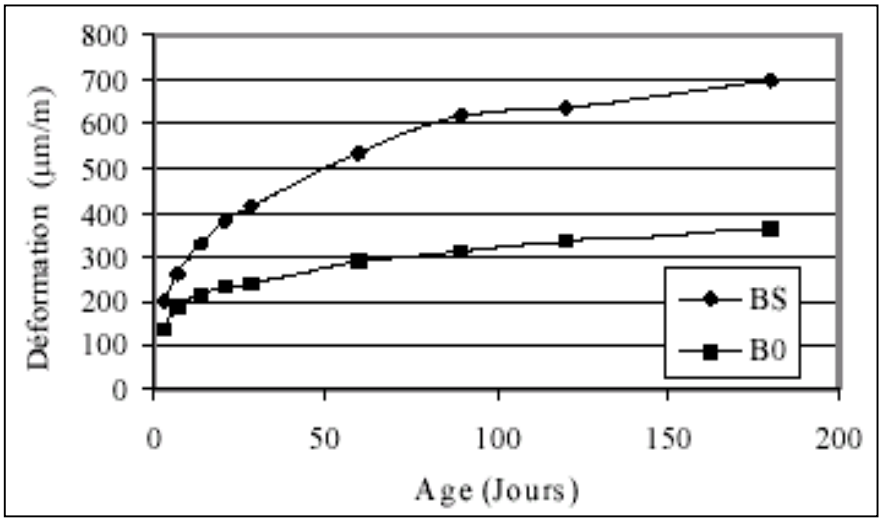


Figure 1-42 : Fluage propre (BS et BO) [33]

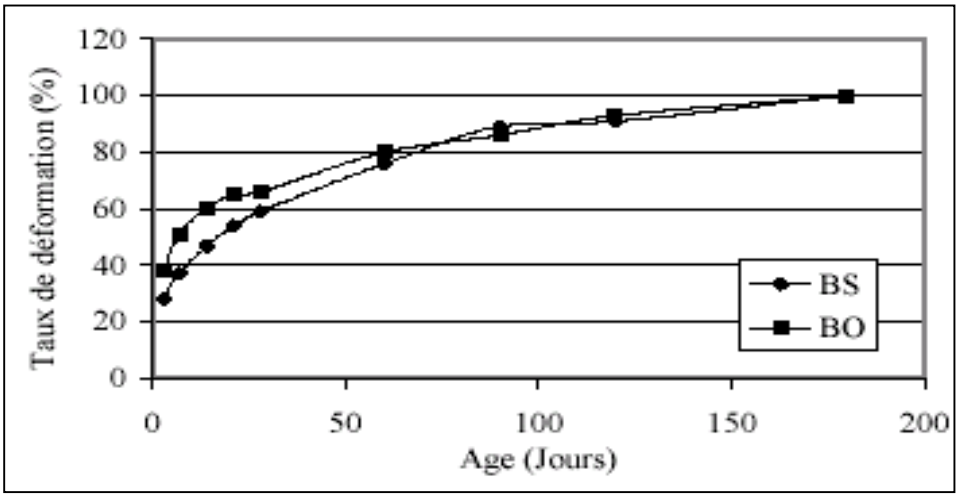


Figure 1-43 : Taux de déformation du fluage propre (BS et BO) [33]

A.Benaissa a essayé d'expliquer avec son modèle physique figure (1.44) [33] l'écart entre les fluages propres du BS et BO, c- à –d l'espace offert à la migration d'eau dans le béton de sable étant plus réduit que dans le béton ordinaire en raison d'une fissuration moins importante. Par ailleurs, ce modèle illustre comment l'importance de la densité de fissuration du B.O par rapport à celle du B.S, d'une part et la quantité d'eau migrant vers les microfissures est plus importante que dans le B.O d'autre part, sont à l'origine d'une amplitude du fluage propre du B.S plus importante que celle du B.O. Le départ de l'eau sous chargement entraîne une refermeture de ces fissures proportionnellement plus importante dans le béton de sable et donc un fluage propre plus grand en amplitude que celui du béton ordinaire. A.Benaissa a constaté une remarque importante est l'existence d'un fluage de dessiccation important en dépit d'un état très peu fissurant.

On a montré aussi que le béton de sable est un matériau homogène, d'où la nature du séchage est uniforme, au contraire au béton classique où elle est non uniforme. Cette cinétique particulière de la dessiccation du béton de sable, explique le caractère non fissurant du matériau. A.Benaissa a trouvé que la fissuration du B.O est le résultat de gradients de traction liées au séchage non uniforme qui est à l'origine de gradients hydriques. Mais le matériau BS est peu ou pas fissurant, grâce aux gradients hydriques qui sont négligeables, implique un séchage uniforme, et c'est la porométrie fine du matériau BS qui est à l'origine.

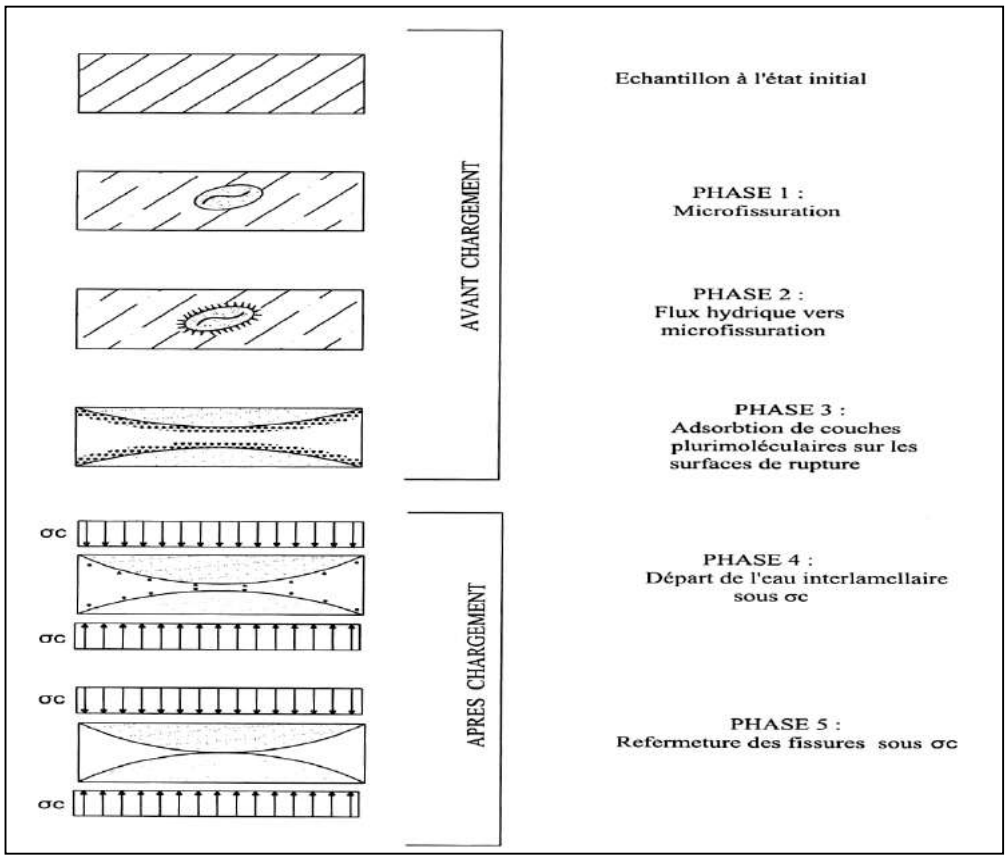


Figure 1-44 : Modèle du fluage propre du BS [33]

I.4.1.8 exemples d'applications des bétons de sables [34] :

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

On trouve également des réalisations en béton de sable dans le domaine des chaussées routières et aéroportuaires ainsi que dans des travaux de calage de bourrage ou d'injection, sans oublier le plus important dans notre recherche, son utilisation dans le domaine des réparations. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent d'avantages à ses propriétés spécifiques par rapport au béton traditionnel, qu'a l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci.

Pour mettre en évidence l'utilisation des BS dans la rénovation et réparation des ouvrages, on peut citer quelques exemples d'applications ou on mentionnera quelques formulations

avec caractéristiques mécaniques des bétons de sable de réparation de quelques ouvrages (Tableau 2. 5):

- Réhabilitation des silos à grains à Moscou : travaux de rénovation avec ferraillage de surface et une couche de béton de sable en 6 cm d'épaisseur [35]
- Réhabilitation d'une réfrigérante centrale thermique de Lynbertsy (banlieue de Moscou) 1975. [35]
- Pont de Castagnède sur le salat (construit entre 1862 et 1867) et Pont de Saint Martory (construit entre 1724 et 1727), en France [34] : Réparation des deux grands ouvrages d'art en1991, le problème qui s'est posé c'est l'érosion des fondations qui ne reposent plus sur le substratum, alors la réparation se fait en réalisant des corsets et des remplissages parfaits des vides qui comptent de béton de sable.



Figure 1-45 : Pont de Saint-Martory .1724 [79]

- Réhabilitation structurante d'un collecteur encombré Agrippa d'Aubigné de la ville Paris. [17]
- Réhabilitation structurante d'un collecteur fortement dégradé Naujaede la ville Bordeaux. [17]
- Réfection de l'habillage d'un talus abrupt en bordure d'une autoroute urbaine (A10, Lormont (France).) [17]
- Réhabilitation d'une buse métallique : RN 89, ARTIGUES près de bordeaux. [17]

I.4.2 les bétons à base de déchets de caoutchouc

I.4.2.1 L'histoire du béton

L'histoire du ciment commence en 3000 Av. J-C, où les Egyptiens ont utilisé des mortiers en gypse et des mortiers en chaux pour construire les pyramides. Puis, les Romains ont utilisé une sorte de béton, la pouzzolane : Il s'agit d'un dépôt volcanique qui se solidifie si on le mélange avec de l'eau et de la chaux (Aujourd'hui la pouzzolane est classée comme un ajout). Mais, le mot béton, lui-même, a été introduit par l'ingénieur français Belider (1697- 1761) et vient de « betun, becton, beter » qui signifie « se solidifier ». En 1824, Joseph Aspdin a inventé le ciment portland, par la calcination, à 1500 °C, d'un mélange d'argile et de craie que l'on broie ensuite finement. Ensuite, dans les années 1850, François Coignet indiquait le moyen de constituer un hourdissage pour les planchers où les solives sont en fer.

Il formait entre solives, un réseau des barres de fer puis, il pilonnait un mortier de ciment sur un faux plancher en bois établi provisoirement sous les solives en fer. Cette opération permettait de remplir tout l'espace entre les solives et de former un plafond en dessous et un carrelage au-dessus.

A l'occasion de l'exposition universelle à Paris en 1855, une barque en ciment armé fabriqué par l'avocat français, Joseph-Louis Lambot, a été présentée. Citons aussi Eugène Freyssinet, qui a inventé le béton précontraint. Le concept de construction consiste à rendre les armatures actives et non plus passives comme dans le béton armé.

Depuis le début du XXe siècle, le béton armé a été massivement employé dans des structures de toutes natures, notamment bâtiments, immeubles d'habitation, ponts, routes, tunnels, aéroports, barrages, centrales thermiques et nucléaires et plates-formes offshores. [36].

I.4.2.2 les Bétons spéciaux

Un béton hautes performances (BHP) (ou béton à hautes performances) est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme [38].

I.4.2.2 béton de déchets de caoutchouc

1-définition : Le béton de déchets de caoutchouc est obtenu en incorporant dans la masse de béton des éléments qui sont les déchets plastiques composante de forme et de nature diverses.

2-Propriété du béton de déchets de caoutchouc

A. propriétés à l'état frais

Güneyisi et al. [39] ont étudié des propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont de 0% à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF). La Figure I-20 (a) illustre l'évolution de l'affaissement en fonction du dosage en G.C. et du dosage X% de la fumée de silice SF. Ces auteurs observent que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation de caoutchouc. Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.

L'étude réalisée par Khaloo et al. [40] a indiqué une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant des G.C. a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition (Figure I-47). Néanmoins, leurs résultats montrent que la procédure ordinaire pour évaluer l'affaissement n'est pas appropriée à ce composite cimentaire. Ils ont donc suggéré qu'il fallait chercher d'autres méthodes pour mesurer correctement l'affaissement du béton incorporant des granulats en caoutchouc.

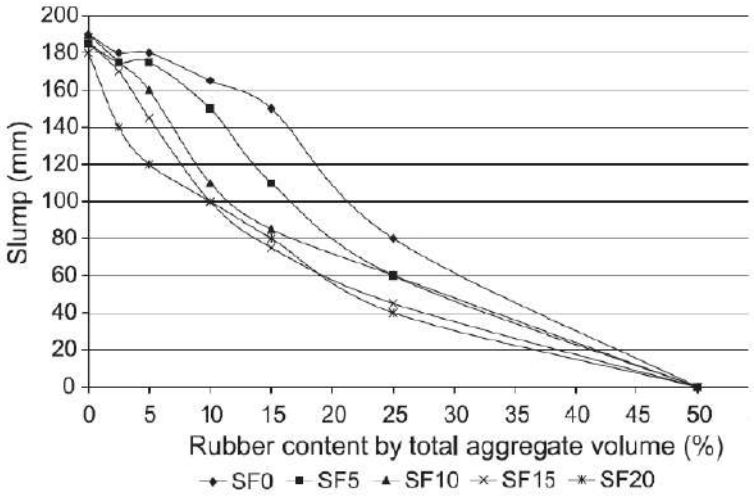


Figure I -46 : Influence de G.C. sur l'affaissement [39].

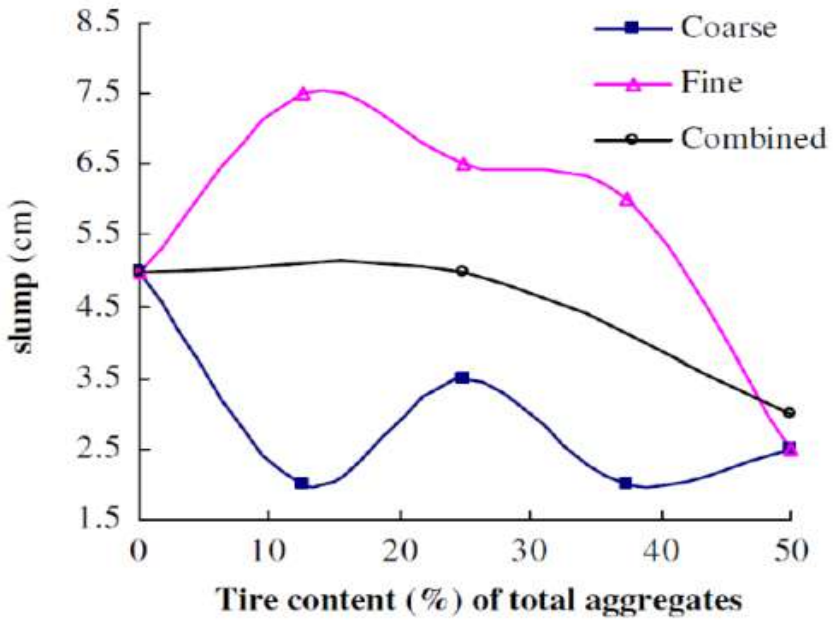


Figure I -47 : Influence de G.C. sur l'affaissement [40].

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Si on se réfère à la classification des bétons légers établie par l'ACI Comité 213 [41], avec l'incorporation de G.C. on peut envisager la production de bétons légers de structure.

Comme le montre la Figure I-48(a), Güneyisi et al. [39] ont observé une chute de25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence (la légende étant celle utilisée précédemment à la Figure I-46). Kaloush et al. [42] ont aussi indiqué que le masse volumique diminue approximativement de 102 kg/m3 pour chaque 22,7 kg de G.C. ajouté, une tendance illustrée par la Figure I-48(b).

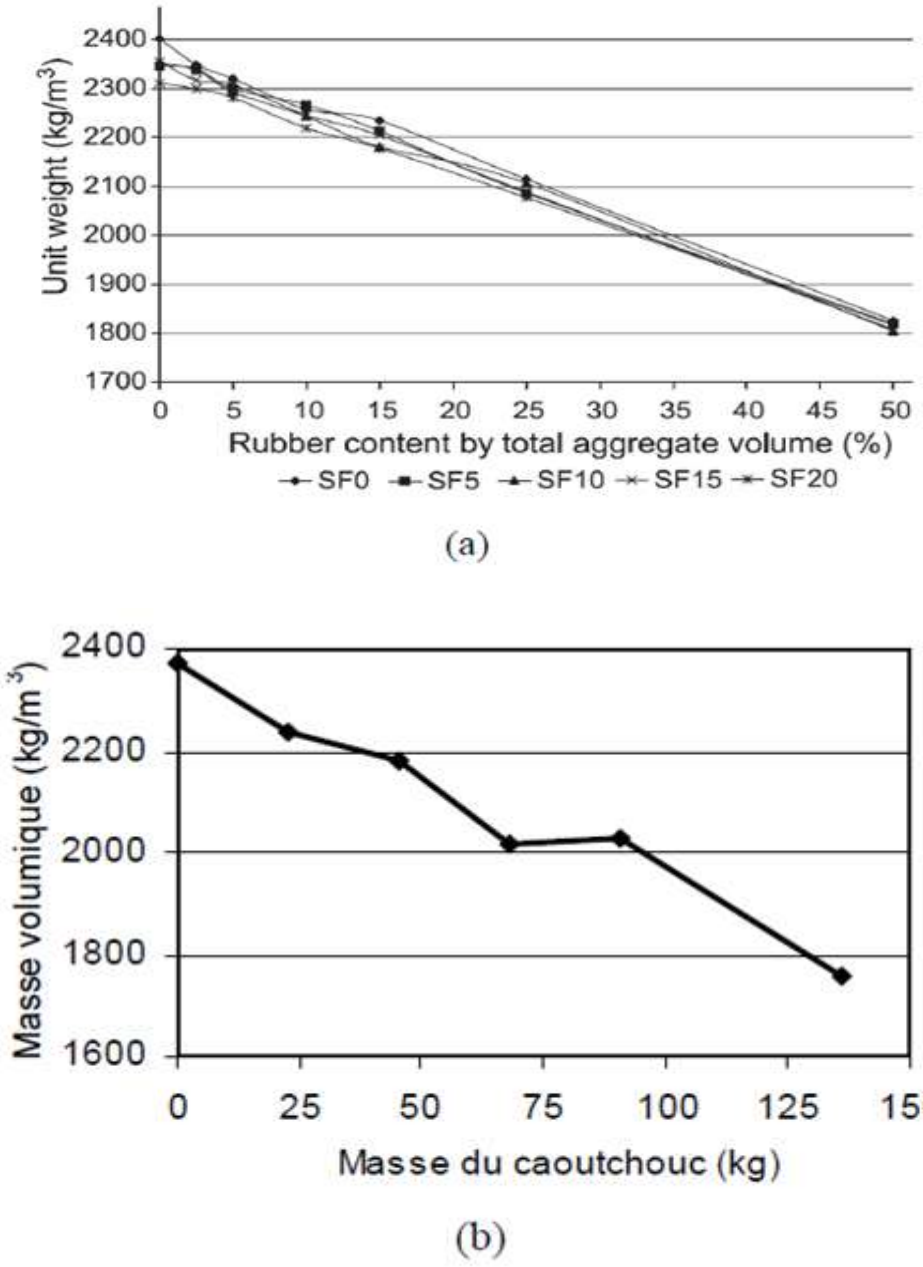


Figure I-48: Variation de la masse volumique du béton incorporant des G.C [39] -a,[42]-b.

S'agissant de la teneur en air occlus, Khatib et al. [43] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure I-49 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des G.C. fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse

30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C.

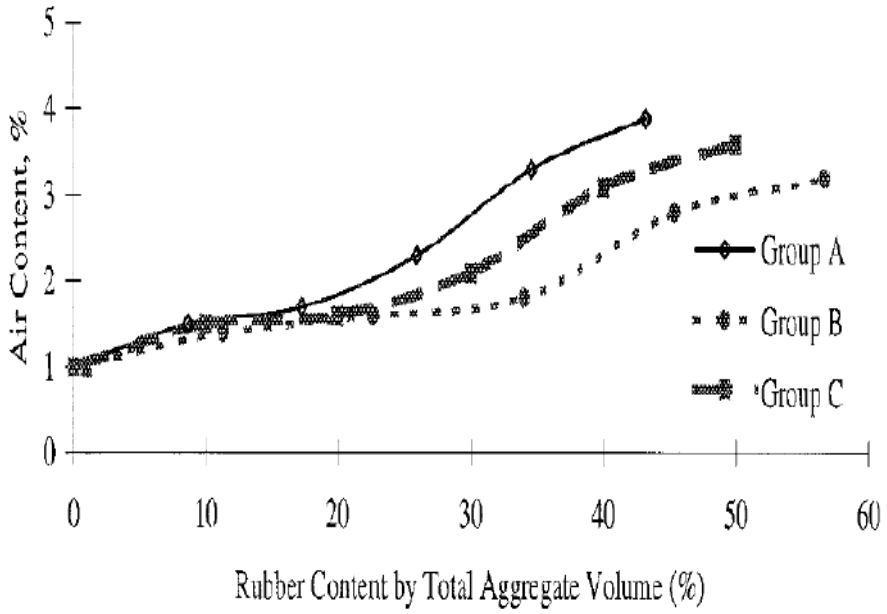


Figure I-49 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [43]

Fedroff et al. [44] ont aussi rapporté que la teneur en air occlus dans les bétons de caoutchouc est plus importante que celle des bétons ordinaires même sans agent entraîneur d'air. Ces chercheurs pensent que la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de caoutchouc sont les principales causes de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des G.C.

B. Propriétés à l'état durci

a). Résistance en compression

La caractéristique essentielle des matériaux cimentaires durcis est la résistance en compression à un âge donné. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance des propriétés mécaniques est indispensable pour le dimensionnement des ouvrages. Ainsi, l'étude de cette résistance en compression peut permettre d'avoir une idée globale sur la qualité du béton. On verra que la résistance en compression du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et dosage des matériaux utilisés, la nature des granulats, la porosité, la condition de réalisation et de cure, etc. [45].

Dans les matériaux cimentaires, dont une partie des granulats naturels est remplacée par des G.C. de nature, de forme, de densité et en général de propriétés physiques tellement

différentes de celles des granulats naturels, de toute évidence il est attendu que ces propriétés du caoutchouc vont influencer la résistance en compression des composites obtenus.

Les chercheurs qui ont travaillé récemment sur les matériaux cimentaires incorporant des G.C. ont tous relevé que la substitution de granulats naturels par des G.C. entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression.

L'examen des résultats obtenus par Garros [46] lui a permis de préciser l'impact du dosage et de la taille des G.C. sur ce paramètre dans le cas de BAP. Ses résultats illustrés par la Figure I-50 ont confirmé que la présence de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en G.C. Dans l'application visée, une résistance en compression minimale de l'ordre de 5 MPa lui a imposé un taux maximal de substitution de 25%.

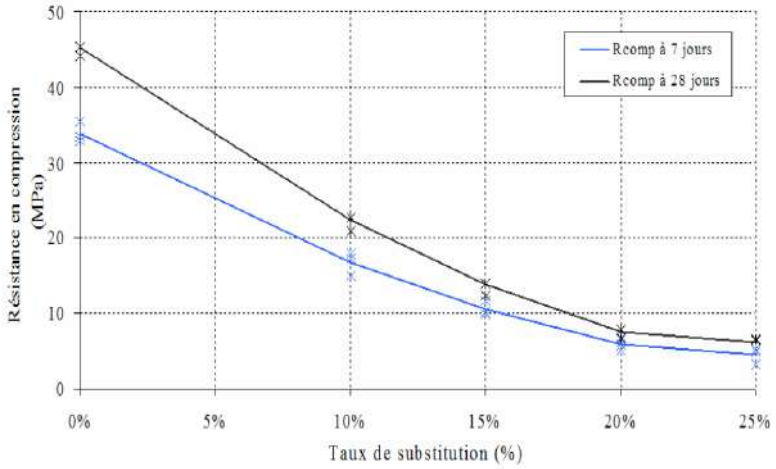


Figure I-50: Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0- 4mm remplacé par des G.C. 0-4mm) [46].

Eldin et Senouci [47] ont montré une chute d'environ 85% de la résistance en compression et de 65% lorsqu'on substitue totalement le gravier et le sable respectivement par des G.C. de granulométrie équivalente. Khatib et al. [43] ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de G.C. A partir de cette étude, dont les résultats sont illustrés à la Figure I-51, les

auteurs ont conseillé de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase granulaire.

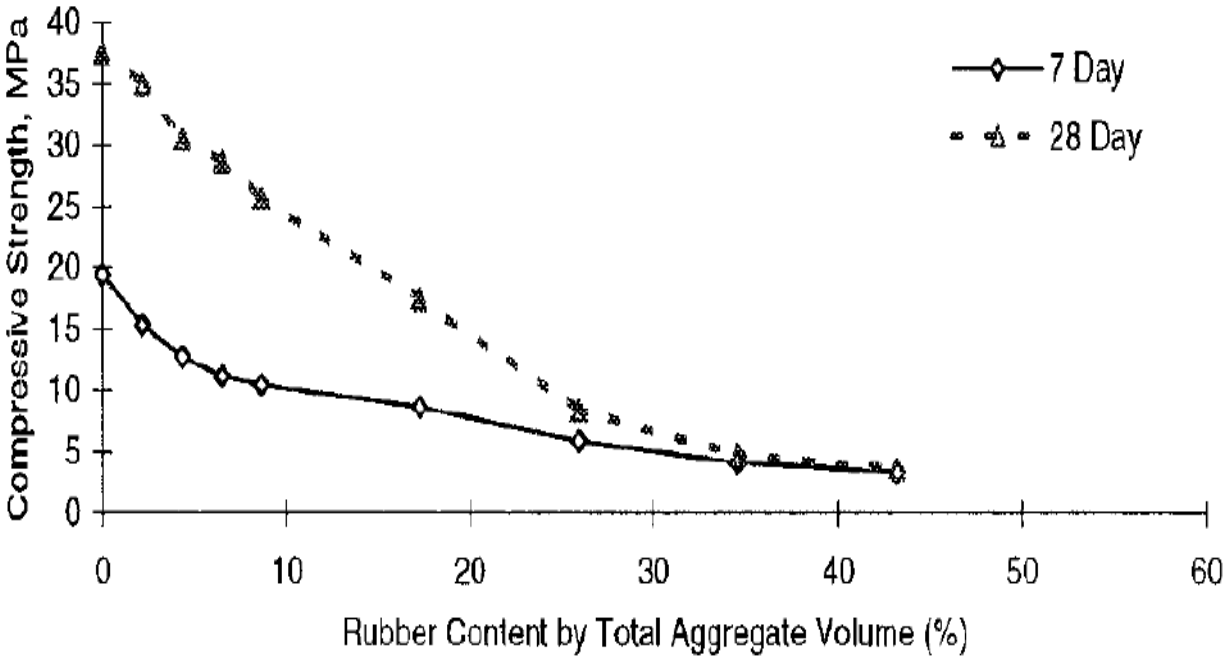


Figure I-51: Influence de l'adjonction de G.C. sur la résistance en compression, [43]

Des observations au vidéo microscope montrent un défaut d'adhérence manifeste et une auréole de transition plus étendue entre la matrice cimentaire et les grains de caoutchouc. La photographie de la Figure 1-52 montre cet état qui contribue sans doute aussi à l'augmentation de la porosité globale du composite et à la chute de la résistance en compression. [43]



Figure I.52 : Défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire vu au vidéo microscope, (grossissement x100) [45].

b). Résistance en traction

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître. Elle est généralement indirectement déterminée par le biais d'essais de traction par flexion ou de traction par fendage dit brésilien. Quant à l'essai de traction directe, il est certainement le plus noble en la matière, mais il demeure délicat à réaliser car il nécessite le collage de têtes de traction parfaitement centrées et doit être réalisé sans effort de flexion parasite. [45]

Kaloush et al. [42] ont montré que l'augmentation du contenu en G.C. dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage. Les échantillons testés sont obtenus par sciage d'éprouvettes cylindriques de diamètre (D) 102 mm perpendiculairement à la génératrice par tranche d'épaisseur (E) comprise entre 22 et 26 mm Leurs résultats ont été récapitulés dans le Tableau I-2. Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de G.C. : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des G.C. est plus ductile.

Biel et Lee [48] ont signalé que le type de ciment affecte la résistance en traction du béton incorporant des G.C. Ils ont utilisé deux types de ciment : ciment portland et ciment magnésium oxychlorure. Leurs résultats montrent que des éprouvettes de béton à base de ciment Portland avec 25% de G.C. (du volume total) se sont maintenues à 20% de la résistance du béton de référence. Tandis que pour le cas du béton à base de ciment

d'oxychlorure de magnésium avec le même taux de G.C., les éprouvettes gardent 34% de la résistance du béton de référence.

Tableau 1-9: Résultats de la résistance par fendage des échantillons d'épaisseur (E) et de diamètre (D), [42]

Masse G.C. (kg/m^3)	Epaisseur E (mm)	Diamètre D(mm)	Résistance en traction (MPa)	Déformation à la rupture (%)
0	22	102	2.1	0.31
119	20	102	1.1	0.67
178	24	102	0.9	0.43
237	26	102	0.6	0.54

Dans l'étude de Güneyisi et al. [39], les auteurs observent une tendance baissière de la résistance en traction similaire à celle de la résistance en compression. Cependant, à même taux d'adjonction de G.C., la chute de la résistance en traction s'avère moins importante par rapport à celle observée en compression.

La variation de la résistance en traction (mesurée par le biais d'essais de fendage) en fonction du taux d'adjonction des G.C. est illustrée par la Figure I-53 (le reste de la légende étant celui utilisé précédemment).

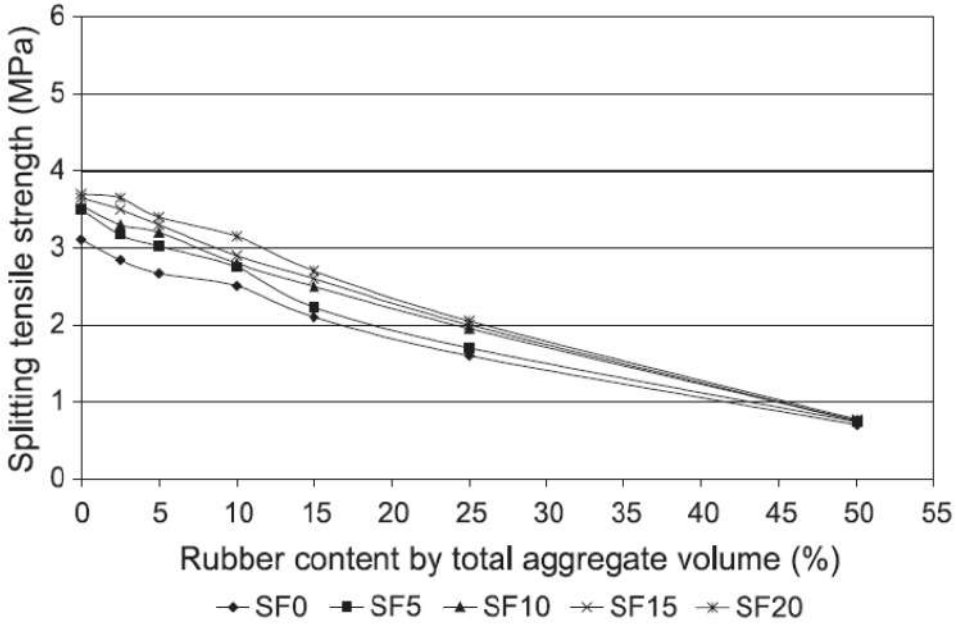


Figure I-53 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage, [39]

Papakonstantinou et Tobolski [49] ont étudié les effets combinés du renfort par des fibres métalliques obtenues par broyage de pneus usagés et des résidus de caoutchouc qui restent adhérents à ces fibres. La géométrie de ce genre de fibres est très variable et dans le cas présent, leur longueur variait de 20 à 60 mm pour un diamètre compris entre 0,3 et 1,3 mm. La dimension maximale des grains de caoutchouc était de l'ordre de 12,5 mm Dans cet ensemble fibres métallique - caoutchouc, la première phase représentait approximativement 30% du volume. Ce mélange a été introduit dans un béton avec des taux de 0 à 8% du volume de matériau. Les auteurs ont alors constaté une variation de la résistance en traction par fendage de 2,82 à 2,47 MPa, respectivement.

c). Module d'élasticité

Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux confirment que l'incorporation de G.C. induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression. L'effet défavorable de l'incorporation de G.C. sur le module d'élasticité a été présenté par Güneyisi et al. [39] dont les résultats illustrés par la **Figure I-54** (où les légendes ont été présentées précédemment) montrent une baisse de 83% du module d'élasticité lorsque la moitié du volume granulaire est remplacé par des granulats en caoutchouc.

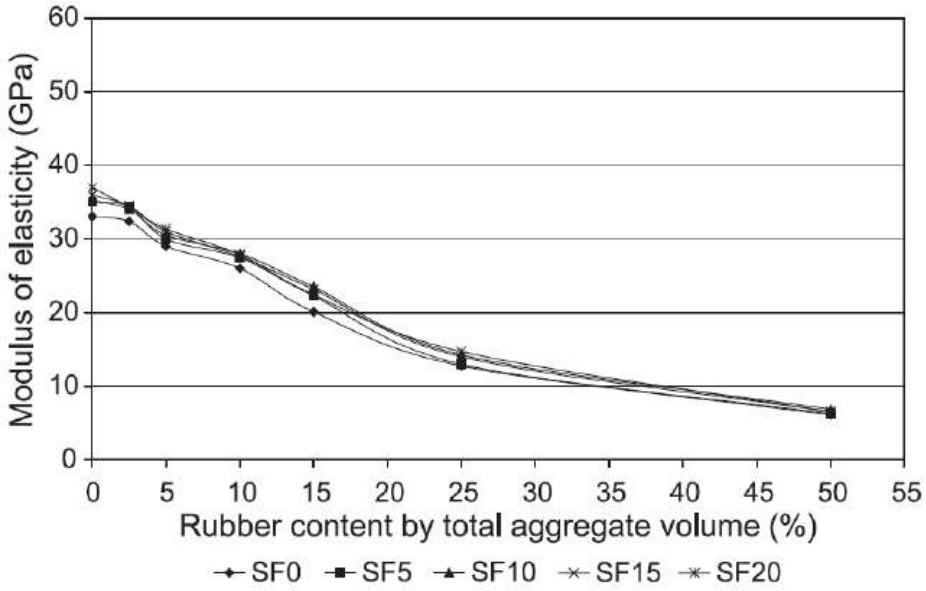


Figure I-54 : Variation du module d'élasticité du béton incorporant G.C. et de la fumée de silice, [39]

Dans une étude récente réalisée par Ganjian et al. [50] , les granulats en caoutchouc dont la dimension maximale est de 25 mm remplacent 5 ; 7,5 et 10% en masse des gros granulats naturels. Les auteurs montrent à la Figure I-13 une réduction de 30% du module d'élasticité lorsqu'on passe du béton de référence au béton incorporant 10% de G.C.

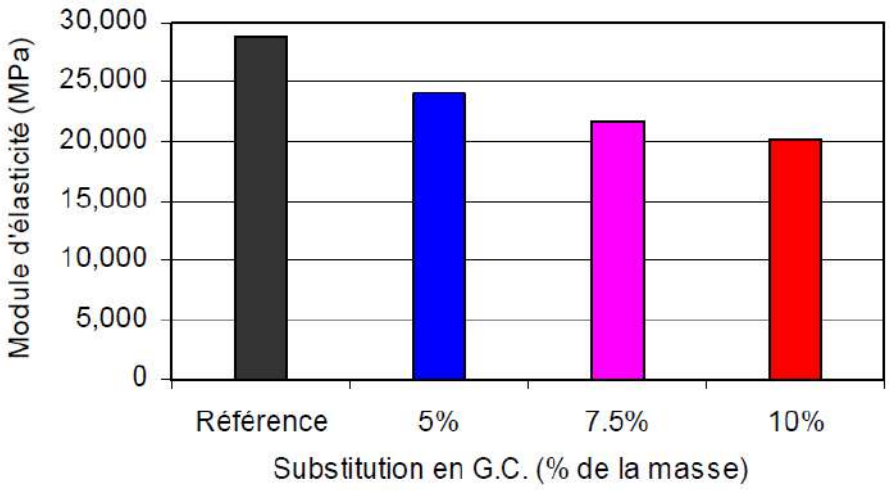


Figure I-55: Influence des G.C. sur le module d'élasticité, [**50]**

d). Retrait

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique. Il correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferraillage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles entraînent souvent l'apparition de fissures précoces, d'ouverture conséquente ce qui peut nuire à la durabilité du béton.

Nous n'allons pas nous étendre sur le retrait des matériaux à base cimentaire, un phénomène largement documenté par ailleurs, mais plutôt sur l'incidence des inclusions en caoutchouc sur son amplitude et les conséquences qui en découlent.

Certains auteurs ont étudié l'influence des G.C. sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence.

Turatsinze et al. [51] confirment à la Figure I-56 que les variations dimensionnelles des mortiers incorporant des G.C. sont plus élevées que celles du mortier de référence (les légendes M0, M20 et M30 ont été expliquées dans les pages précédentes). C'est essentiellement par la relation entre la rigidité des granulats et l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait [52] et [53] que les auteurs interprètent les résultats obtenus.

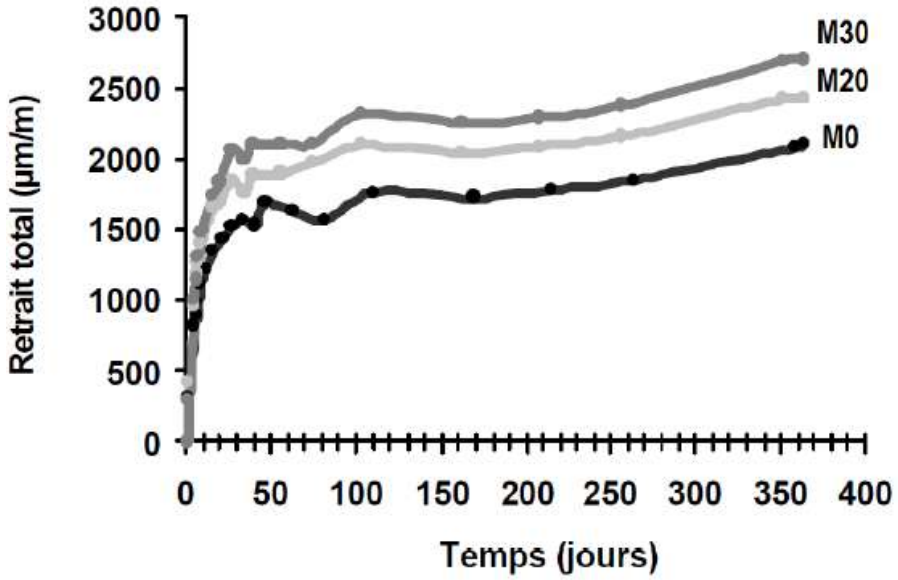


Figure I-56: Evolution du retrait total des mortiers en fonctions du taux de substitution en G.C., [51].

e). Propriétés de transfert

Les propriétés de transfert comme la perméabilité aux fluides ou l'absorption d'eau sont des indicateurs de durabilité des matériaux à base cimentaire. Une étude réalisée par Benazzouk et al. [**54**] a permis d'examiner l'influence de deux types de G.C., le caoutchouc expansif et le caoutchouc compact, sur des indicateurs de durabilité du composite ciment-caoutchouc. Le volume incorporé de chaque type de granulats en caoutchouc est compris entre 0 et 40%. Ces composites sont nommés ERAC et CRAC, respectivement. [**45]**

f). Perméabilité

D'après ces auteurs, dont les résultats sont présentés dans le Tableau I-3, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de G.C. alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu. Cette conclusion de Benazzouk [54] peut être rapprochée des observations de Kerasley et Wainwright [55] qui, en étudiant des bétons mousses incorporant de cendres volantes, ont aussi constaté que malgré une porosité élevée, le réseau des pores plus discontinu entraîne une perméabilité à l'air nettement plus faible.

Tableau 1-10 : Coefficient de perméabilité à l'air du composite ciment-caoutchouc, [54]

Volume du G.C	**Coefficient de perméabilité à l'air Volume du G.C. K (10-17 m2)**		
	CRAC		**ERAC**
0	12.56		
10	10.25		9.85
20	4.38		2.95
30	3.24		2.23
40	2.36		1.74

g). Absorption d'eau

S'agissant de l'absorption d'eau, on trouve une convergence entre les résultats de Benazzouk et al. [54] et ceux de Garros [46] mais avec des explications partiellement communes. Leurs résultats sont illustrés sur les Figure I-57 et Figure I-58 respectivement. Les légendes dans la Figure I-56 sont celles précisées dans la section dédiée à l'étude du retrait. Dans les deux cas la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C., ce que les premiers auteurs expliquent par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire. Quand à Garros, il évoque aussi la nature hydrophobe du caoutchouc et la dimension de l'auréole de transition qui n'est pas de taille à favoriser l'ascension capillaire.

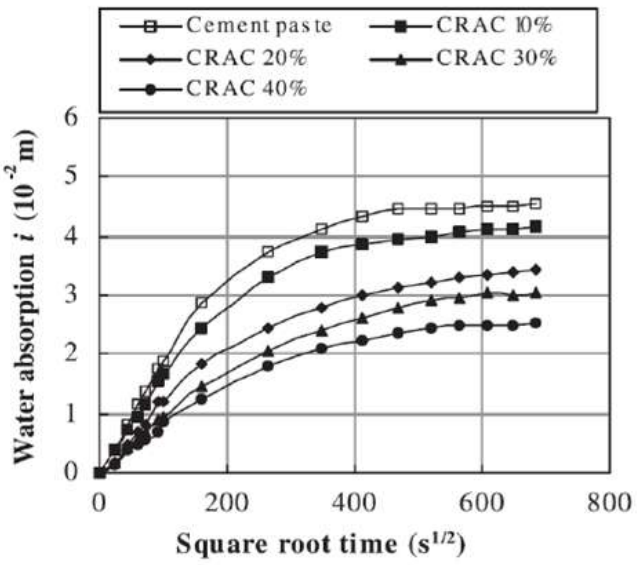


Figure I-57 : Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en G.C., [54]

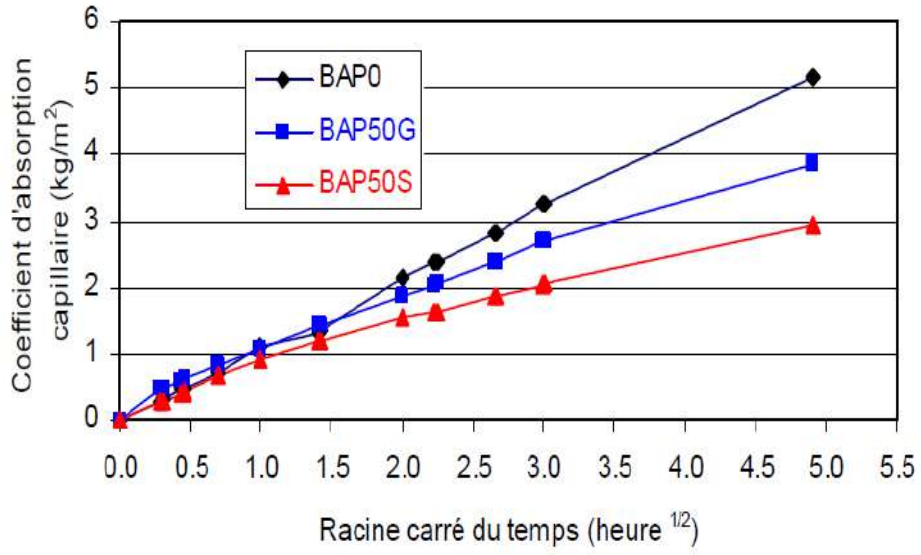


Figure I-58 : Evolution de l'absorption capillaire en fonction du taux d'incorporation et de la taille des G.C., [46].

h). Résistance au gel et dégel

La résistance au gel et dégel est aussi souvent utilisée comme un indicateur de durabilité des matériaux à base cimentaire. Quand la température descend sous le point de congélation, l'eau dans les pores et les capillaires, en se cristallisant, tend à occuper un volume plus important. Cette expansion peut générer des contraintes telles qu'une fissuration peut se développer dans le composite.

En ce qui concerne la résistance au gel et dégel du composite à base cimentaire, les études réalisées semblent démontrer que la présence des G.C., directement ou indirectement par le biais du réseau poreux induit, limite les effets préjudiciables généralement observés. [46]

Garros [46] rapporte les résultats de Savas et al. [56] selon lesquels les bétons contenant 10% et 15% en masse de G.C. dont la dimension est de 2 à 6 mm ont un facteur de durabilité 60% plus élevé que celui du béton normal après 300 cycles de gel-dégel. Dans une autre étude, Benazzouk A [57] confirme que les granulats en caoutchouc améliorent la résistance au gel-dégel des composites cimentaires. Pour illustrer cette conclusion on peut s'appuyer sur l'état des éprouvettes de référence et celui des composites ciment-caoutchouc après 300 cycles de gel-dégel présentés à la Figure III-59.

Pâte de ciment de référence. [57]



Composite ciment-caoutchouc de 40% G.C. [57]

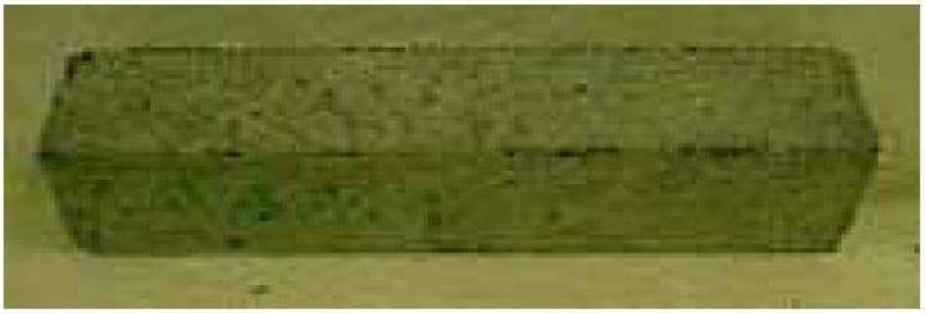


Figure I-59: Effet des G.C. sur la résistance au gel-dégel des matériaux à base cimentaire : état des éprouvettes après 300 cycles de gel-dégel, Benazzouk A [**57].**

I.5- CONCLUSION :

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la bio physicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Suivre les conclusions peut être fait baser sur les études effectuées par divers chercheurs :

1- les déchets caoutchoucs peuvent être employés pour remplacer certaine quantité de sable dans un béton. Ceci contribue à réduire le poids spécifique du béton. C'est utile dans les applications exigeant le béton léger non roulement, tel que les panneaux utilisés dans les façades.

2. Les déchets caoutchoucs présentent une meilleure résistance au cycle gel dégel, et au feu.

3. l'effet du rapport d'eau-ciment du développement de résistance n'est pas en avant dans le cas du béton en caoutchoucs. C'est en raison du fait que les déchets en caoutchoucs réduisent le lien force de béton. Par conséquent, l'échec du béton se produit en raison de l'échec du lien entre la pâte de ciment et les déchets de caoutchouc.

4-utilisation de déchets en caoutchouc aidés en gardant le refroidisseur intérieur, quand l'extérieur. La température est augmentée, par rapport au béton correspondant de commande.

Table of Contents

I.1 VALORISATION ET RECYCLAGE DES DECHETS DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL : 2
I.1.1 Introduction 2
I.1.2 Valorisation et recyclage des déchets dans le domaine de génie civil :.....2
I.2 L'ACTIVITE DU RECYCLAGE DES DECHETS EN CONSTRUCTION.....6
I.2.1Recyclage des déchets.....6
I.2.2 Type de recyclage 7
I.2.3 Impacts du recyclage sur l'environnement.....7
I.3 CAOUCHOUC ET DECHETS DE CAOUCHOUC :.....8
I.3.1.5 Les type de caoutchouc 15
I.3.2 les déchets de caoutchouc.....21
I.4 LE BETON DE SABLE ET LES BETON A BASE DE DECHETS DE CAOUTCOUC :.....23
I.4.1 Le béton de sable 23
I.4.2 les bétons à base de déchets de caoutchouc.....67
I.5- CONCLUSION :.....82

CHAPITRE II

MATERIAUX ET ESSAIS

II.1- Introduction

La connaissance de comportement rhéologique et mécanique des matériaux et leurs diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, permet de faire un choix répondant à leur destination. Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes. Ainsi, pour évaluer ces propriétés, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

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

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Les sables

Quatre types de sable sont utilisés et sont comme suit :

a) Sable de TAMENRASSET

Le premier sable utilisé provient de la région de TAMENRASSET, situé à l'extrême sud du pays, à plus de 2000 Km de la capitale Alger. Ce sable est considérer comme sable de dune.

b) Sable de BAHBAH

Le deuxième sable utilisé est un sable roulé provient de la région de HASSI BAHBAH située au nord de la wilaya à 50 km de Djelfa et 250 km au sud d'Alger.

c) Sable de BOUGHEZOUL

Un autre sable roulé est utilisé dans cette étude provient de BOUGHEZOUL de la région de MEDEA, située à 170 km au sud d'Alger.

d) Sable de concassage

Le troisième sable utilisé est un sable concassé provient de la région de BOUIRA, située à 90 km au sud d'Alger.

La Figure II.1 suivante donne un aperçu général sur la nature des sables utilisées. Les propriétés de tous les sables sont représentées dans le tableau II.1 et l'analyse granulométrique est présentée sur la figure II-2



Figure II-1: L'aspect général des sables utilisées

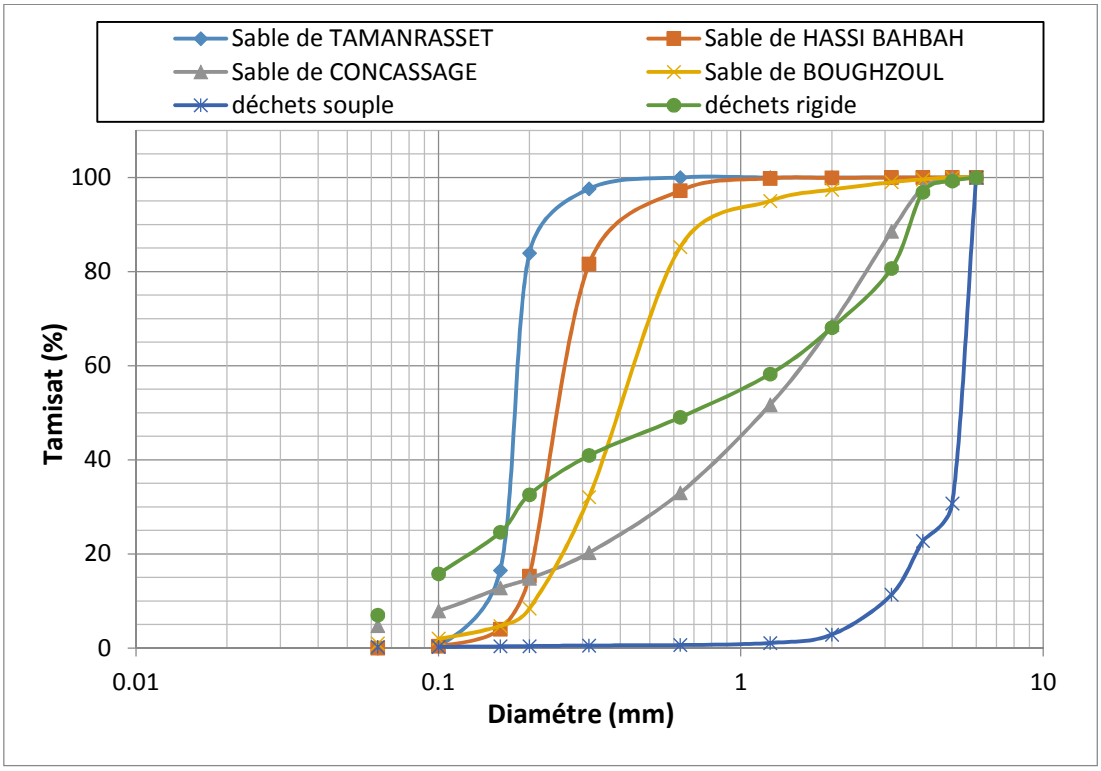


Figure II-2: Courbe granulométrique des sables et des déchets utilisés

Tableau II-1 : Caractéristiques physiques des sables.

caractéristiques	Sable de TAMENRASSET	Sable de BAHBAH	Sable de BOUGHEZOUL	Sable de Concassage	Normes
Module de finesse	0.84	1.16	1.86	3.14	NF EN 933-1 [85]
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	1.40	2.58	2.55	2.66	NF EN 1097-6 [86]
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	2.66	1.4	1.49	1.40	NF EN 1097-3 [87]
Equivalent de sable (%)	80.50	65.00	62.5	75.00	NF EN 933-8 [88]
Taux d'absorption d'eau (%)	0.350	0.01	0.015	0.2	NF EN 1097-6 [89]

II.2.2 Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, produit par la cimenterie de CHLEF qui présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442 [58], et à la norme NF P 15-301 [59].

Le ciment de CHLEF est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al^2O_3) et le fer (Fe^2O_3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. Le tableau II-2 résume la composition chimique et le tableau II-3 représente la composition minéralogique du ciment utilisé.

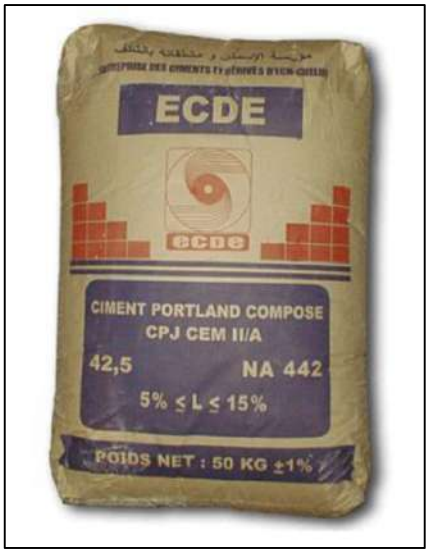


Figure II-3: Le ciment utilisé [94]

Masse volumique absolue = 3.1 g/cm^3 [94]

Tableau II-2 : La composition chimique du ciment utilisé [94]

Teneurs (%)	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaO libre	Gypse	Phase d'ajout
Valeurs	57	18	11	8	1	5	12

La composition minéralogique du ciment utilisé calculée au moyen d'un essai DRX est représentée sur la figure II-4 suivante :

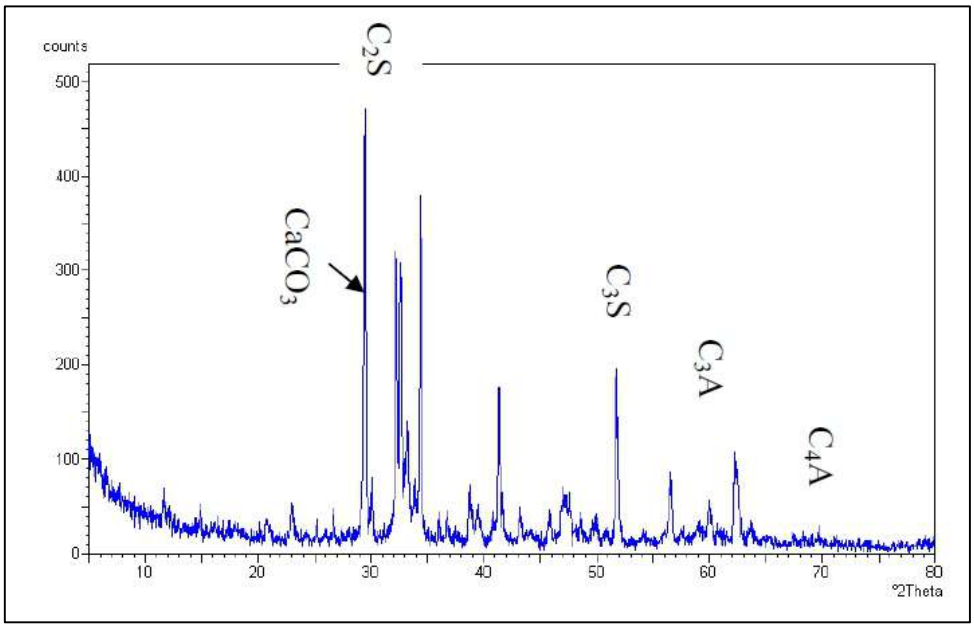


Figure II-4: Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/A 42.5 CHLEF.

Le tableau II-3 représente les Caractéristiques physicomécaniques du ciment utilisé

Tableau II-3 : Caractéristiques physicomécaniques du ciment utilisé [94]

Les essais	Valeurs Mesurées	Norme NA 442
Surface spécifique du Blaine (Cm^2/g)	3080	-
Consistance (%)	24.15	-
Début de Prise (h, mn)	02 :34	≥60 mm
Compression 02 Jours (MPa)	15.15	≥12.5
Compression 28 Jours (MPa)	46.43	≥42.5
Flexion 02 Jours (MPa)	2.97	-
Flexion 28 Jours (MPa)	6.26	-
Expansion à chaud sur pate (mm)	2.12	≤10 mm

II.2.3 Déchets de semelles des chaussures

Deux types de déchets de caoutchouc sont incorporé dans la masse du béton de sable, obtenus par le recyclage des semelles de chaussures usagées rejetées dans la nature, après avoir étaient collectés, sont lavées, compressées, broyées et extrudés sous forme des grains souples et rigides, puis ajoutés dans la masse du béton de sable par rapport à la masse du ciment avec des pourcentages de (10% ,20% ,30% et 40%).

A. Déchets de semelles des chaussures rigides :

Ce sont des déchets obtenus par le recyclage des semelles dures (Fig. II-5), ils sont caractérisés par la forme des grains non compressibles:



Figure II-5:La forme des déchets de caoutchoucs rigides utilisés [91]

B. Déchets de semelles des chaussures souples

Ce sont des déchets obtenus par le recyclage des semelles souples (Fig. II-6), ils sont caractérisés aussi par la forme des grains compressibles :

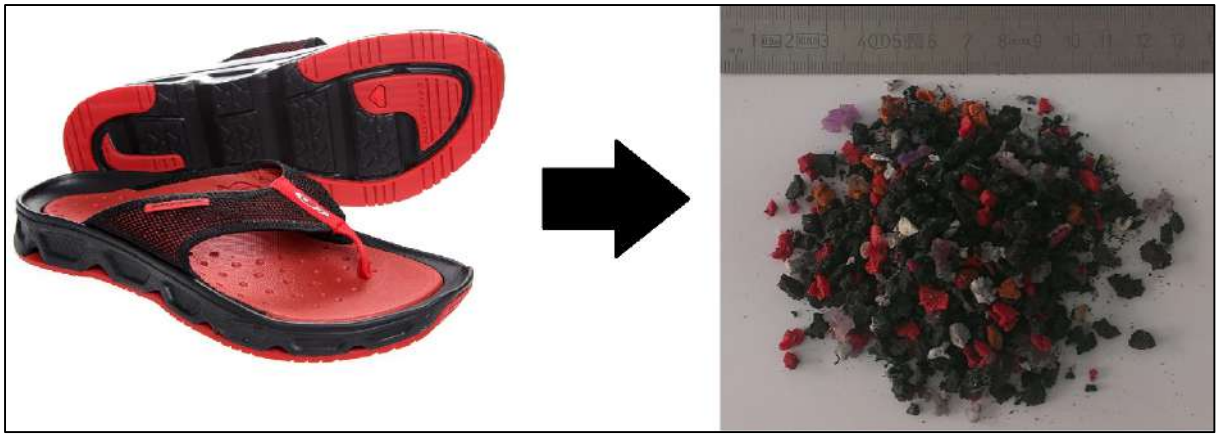


Figure II-6: La forme des déchets de caoutchoucs souple utilisés [91].

Le Tableau II-3 résume les différentes caractéristiques des déchets de caoutchoucs utilisés :

Tableau II-4 : Caractéristiques des déchets de caoutchouc utilisées

Caractéristiques	Déchets de semelle souple	Déchets de semelle rigide
La masse volumique absolue (Kg/m^3)	1.09	1.28
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	0.442	0.556
La porosité (%)	40.55	43.44
La compacité (%)	59.45	56.56

II.2.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection du béton est celle du robinet de laboratoire de génie civil de l'université de MEDEA. Associé au ciment, l'eau remplit deux fonctions : D'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

II.2.5 adjuvant «plastifiant »

L'adjuvant utilisé est un plastifiant réducteur d'eau fabriqué par la société, Algérienne GRANITEX commercialisé sous l'appellation '**MEDAFLUID 104'** (Fig. II-7) de forme liquide de couleur marron, d'un PH égal à 6, de densité 1,04 ± 0,01 et d'une teneur en chlore < 1g/L [96].



Figure II-7: adjuvant utilisé « MEDAFLUID 104 »

II.2.6 Filler calcaire

Les fillers utilisées dans notre cas sont de nature calcaire. Ils sont obtenus par le broyage de roche calcaire (Fig. II-8). Leur caractéristique physique est mentionnée dans le tableau II-5 et l'analyse chimiques dans le tableau II-6.

Tableau II-5 : caractéristiques physiques des fillers calcaire utilisées

Caractéristiques	**Valeurs**
Densité apparente (Kg/m^3)	1.14
Densité absolue (Kg/ m^3)	2.66
Surface spécifique du Blaine (Cm^2/g)	2423

Tableau II-6 : L'analyse chimique des fillers calcaire utilisées

$CaCO_3$	Fe_2O_3	$CaSO_4$	SO_3	% Insoluble
97.50	00.74	00.67	00.83	00.59

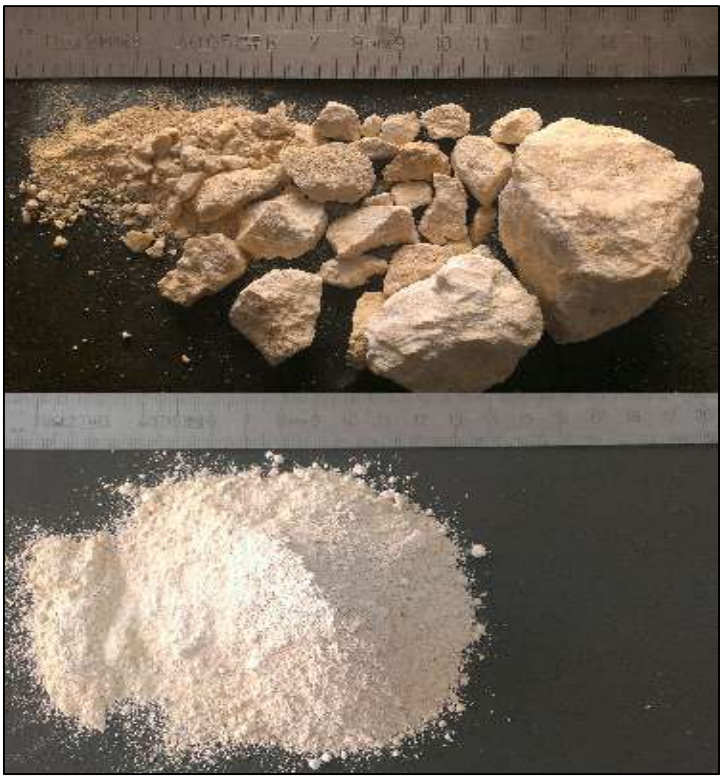


Figure II-8: La Roche calcaire broyée.

II.3 Mode opératoire

Le malaxage des bétons au laboratoire a été effectué dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 56 L pour confection des éprouvettes de 16X32, et à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 L pour la confection des éprouvettes de 4X4X16. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés. La même procédure de gâchage a été utilisée pour toutes les séries de béton :

1. Introduction du sable et du ciment plus calcaire et les déchets de semelles ; puis un malaxage à sec pendant 1 minute.
2. Ajout de 2/3 de l'eau de gâchage puis un malaxage pendant 2 minutes
3. Continuer à malaxer en introduisant le plastifiant avec le tiers de la quantité d'eau nécessaire jusqu'à 5 min
4. Mesurer (l'affaissement / maniabilité) du béton frais immédiatement au fin malaxage



Figure II-10: Le malaxage des bétons au laboratoire

II.4 Composition des mélanges

La composition du béton de sable pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode expérimentale de projet de SABLOCRETE 1994 [65]. Les déférents types de déchet de caoutchouc (souple et rigide) sont incorporés dans la masse du béton de sable par ajout par rapport à la masse du ciment avec de pourcentage de 10% ,20%,30% et 40%. Quatre familles de béton de sable sont réalisées et répertoriés comme suit:

BSTT : béton de sable de Tamenrasset témoin.

BSSS : béton de sable de Tamenrasset à base de déchets souple.

BSSR : béton de sable de Tamenrasset à base de déchets rigide.

BSBHT : béton de sable de Bahbah témoin.

BSBHS : béton de sable de Bahbah à base de déchets souple.

BSBHR : béton de sable de Bahbah à base de déchets rigide.

BSBGT : béton de sable de Boughezoul témoin.

BSBGS : béton de sable de Boughezoul à base de déchets souple.

BSBGR : béton de sable de Boughezoul à base de déchets rigide.

BSCT : béton de sable concassé témoin.

BSCS : béton de sable concassé à base de déchets souple.

BSCR : béton de sable concassé à base de déchets rigide.

La composition de chaque mélange et pour chaque série est codifiée et mentionné dans le tableau II-7 suivant :

Tableau II-7 : compositions des mélanges réalisé (pour 1 m³)

Sable de TAMENRASSET									
		BSTR				BSTS			
	BST	10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
Déchets (kg/ m³)	0	35	70	105	140	35	70	105	140
Plastifiant (%)*	1	0.9	0.9	0.85	0.8	0.95	0.9	0.8	0.8
Ciment (Kg/m³)	350								
Sable (Kg/m³)	1200								
Filler calcaire (Kg/m³)	250								
Eau (l/m³)	297.5								
Sable de BAHBAH									
		BSBHR				BSBHS			
	BST	10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
Déchets (kg/ m³)	0	35	70	105	140	35	70	105	140
Plastifiant (%)*	0.9	0.85	0.8	0.75	0.9	0.9	0.85	0.8	0.7
Ciment (Kg/m³)	350								
Sable (Kg/m³)	1360								
Filler calcaire (Kg/m³)	200								
Eau (l/m³)	292								
Sable de BOUGHEZOUL									
		BSBGR				BSBGS			
	BST	10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
Déchets (kg/ m³)	0	35	70	105	140	35	70	105	140
Plastifiant (%)*	1	0.95	0.9	0.9	0.85	0.95	0.9	0.85	0.8
Ciment (Kg/m³)	350								
Sable (Kg/m³)	1400								
Filler calcaire (Kg/m³)	180								
Eau (l/m³)	280								
Sable CONCASSÉ									
		BSCR				BSCS			
	BST	10%	20%	30%	40%	10%	20%	30%	40%
Déchets (kg/ m³)	0	35	70	105	140	35	70	105	140
Plastifiant (%)*	1	0.95	0.9	0.9	0.85	0.95	0.9	0.85	0.8
Ciment (Kg/m³)	350								
Sable (Kg/m³)	1560								
Filler calcaire (Kg/m³)	130								
Eau (l/m³)	297.5								

(* % par rapport à la masse du ciment)

II.5 Confection des éprouvettes

Pour chacun des mélanges, des éprouvettes cylindriques 16x32cm destinées au essai de module d'élasticité, des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm destinées aux essais de traction par flexion et de retrait ainsi que des éprouvettes 4×10×10cm destinées pour les essais

thermiques ont été confectionnées. Les éprouvettes ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibration manuel. Dans notre étude de recherche, nous avons basé sur la confection des bétons dont le nombre de gâchées réalisées s'élève à 200. Avec une gâchée on produit 03 éprouvettes qui seront destinées aux différents essais de caractérisation, d'où le nombre d'éprouvettes atteint 600, autres gâchés ont été destinées au test de la maniabilité afin de déterminer l'affaissement de chaque formulation. Une trentaine compositions a été également confectionnée afin de mieux comprendre le comportement des bétons de sable.

Suite à la mise en place, les éprouvettes ont été recouvertes d'une plaque plastique afin d'éviter toute évaporation d'eau. Ces précautions ont permis aux éprouvettes de subir une première cure de 24 heures. Après 24 heures, toutes les éprouvettes ont été démoulées et placées dans des bacs remplis d'eau dont la température est de 20°C jusqu'au jour de l'essai, par contre les éprouvettes de test de retrait ont été démoulées et conservées dans une salle conditionnée à 50% d'humidité et 20°C. La cure est un processus de maintien d'une humidité satisfaisante et d'une température favorable dans le béton, durant la période d'hydratation du ciment. Cette procédure a été suivie pour toutes les compositions et pour tous les essais.

II.6 Essais réalisés

Deux types d'essais réalisés sont :

- les essais à l'état frais pour évaluer la maniabilité.
- les essais à l'état durci pour déterminer les performances mécaniques et la durabilité des bétons de sables réalisées.

II.6.1 Essai réalisé à l'état frais

Les essais de caractérisation sur béton frais sont résumes dans le tableau II-8 Suivant :

Tableau II.8 : Essais sur bétons frais.

Essais	Appareil	Nombre d'essaie
Ouvrabilité	Maniabilimètre	12
Densité	Moule (1L) + balance	12
Air occlus	Aéromètre	12

A. L'Ouvrabilité

A.1 Maniabilité

Elle nous permis d'apprécier la fluidité d'un béton de sable qu'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18 - 452 et NF P 15 -437, [60].

La consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration (Fig II-11).L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre LCL (B).Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (7.5cm x 7.5cm x 15cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibrateur et muni d'une cloison amovible.

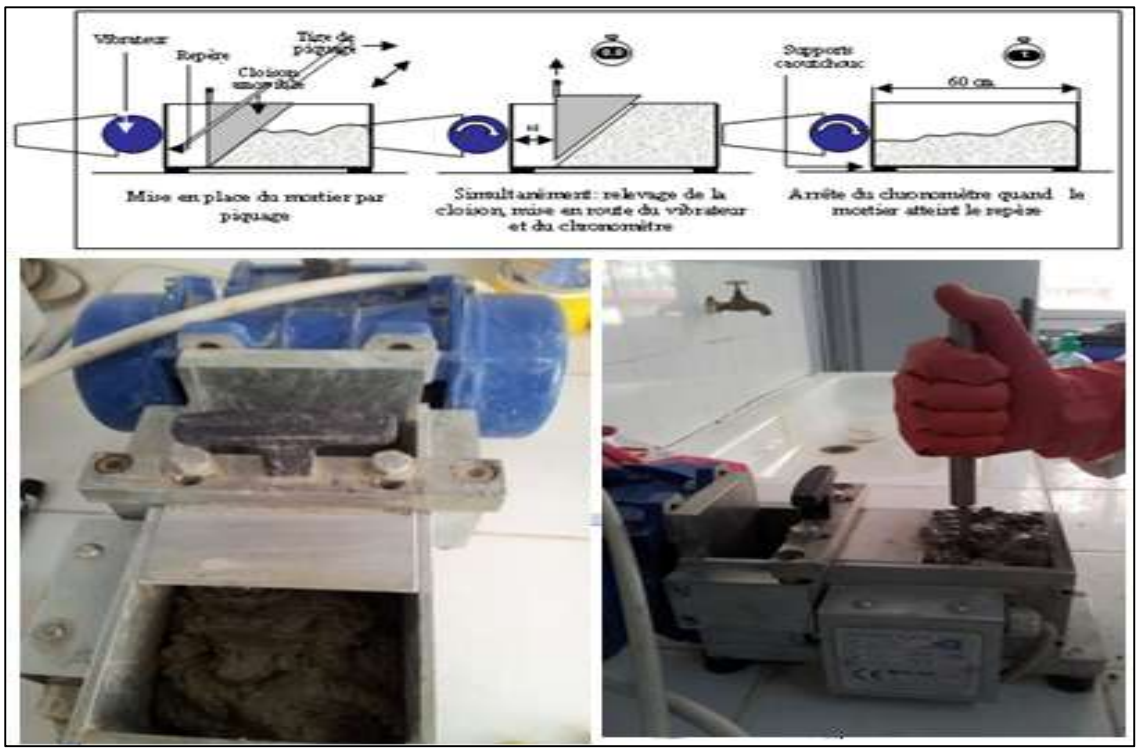


Figure II-11: Mesure de la maniabilité du béton de sable

B.2 L'air occlus :

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton de sable frais, on a utilisé la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton de sable frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1litre (Fig II-12**)** selon la norme française NF EN 12350-7 [61].

On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau l'aide d'un tube dans le premier robinet. Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0 ٪

On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure II-12: L'aéromètre à mortier.

B. La densité

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 [62] NA436 [63].



Figure II-09 : Mesure de la densité du béton de sable.

II.6.2 Essais réalisé à l'état durci

Les essais de caractérisation sur béton frais sont résumes dans le tableau **II-4** Suivant :

Tableau II.9 : Essais sur bétons durcis.

Essais	Appareil	Dimension (cm)
compression	La Presse hydraulique	4x4x16
traction		
module d'élasticité	Cage extensométrique	16x32
Retrait + gonflement	déformètre	4x4x16
Capacité d'absorption d'eau	Essaie d'absorption	demi-prisme d'éprouvette 4x4x16
La porosité	Dessiccateur	
Les propriétés thermiques	CT mètre	4×10×10
La résistance au feu	four à moufle	demi-prisme d'éprouvette 4x4x16

A. La porosité [83]

La porosité accessible à l'eau,ε , exprimé en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_e} \times 100 \quad \text{..... (2.1)}$$

M_a : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

M_s : La masse d'éprouvette sec

M_e : La masse d'éprouvette immergée dans l'eau



Figure II-10: Mesure de la porosité accessible à l'eau

B. Essais de compression

La caractérisation du comportement en compression est effectuée sur des demi-prismes d'éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm mûries à l'eau, conformément à la norme EN 196-1 [64].

Les éprouvettes étudiées sont soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure **II-13**

Si Fc est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_C = \frac{F_C}{b^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.2)$$

R_C: Résistance à la compression en (MPa);

F_C: Charge de rupture en (N);

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

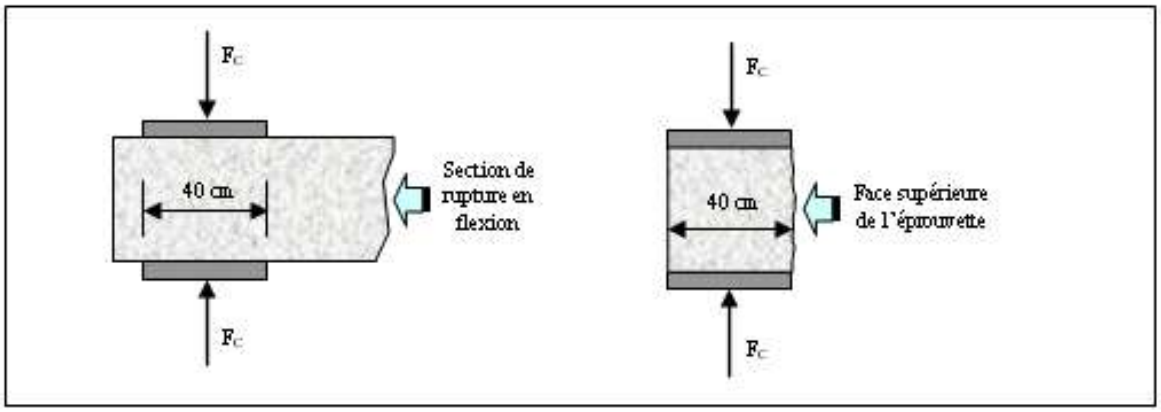


Figure II-11: Essais de compression [82]

La valeur de la contrainte prise en compte sera la moyenne des résultats de trois éprouvettes.

C. Essais de traction par flexion EN 196-1 [64] :

Cet essai est exécuté par une machine désignée pour les tests de flexion sur les éprouvettes de béton de sable ou de mortier 4x4x16 cm.

$$R_t = \frac{1.5\, F_f \,.\, L}{b^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2.3)$$

R_t: Résistance à la flexion en (MPa);

F_f: Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N);

L: Longueur qui sépare les deux appuis en (mm);

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

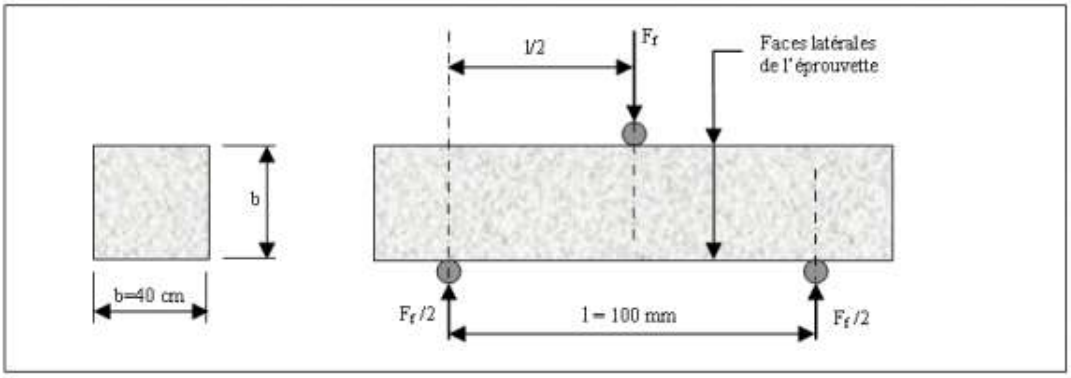


Figure II-12: Essais de traction [82]

D. Le module d'élasticité [84]

Le module élastique est mesure en suivant la norme ISO 1920-10 à l'échéance de 28 jours. Pour cela des éprouvettes 16× 32 cm sont placée dans une cage Figure II-6 permettant de mesurer les déformations longitudinales au cours de chargement.



Figure II-13: Mesure du module d'élasticité en compression

E. Variation dimensionnelle (retrait et gonflement)

d.1 Mesure des variations de longueur [69]

La mesure de retrait et gonflements effectuent sur des éprouvettes prismatiques de dimension 4X4X16 cm^3, selon la norme NFP 15-433. Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans le déformètre, qui permet le suivi de la variation de longueur de l'échantillon. Le retrait et le gonflement de chaque béton sont mesurés du 1j jusqu'à 300j La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C.



Figure II-14 La mesure à l'aide de retractomètre

d.2 Mesure des variations de masse

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g près l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.



Figure II-15 : Mesure des variations de masse

d.3 Expression des résultats

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

ΔL: Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L_0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

ΔM: Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

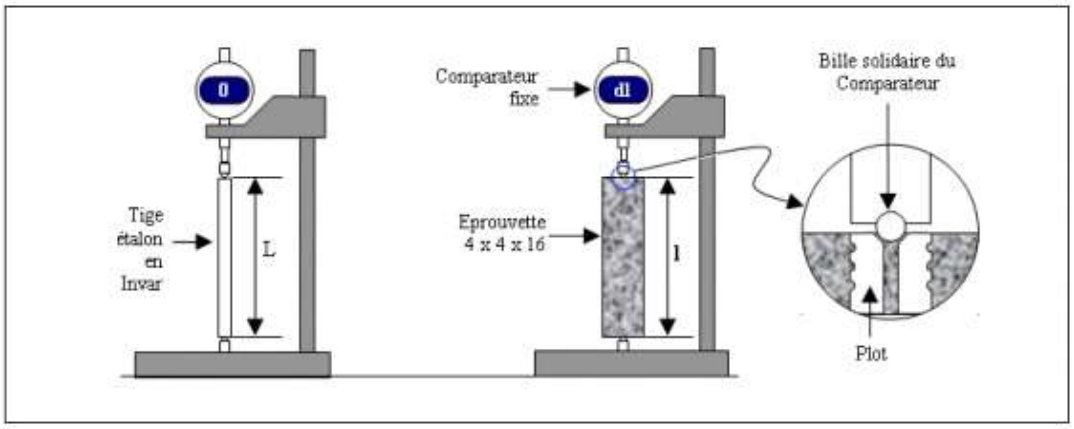


Figure II-16: Mesure de retrait et gonflement [82]

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 280 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t) \quad \text{……..…… (2.4)}$$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad \text{…….(2.5)}$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad \text{……..(2.6)}$$

Δ L (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule.

Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement).

F. Absorption capillaire

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher et on le pesé (m_0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau (Fig. **II.28**), pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (m_i-m_0) (NE 13057) **[67]**.

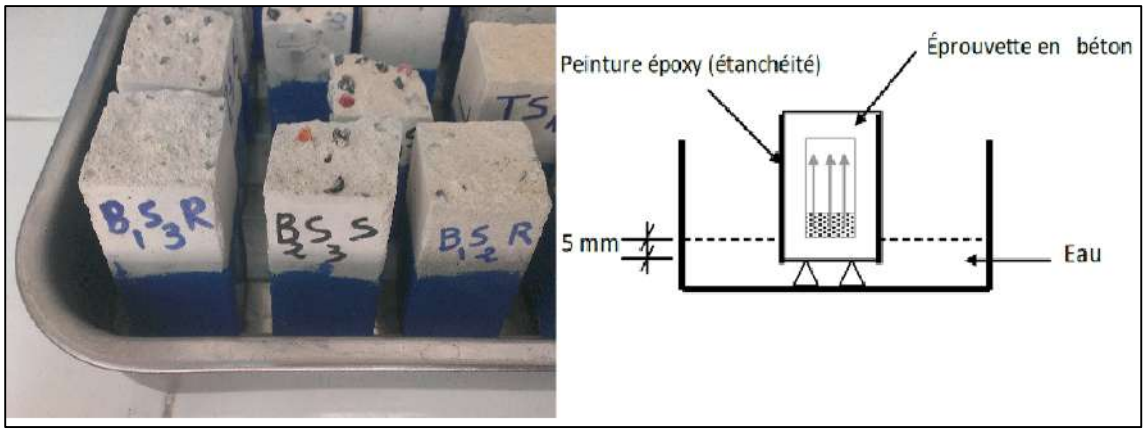


Figure II-17: Absorption d'eau par succion capillaire.

G. Les Propriétés thermiques [92]

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesuré à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme ISO 8497-1 [92]**.**

- **Le CT METRE Norme de référence NF EN 993-15 [71]**

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.



Figure II-18: Le CT-mètre

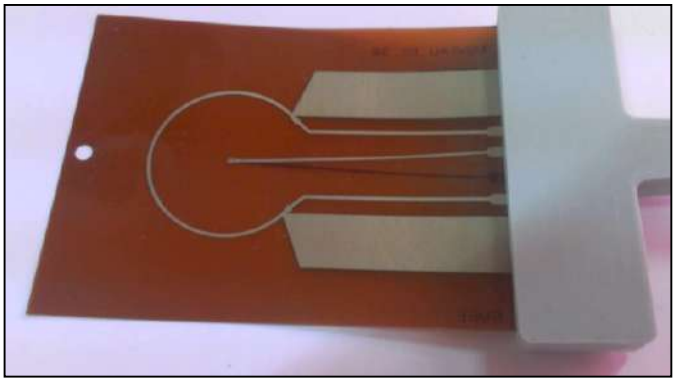


Figure II-19: La sonde

La résistance thermique (R) des éléments est proportionnelle à l'épaisseur (e) et inversement proportionnelle a λ , elle est déterminée suivant la relation :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{..... (2.7)}$$

H. La résistance au feu [93]

Les demis prismes d'éprouvettes 4×4×16cm sont préalablement préparées pour le traitement thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant 6 jours puis étuvées à 105°C pendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle (figure 4) à différentes températures 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de chauffe égale à 10°C/min [Fig. **II-21]** puis maintenues en température dans le four pendant 1 heure conformément à la norme ISO 834[93]. Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasées. Pour chaque température des mesures de pertes de masse sont effectuées. Le degré de déshydratation [Perte de masse (%)] est évalué par la relation suivante

$$[\text{Perte de masse (\%)}] = [(M_1-M_2)/M_1)] \times 100 \quad \text{(2.8)}$$

Avec M_1, M_2 les masses des éprouvettes avant et après chauffage respectivement

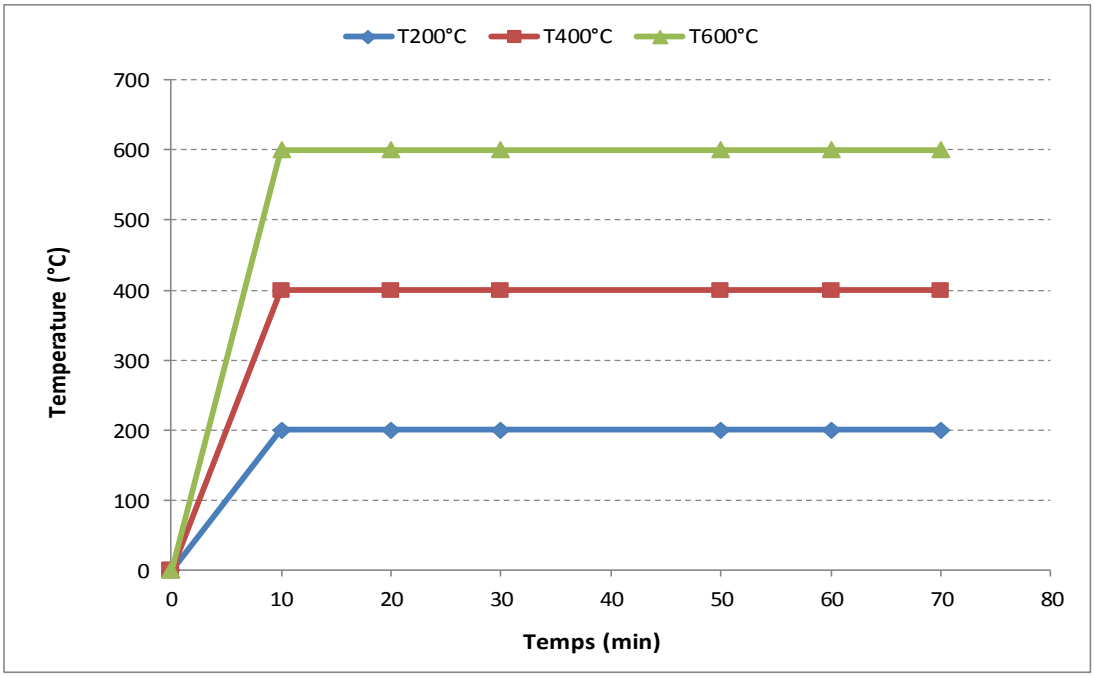


Fig II-20. Courbes de la température-Temps pour des expositions thermiques T200, T400, T600 °C.



Figure II-21: Echauffement de l'éprouvette par le four a moufle.

II.6.3 Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumés dans la figure **II.32** suivante :

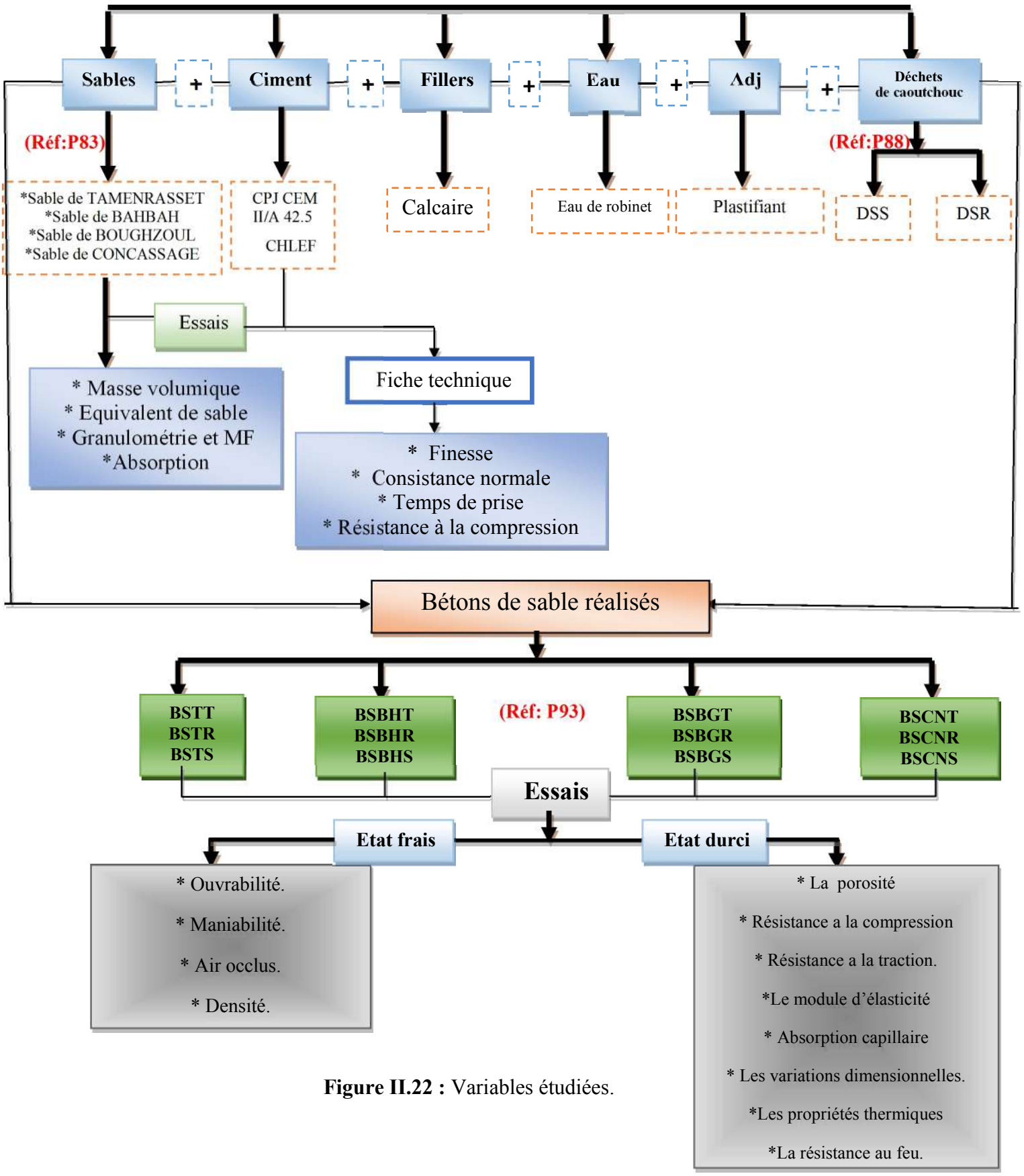


Figure II.22 : Variables étudiées.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATION

III.1 Introduction

Les résultats réalisés sur les bétons à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

III.2 Béton frais

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton de sable, on se base souvent sur des essais de la maniabilité dont le résultat est quantifié par la mesure de temps d'écoulement dans le cas du béton de sable.

III.2.1 Maniabilité

La maniabilité des différents bétons de sable est illustrée dans les figures de 3.1 à 3.4 :

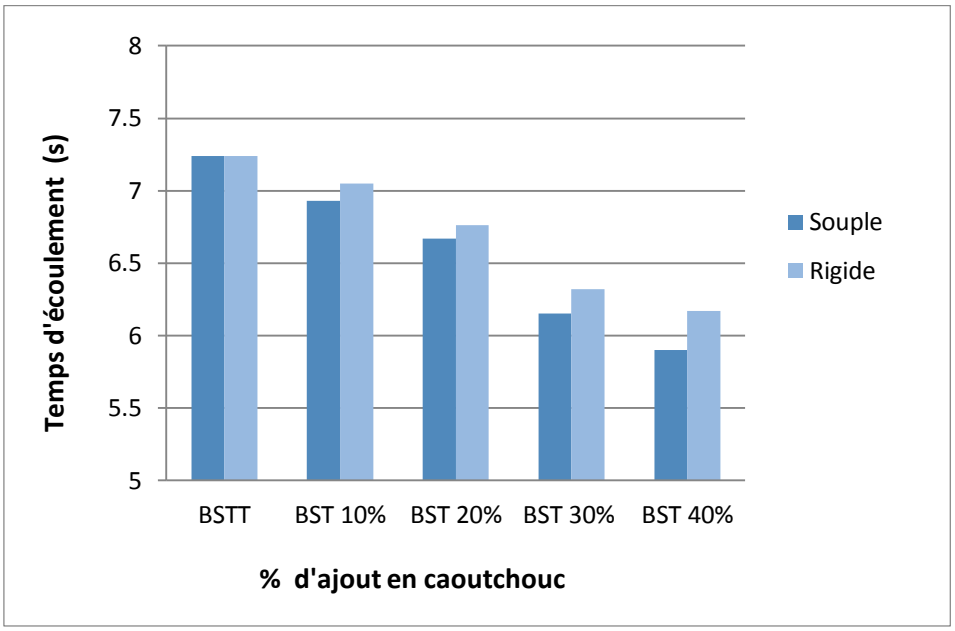


Figure 3.1 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Tamenrasset

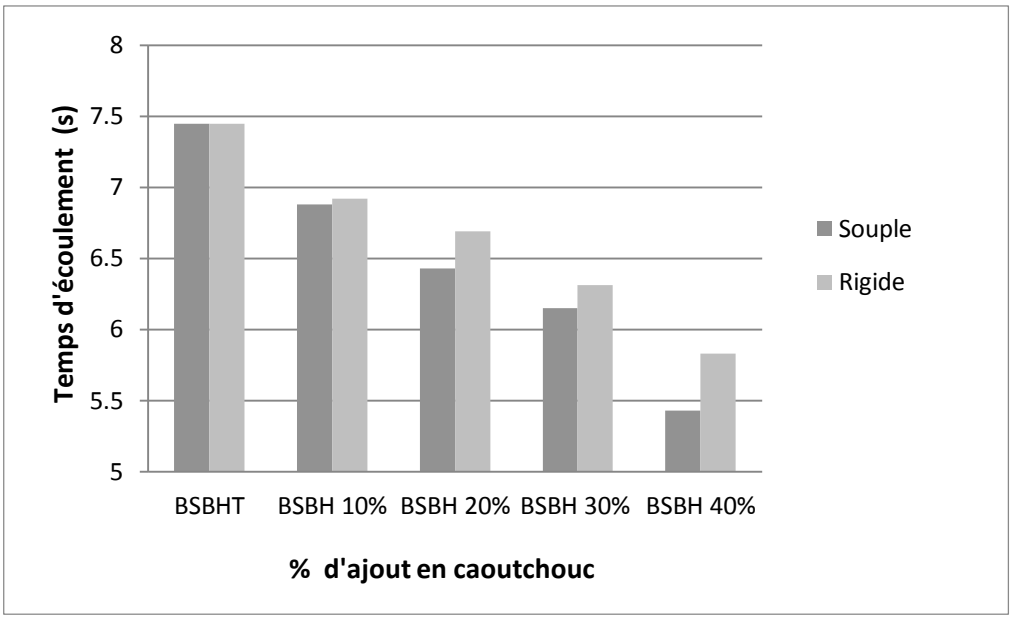


Figure 3.2 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Bahbah

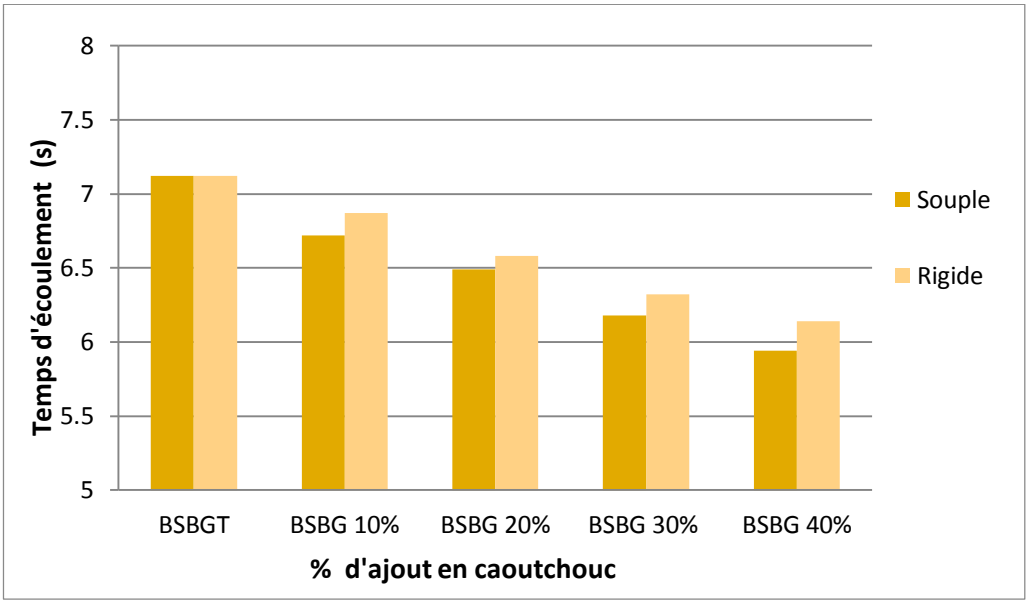


Figure 3.3 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Boughezoul

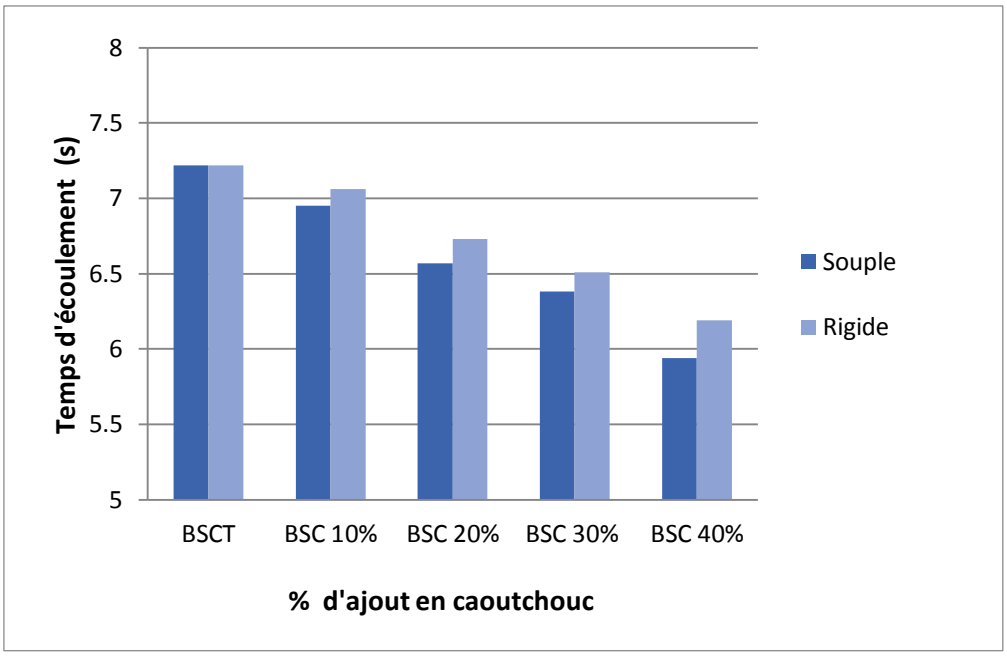


Figure 3.4 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable concassé

D'après les figures ci-dessus on remarque que la maniabilité de tous les types de béton de sable varie en fonction des pourcentages d'ajout de déchets de caoutchouc, et on constate que plus le pourcentage de caoutchouc augmente plus le temps d'écoulement diminué, et cela due à la présence d'eau libre dans le mélange qui contient le déchets de caoutchoucs par ce que le déchets de caoutchouc ne peut pas absorber l'eau pendant le mélange . Ce qui confirme les résultats GUENDOUZ et al [103] qui ont trouvé les même résultats pour un béton de sable à base de déchets plastiques.

On remarque aussi que la maniabilité des bétons à base de déchets de semelles souple et plus grande que la maniabilité des bétons de déchets de semelle rigide.

Pour pouvoir comparé les résultats obtenus à l'état durci on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir une maniabilité constante pour tous les mélanges (un temps d'écoulement entre 7(s) et 9(s)) comme indiques les figures de 3.5 à 3.8 :

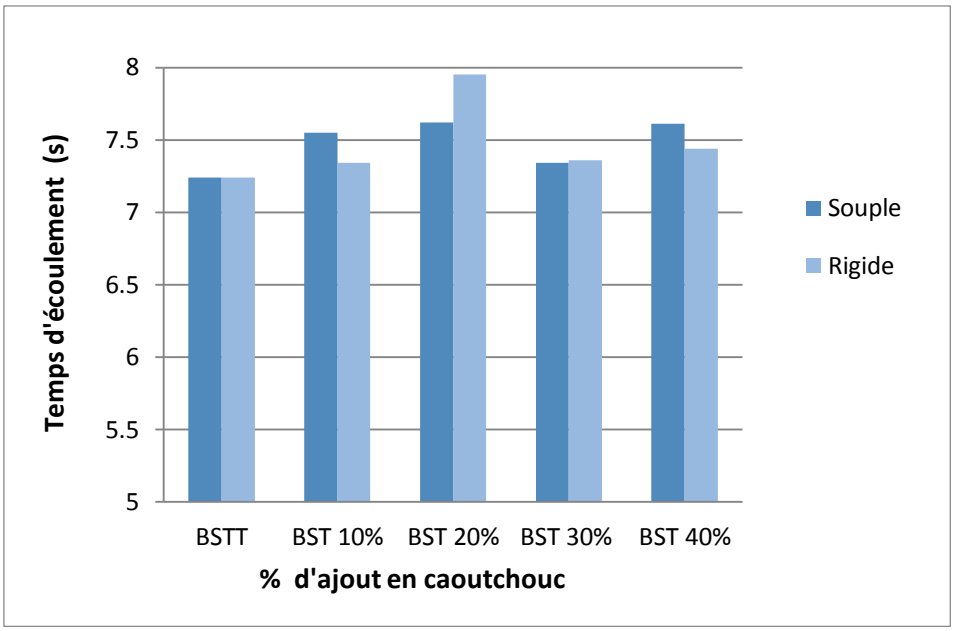


Figure 3.5 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Tamenrasset

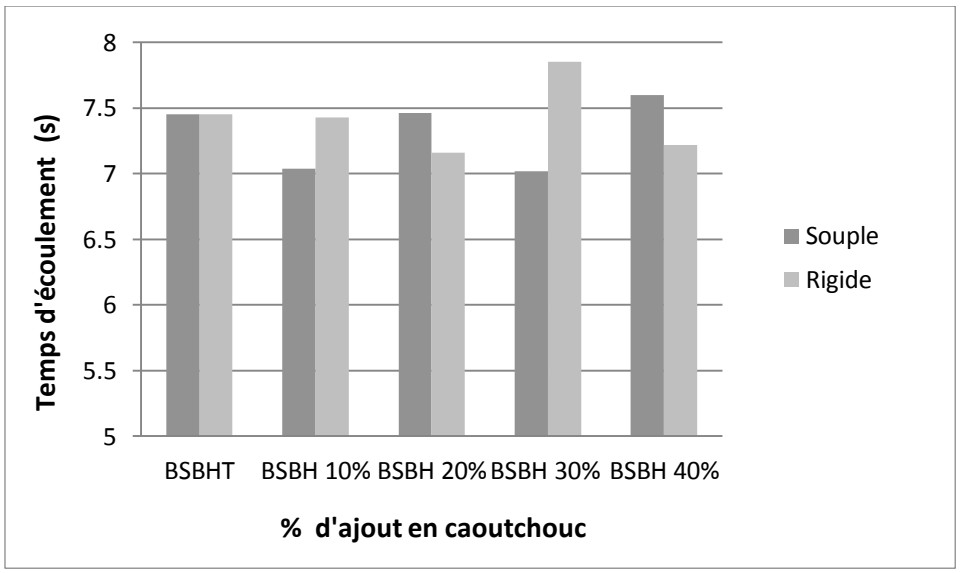


Figure 3.6 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Bahbah

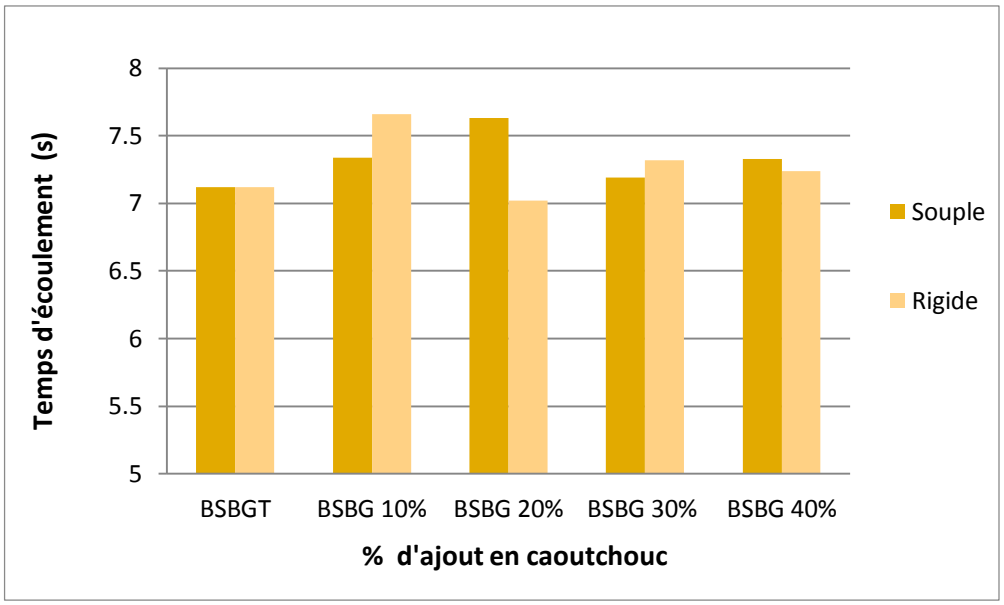


Figure 3.7 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable de Boughezoul.

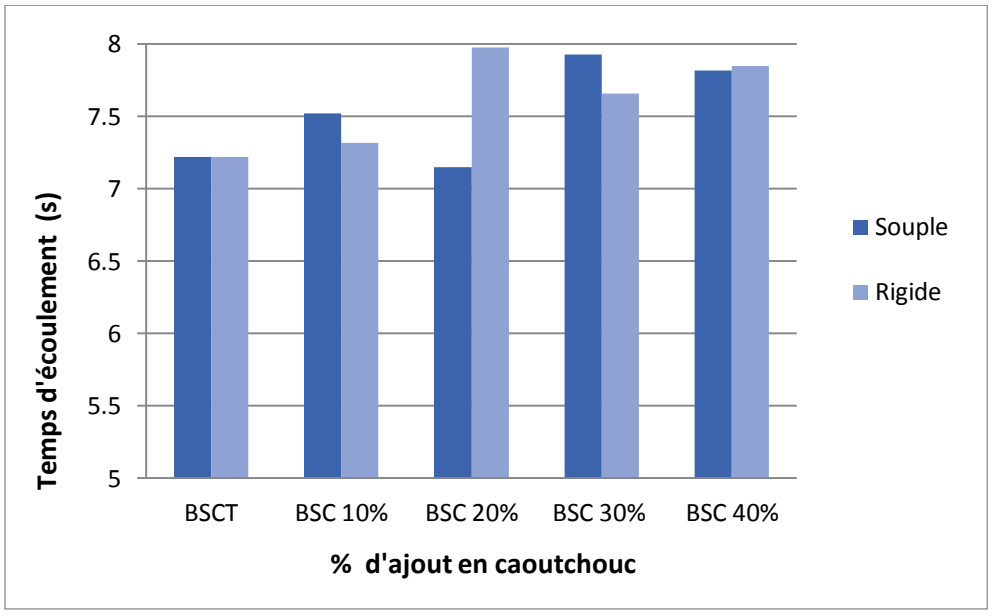


Figure 3.8 : Temps d'écoulement des bétons à base de sable concassé

III.2.2 Air occlus

Les résultats obtenus sont résumés dans les figures de 3.9 à 3.12 suivantes. Ces résultats sont représentés sur un histogramme qui permet de comparer des valeurs d'une catégorie à l'autre.

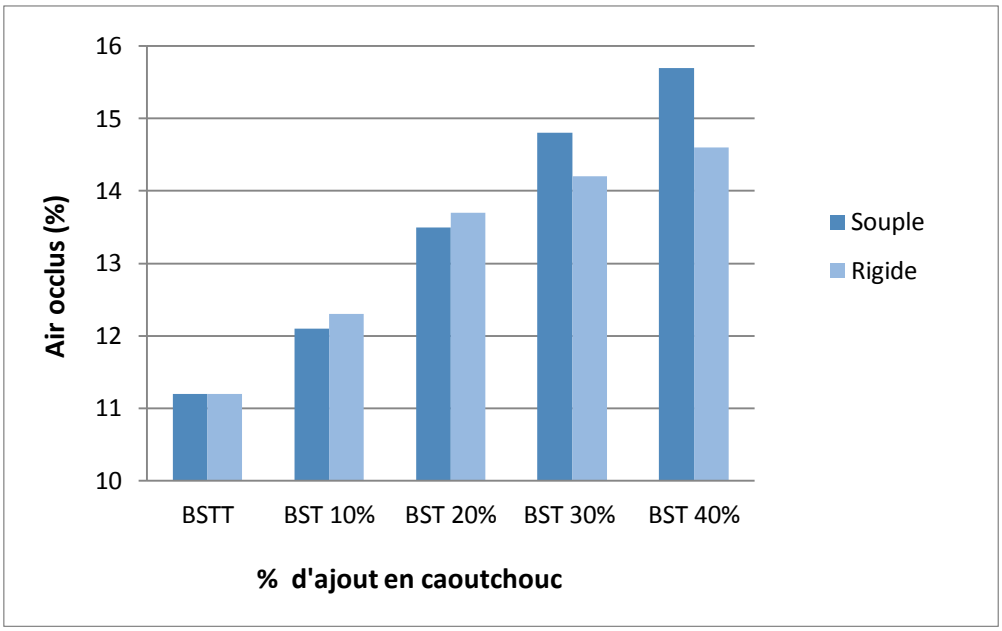


Figure 3.9 : Air occlus des bétons à base de sable de Tamenrasset.

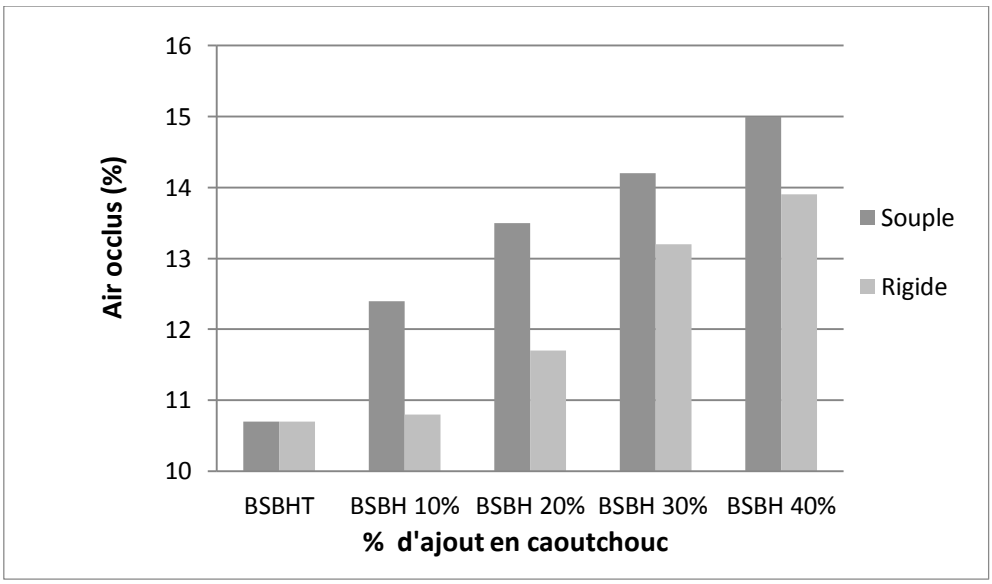


Figure 3.10 : Air occlus des bétons à base de sable de Bahbah

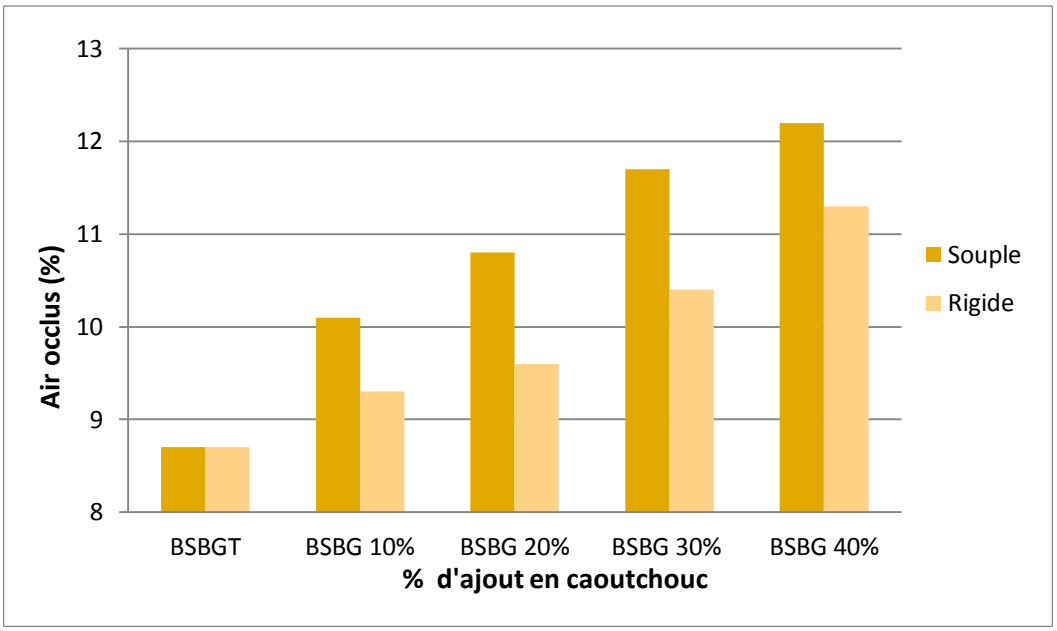


Figure 3.11 : Air occlus des bétons à base de sable de Boughezoul.

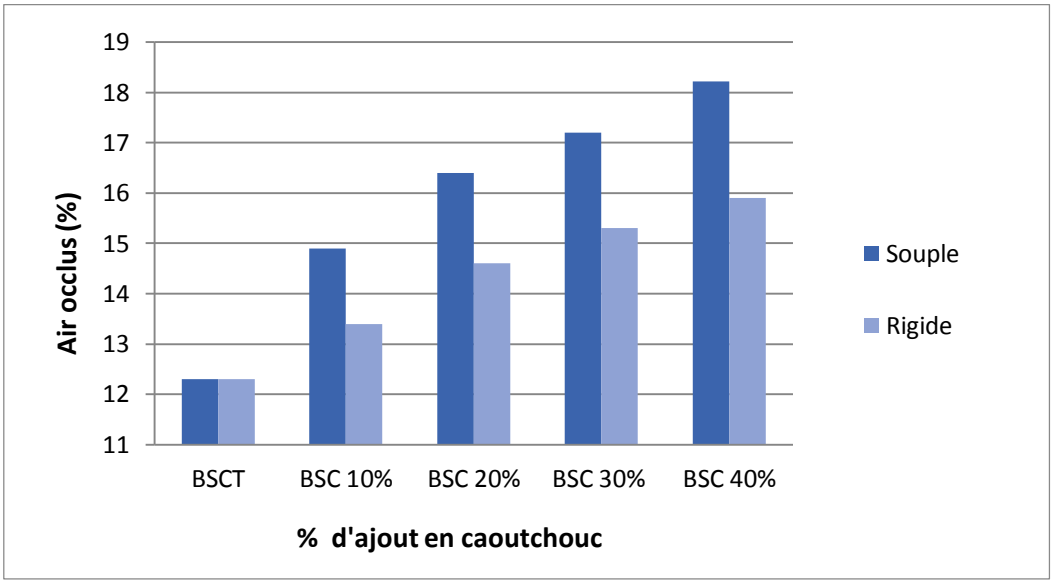


Figure 3.12 : Air occlus des bétons à base de sable concassé

D'après les résultats trouvés on remarque que le volume d'air occlus augmente avec l'accroissement du taux d'incorporation en déchets de semelles (souple et rigide) pour tous les types des bétons de sable, et on remarque aussi que la teneur en air occlus pour les bétons à base de déchets de semelles souple et plus grande que la teneur en air pour les bétons de déchets de semelle rigide. Les résultats obtenus indiquent aussi que la teneur en air occlus de béton à base de sable de BOUGHEZOUL est faible par rapport aux autres sables. Cette tendance est en grande partie attribuée à la nature hydrophobe du caoutchouc qui fait qu'il emprisonne de l'air

pendant la phase de malaxage. Cela explique que le béton à base de ce type de déchets est moins compact, et par conséquence plus poreux par rapport béton témoin, et que les grains de semelles ont une capacité à piéger de l'air dans la rugosité de leur surface augmentant ainsi significativement le volume d'air dans le béton. Ces résultats est en accordance avec celle de SIDDIQUE et NAIK [104], KHATIB et BAYOMY [105].

L'accroissement de la teneur en air occlus dans le béton à l'état frais est pratiquement synonyme d'une augmentation de la porosité du même béton à l'état durci, en défaveur de la résistance mécanique et, en général, de la durabilité du composite.

III.2.3 La densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les Figures de 3.13 à 3.16 ci-dessous **:**

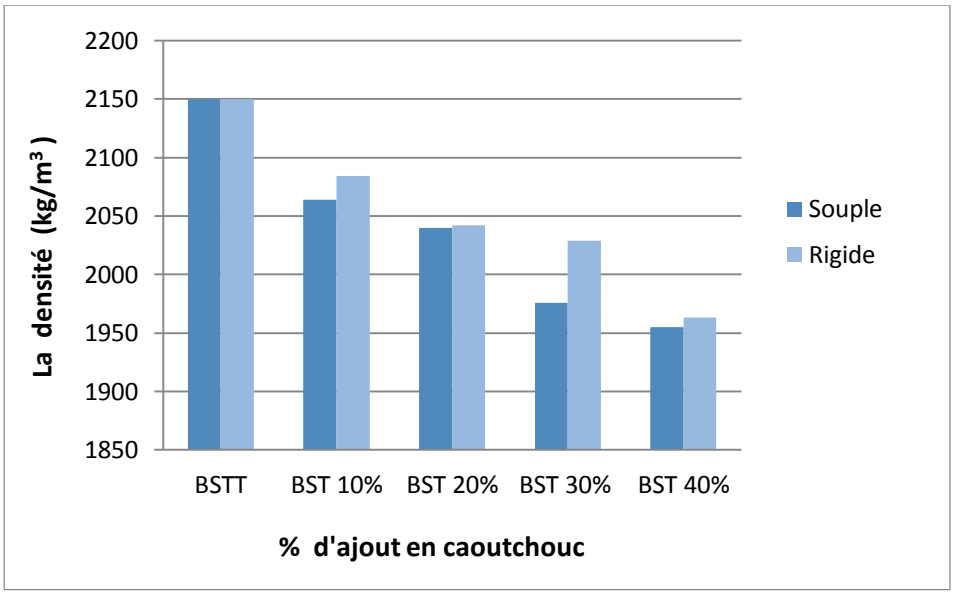


Figure 3.13: La densité des bétons à base de sable de Tamenrasset.

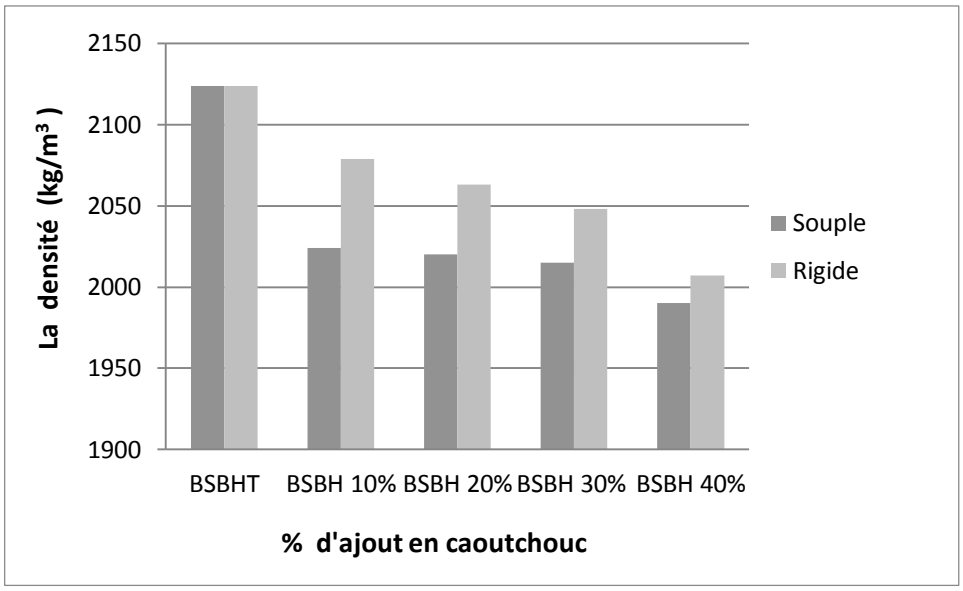


Figure 3.14: La densité des bétons à base de sable de Bahbah

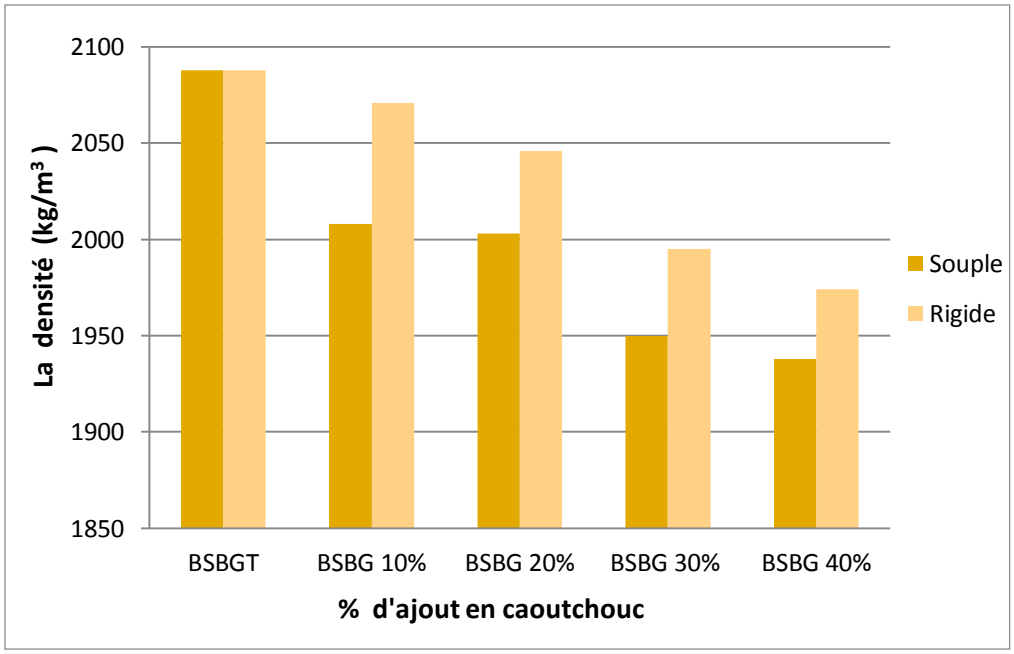


Figure 3.15: La densité des bétons à base de sable de Boughezoul.

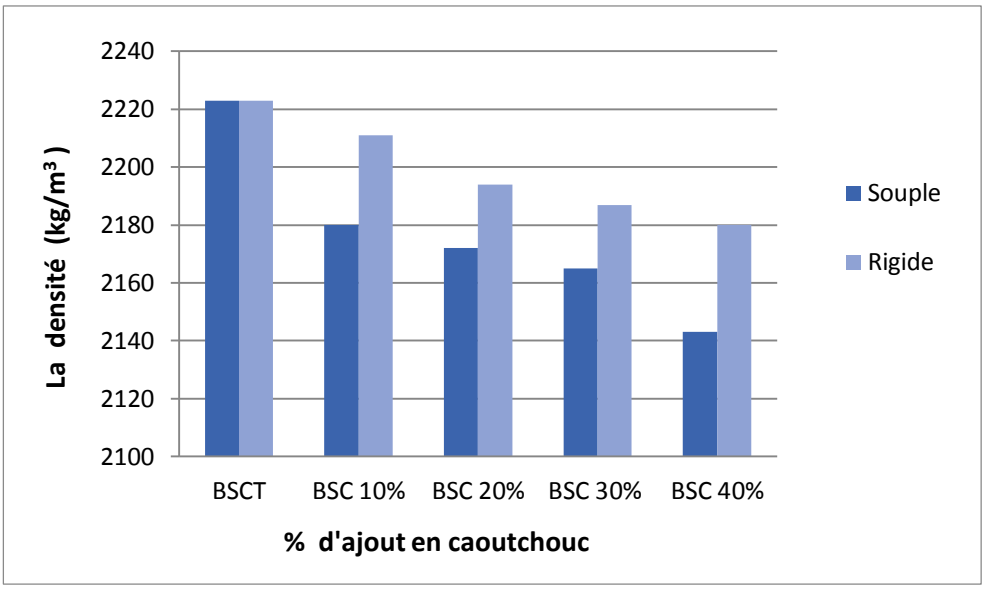


Figure 3.16: La densité des bétons à base de sable concassé.

D'après les figures ci-dessus on remarque que la densité de tous les bétons de sable à base des déchets de semelles est plus faible que la densité du béton de sable de référence. Ce résultat est logique et attendus parce que la densité de déchets de caoutchouc est inférieure à celle du sable. Ce qui confirme les résultats d'autres chercheurs [105] qui ont trouvés que l'addition des déchets de caoutchoucs à la formulation du béton influe négativement sur la densité.

III.3 Béton durci

De la même façon que le béton frais, les résultats des différents essais réalisés sur béton durci sont résumés comme suit :

III.3.1 La porosité

La porosité des différents bétons réalisés est résumée dans les figures de 3.17 à 3.20 suivants :

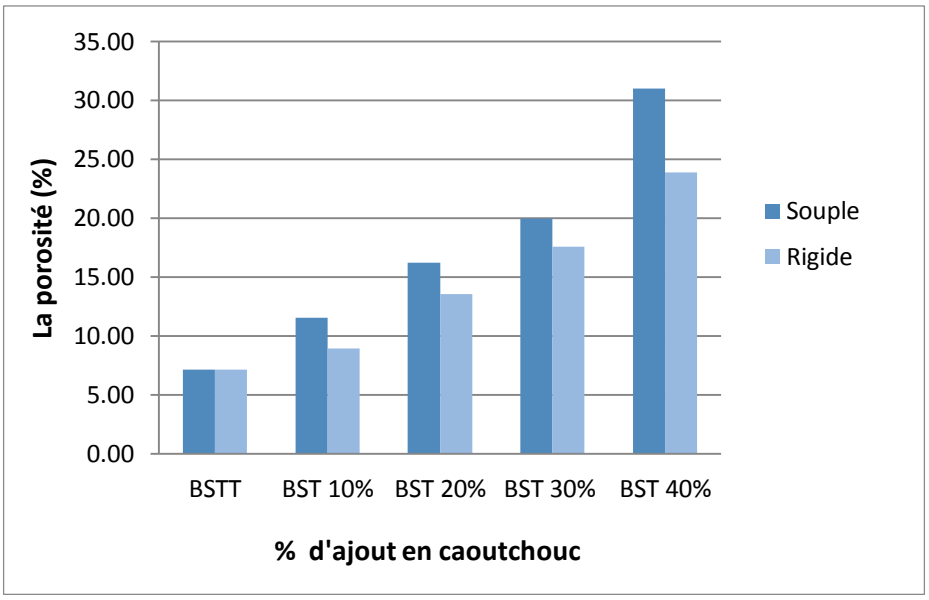


Figure 3.17: La porosité des bétons à base de sable de Tamenrasset.

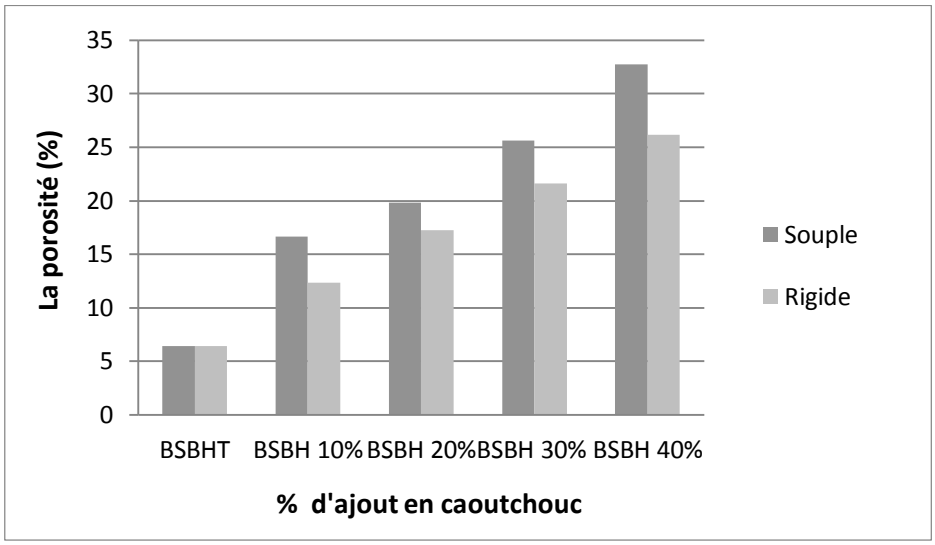


Figure 3.18: La porosité des bétons à base de sable de Bahbah

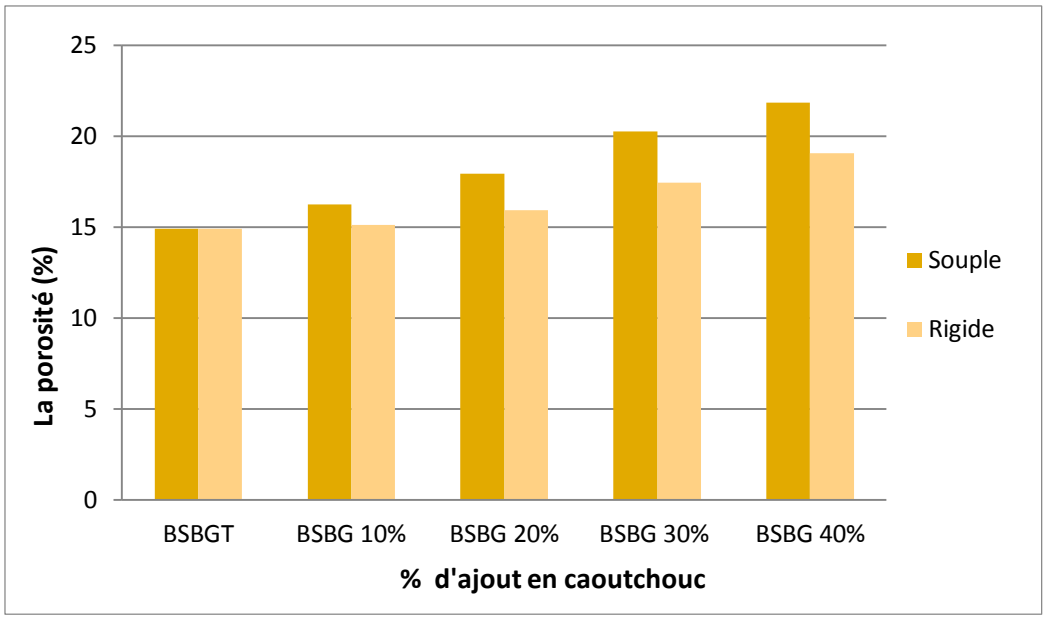


Figure 3.19: La porosité des bétons à base de sable de Boughezoul.

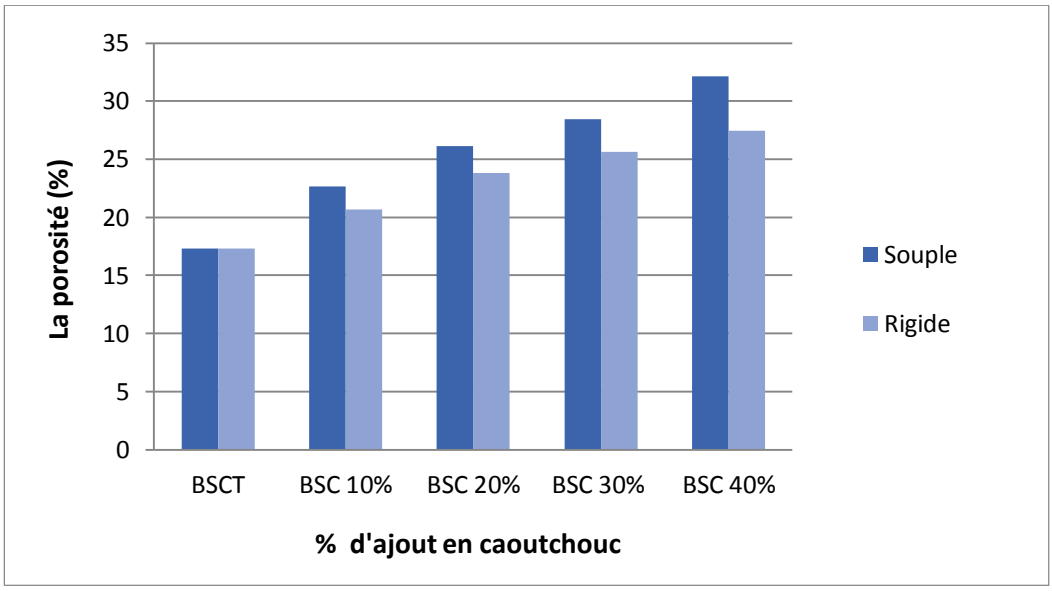


Figure 3.20: La porosité des bétons à base de sable concassé.

D'après les résultats obtenus on remarque que la porosité des bétons de sable à base des déchets de semelles (rigide et souple) est plus élevé que celle du béton de sable de référence à cause de défaut d'adhérence manifeste et une auréole de transition plus étendue entre la matrice cimentaire et les grains de caoutchouc. On remarque aussi que la porosité des bétons de sable à base de déchets de semelles souple et plus grande que celle des bétons de sable de déchets de semelle rigide, on peut dire ici que l'adhérence de déchet de caoutchouc souple et plus faible

que celle de déchet de caoutchouc rigide. Cette constatation est en accord avec les résultats de plusieurs chercheurs [106.107.108], qui affirment que l'incorporation des déchets plastiques dans le mortier soit par ajouts, soit par substitution de sable augmente la porosité d'une façon considérable.

III.3.2 Résistances mécanique

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures prisent sur 27 éprouvettes De 4x4x16 cm à l'âge de 7et 28j avec des dosages en déchets de 10% ,20% ,30 % ,40% pour des bétons réalisé avec des déchets de semelles rigide et souples :(BSDR) (BSDS).

III.3.2.1 Résistances à la compression

Les résultats sont illustrés dans les figures de 3.21 à 3.28 suivantes :

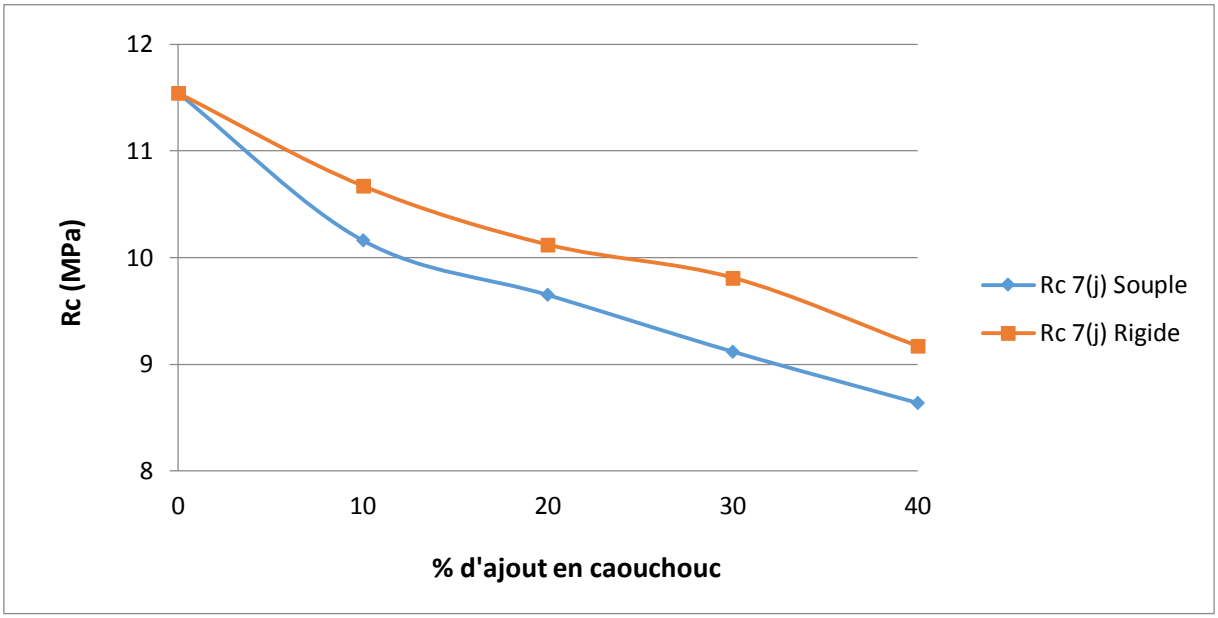


Figure 3.21: Résistance à la compression a 7j des bétons à base de sable de Tamenrasset

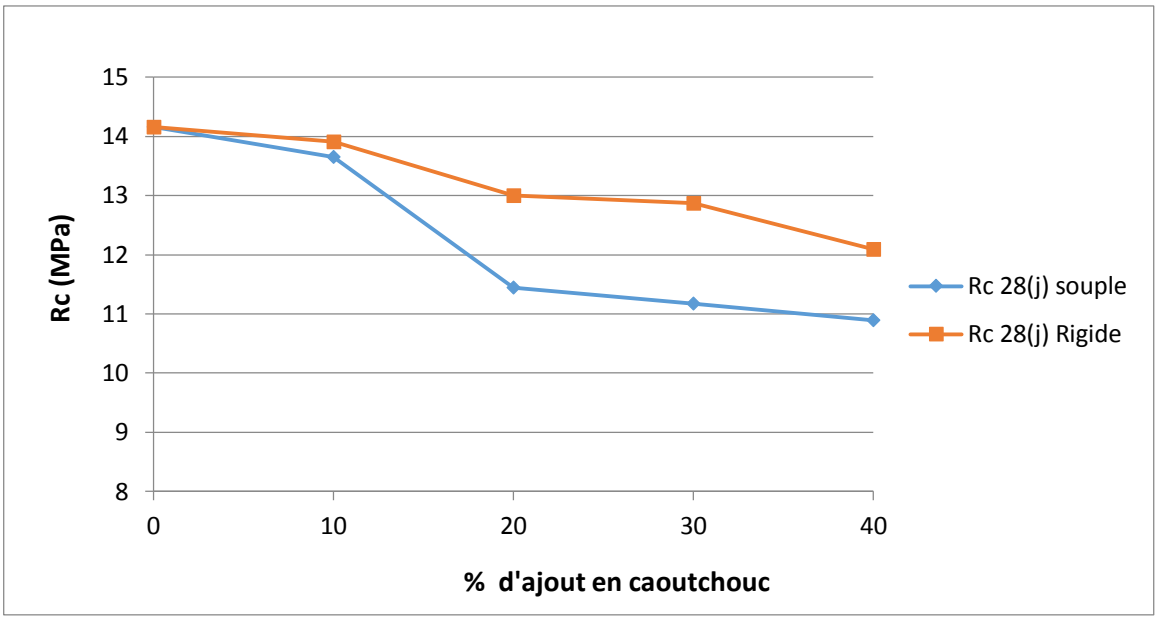


Figure 3.22: Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable de Tamenrasset

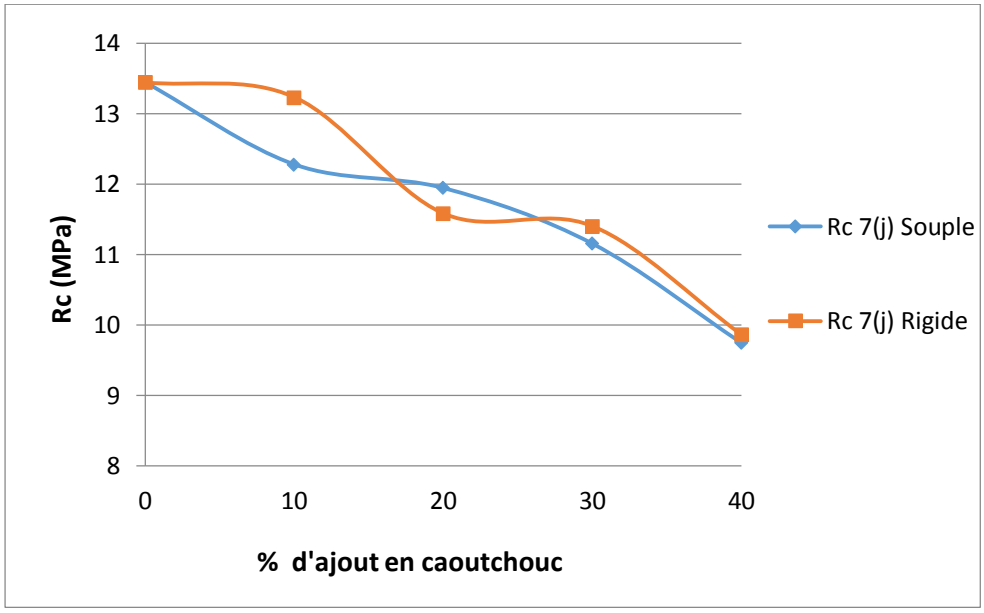


Figure 3.23 : Résistance à la compression a 7j des bétons à base de sable de Bahbah

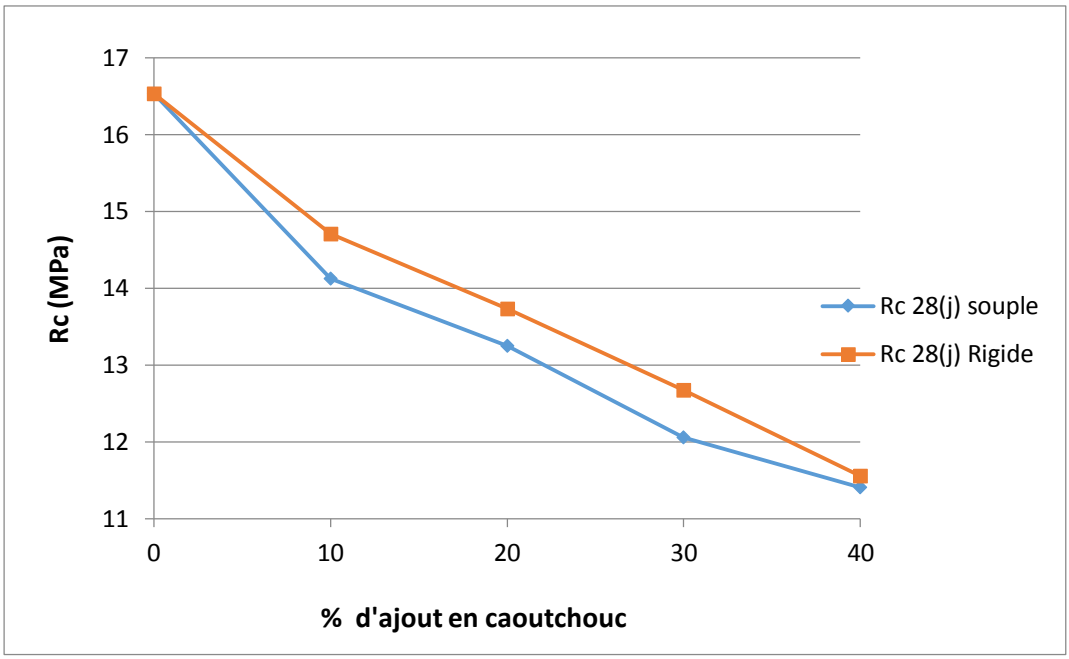


Figure 3.24 : Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable de Bahbah

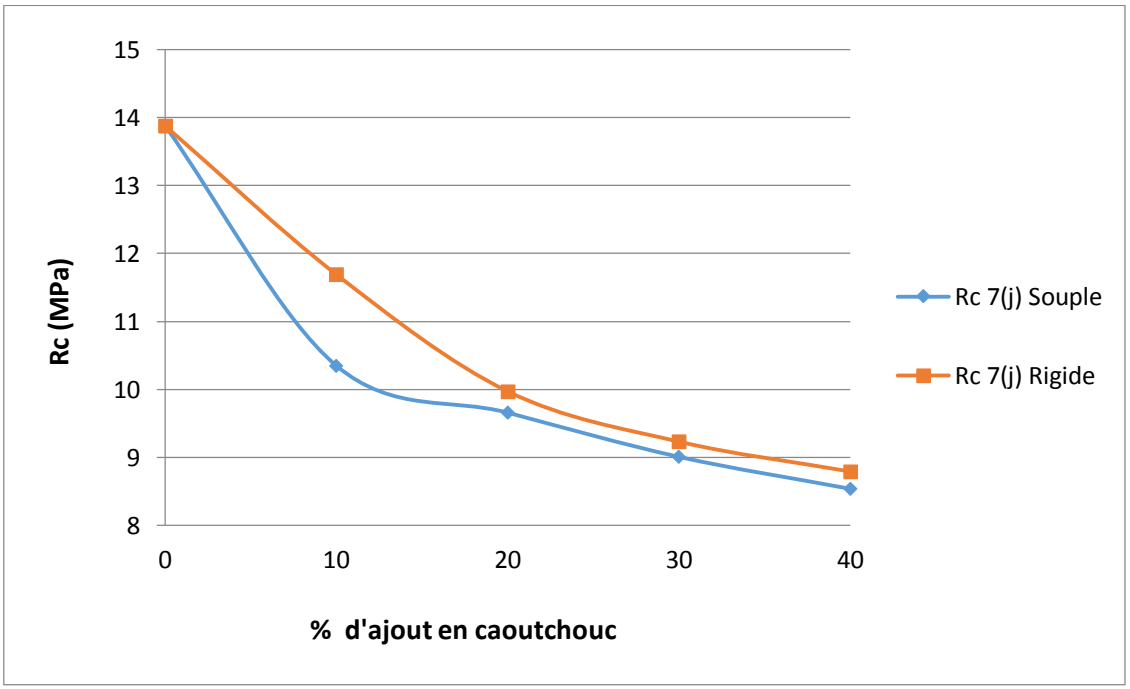


Figure 3.25 : Résistance à la compression a 7j des bétons à base de sable de Boughezoul

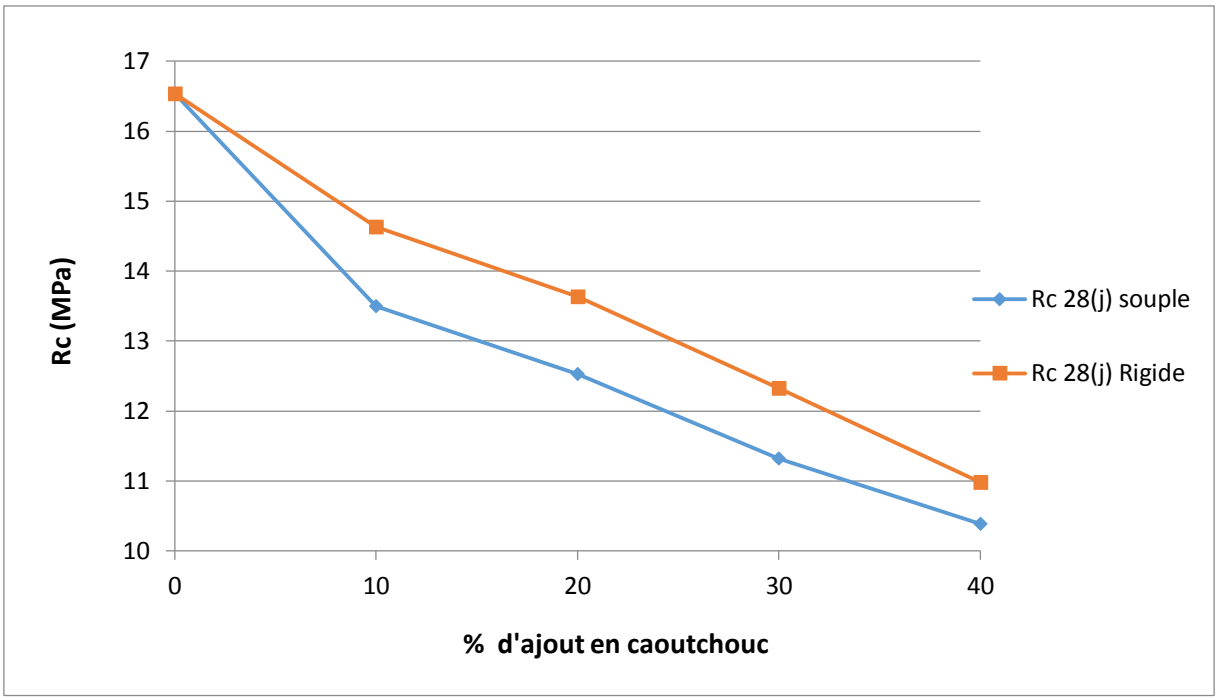


Figure 3.26 : Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable de Boughezoul

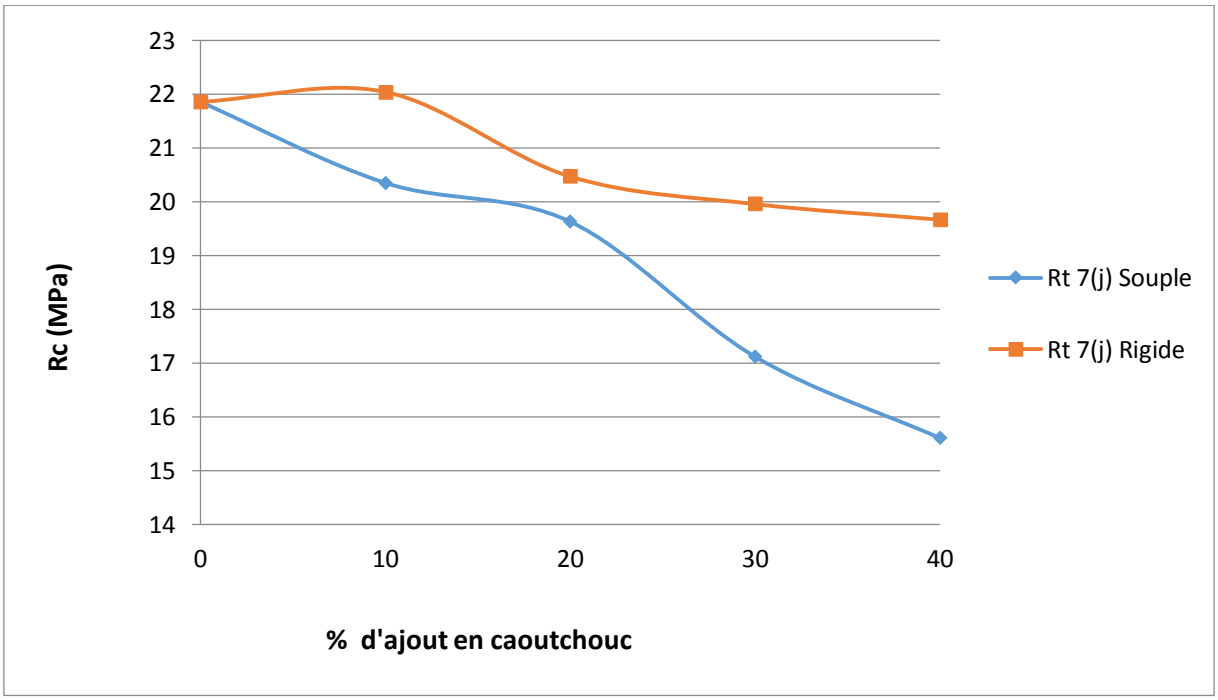


Figure 3.27 : Résistance à la compression a 7j des bétons à base de sable concassé

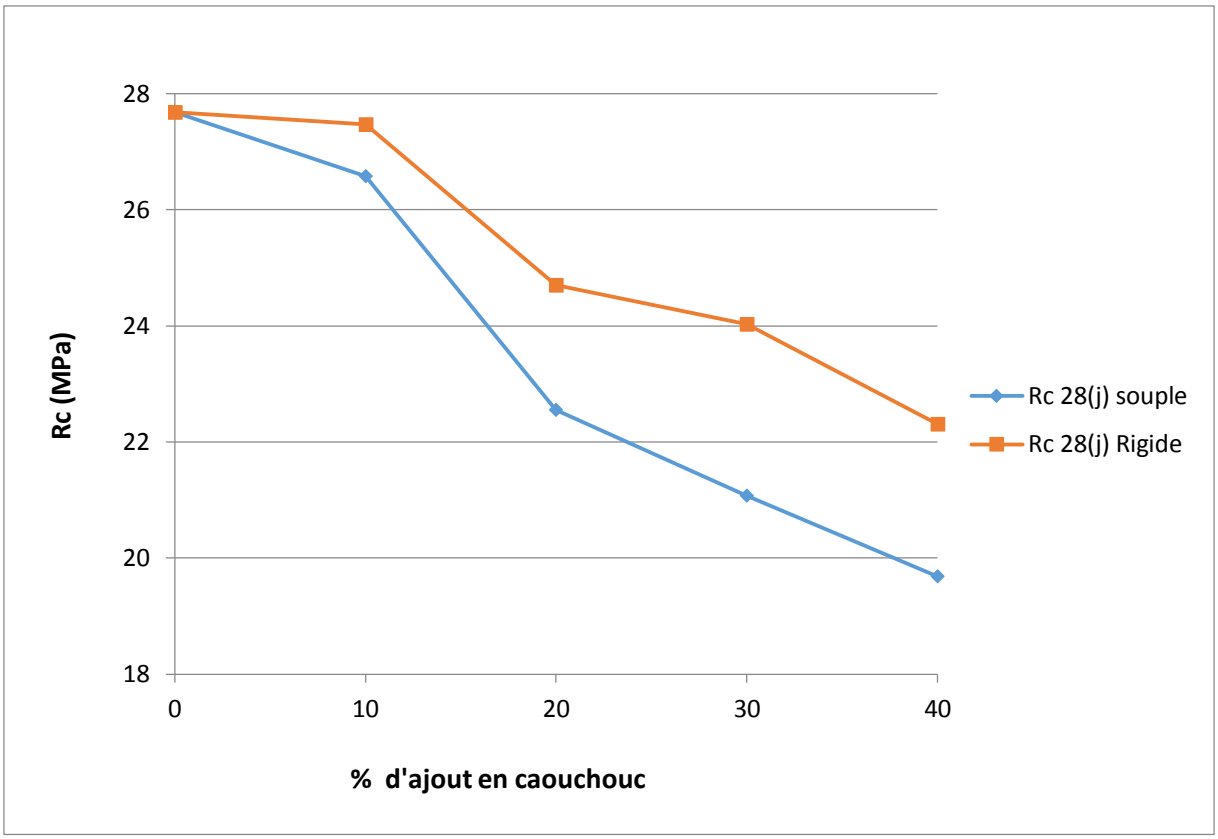


Figure 3.28 : Résistance à la compression a 28j des bétons à base de sable concassé

D'après les résultats obtenus dans les figures précédents, on remarque que l'addition des déchets de caoutchoucs (souples et rigide) à la formulation de tous les types des BS influe négativement sur la résistance à la compression. Le Tableau 3.1 donne une idée sur les pourcentages de chute de la résistance de compression en fonction de pourcentage de l'ajout de déchets de semelles. D'après ces résultats les meilleurs résultats sont donnés par les bétons à base de sable concassé, grâce à sa bonne classe granulométrique par rapport aux autres types des BS.

Pour expliquer la chute de résistance en compression, l'argument couramment avancé notamment par Li et al. [97] est la rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels.

La deuxième raison est inhérente aux défauts d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases. Cet argument a été aussi avancé par Garros [46] qui montre que la zone de transition entre la matrice et le granulat en caoutchouc est peu compacte et présente une porosité importante. D'ailleurs, Lutz et al. [97] attribuent à cette zone un module d'élasticité beaucoup plus faible, 40% inférieur

à celui de matrice cimentaire. Par conséquent, ces défauts d'adhérence constituent des points faibles d'où les fissures sous sollicitation mécanique pourront être initiées.

Tableau 3.1 : les pourcentages de chute de la résistance de compression en fonction de pourcentage de l'ajout de déchets de semelles.

% d'ajout		**0%**	**10%**	**20%**	**30%**	**40%**
Sable de TAMENRASSET	**BSTS**	0	3.6	19.21	21.16	23.09
	BSTR	0	1.76	8.19	9.11	14.59
Sable de BAHBAH	**BSBHS**	0	14.54	19.84	27.04	30.97
	BSBHR	0	10.99	16.94	23.35	30.07
Sable de BOUGHEZOUL	**BSBGS**	0	18.41	24.24	31.56	37.21
	BSBGR	0	11.55	17.53	25.45	33.61
Sable CONCASSÉ	**BSCS**	0	3.97	18.53	23.84	28.90
	BSCR	0	0.74	10.74	13.18	19.40

III.3.3.2 Résistances à la traction

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître. Les résultats sont illustrés dans les figures de 3.29 à 3.36 ci-dessous :

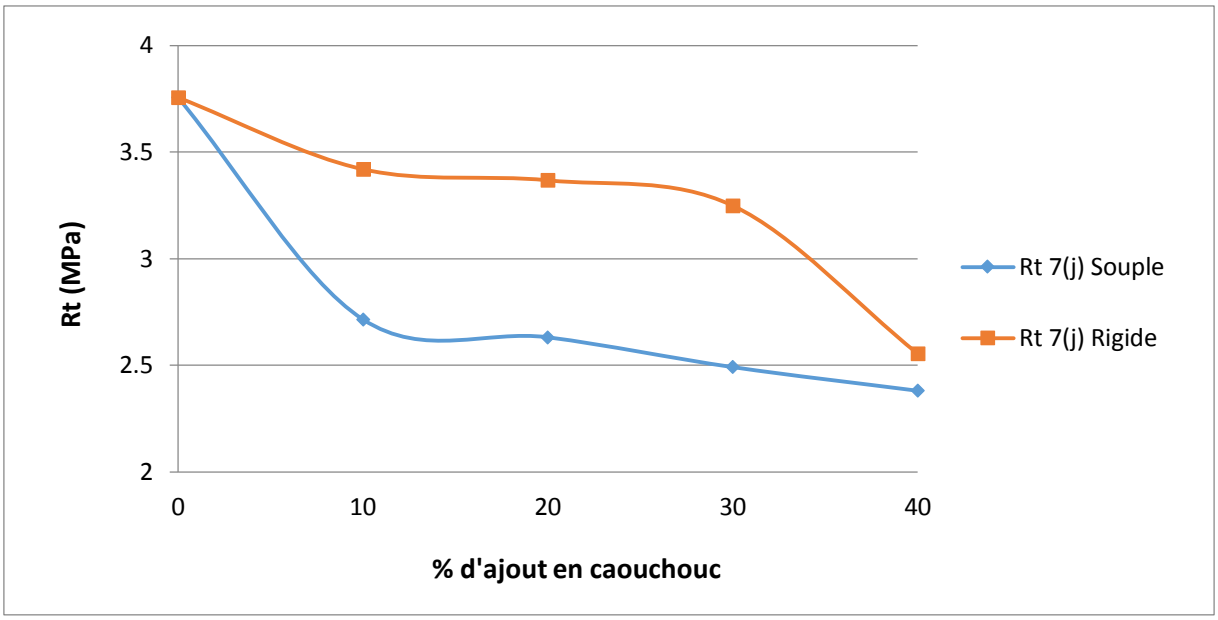


Figure 3.29 : Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable de Tamenrasset

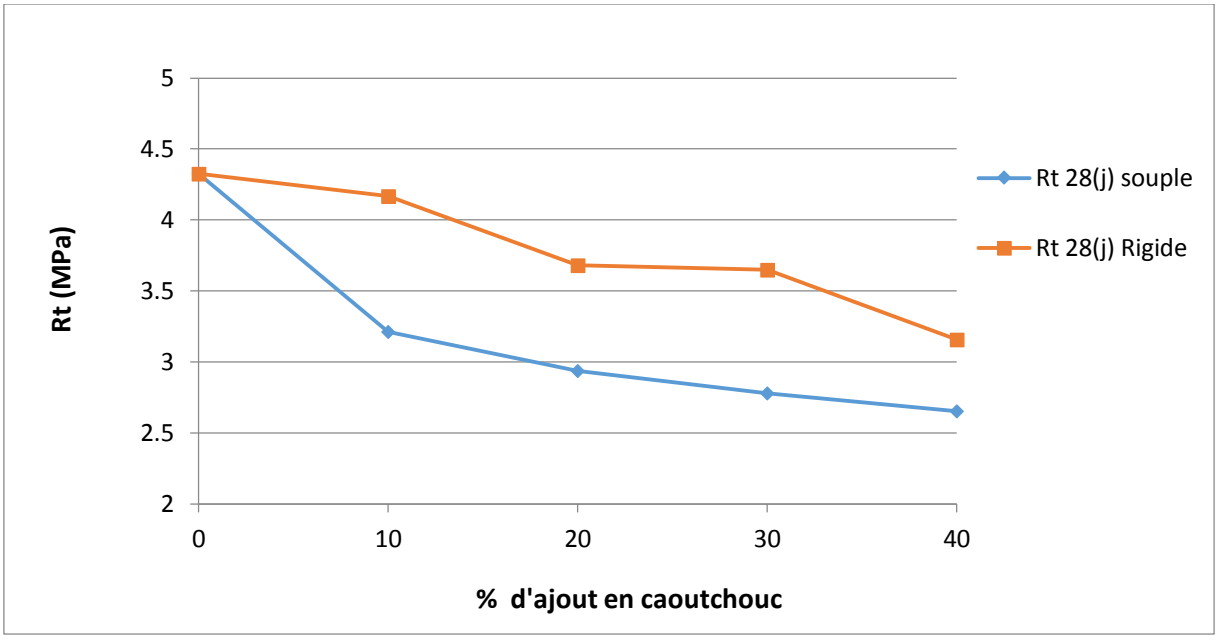


Figure 3.30 : Résistance à la traction à 28j des bétons à base de sable de Tamenrasset

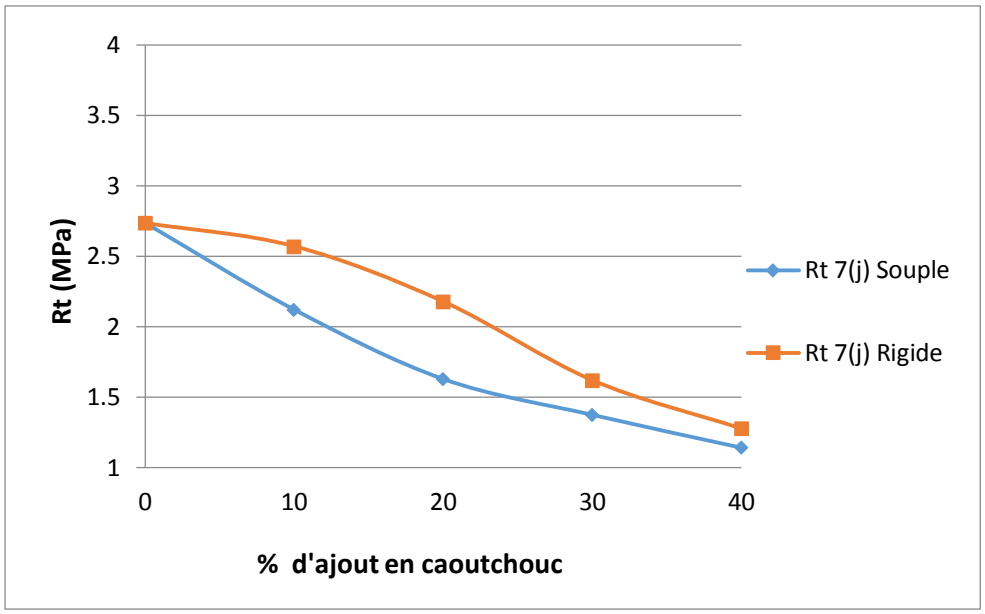


Figure 3.31: Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable de Bahbah

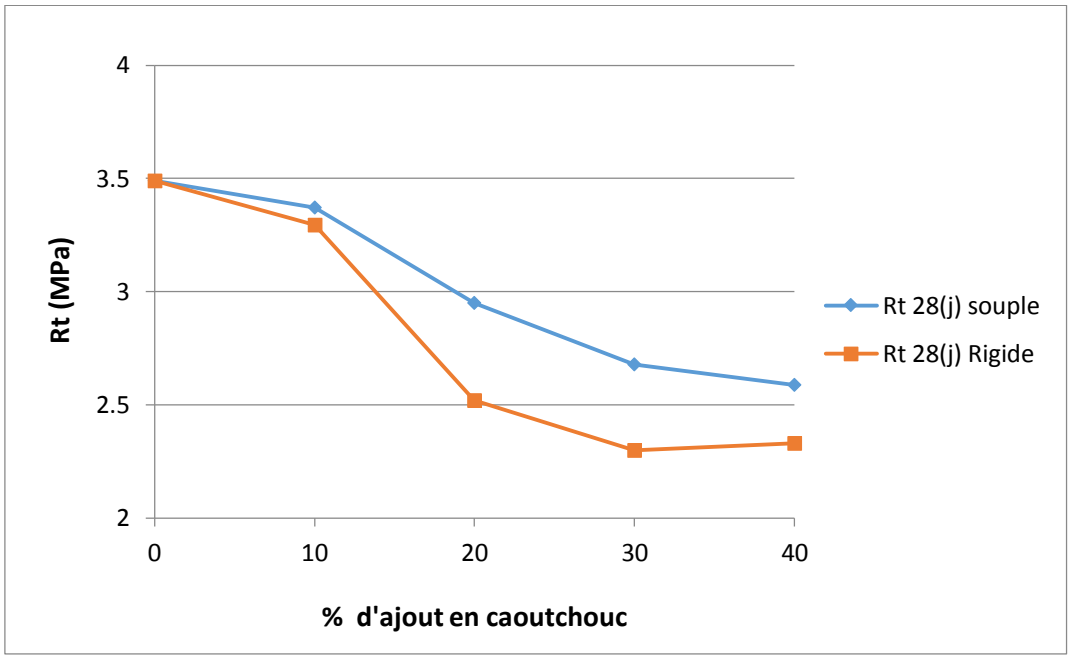


Figure 3.32: Résistance à la traction à 28j des bétons à base de sable de Bahbah

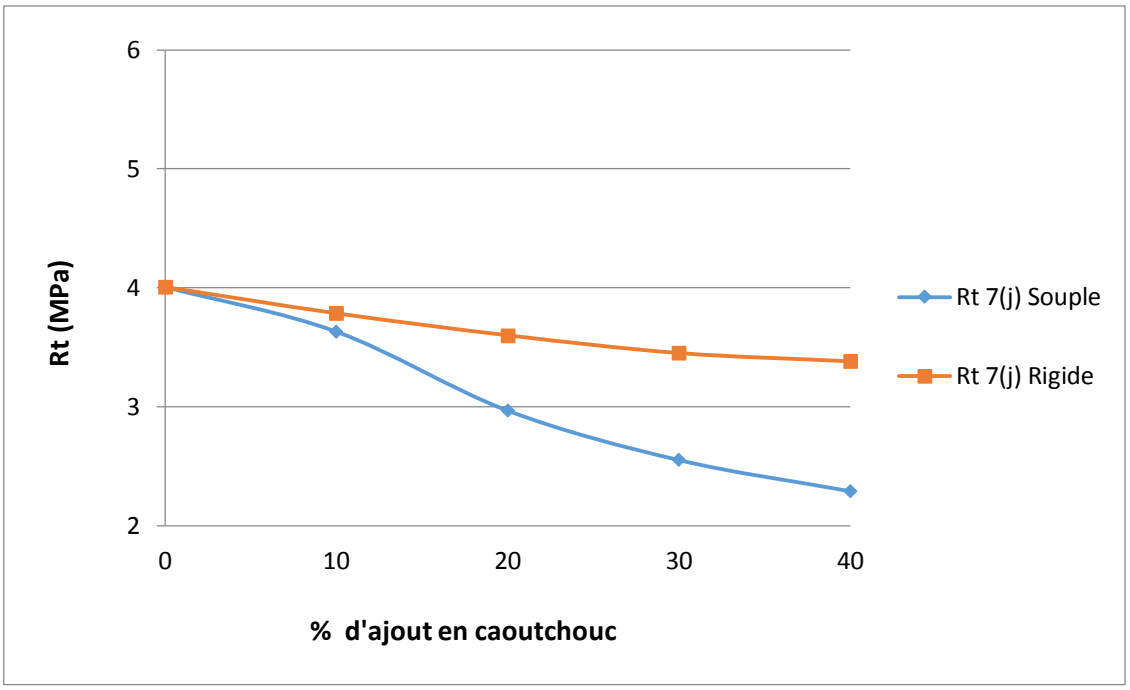


Figure 3.33: Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable de Boughezoul

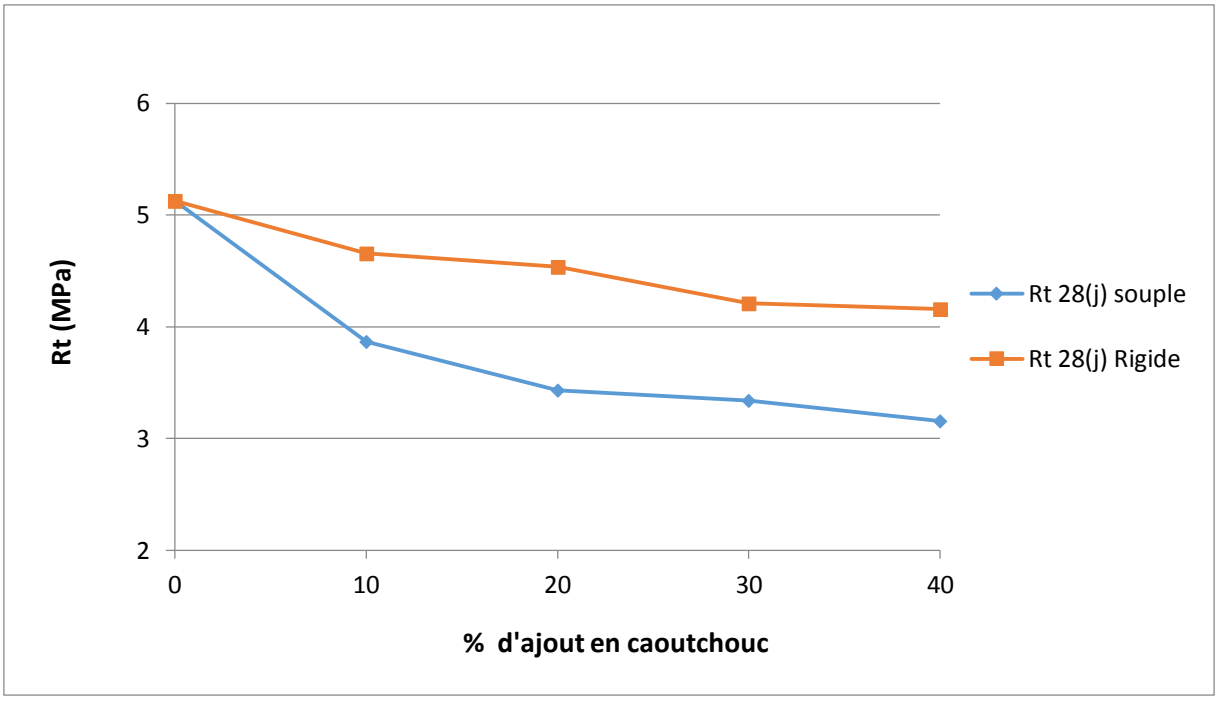


Figure 3.34: Résistance à la traction à 28j des bétons à base de sable de Boughezoul

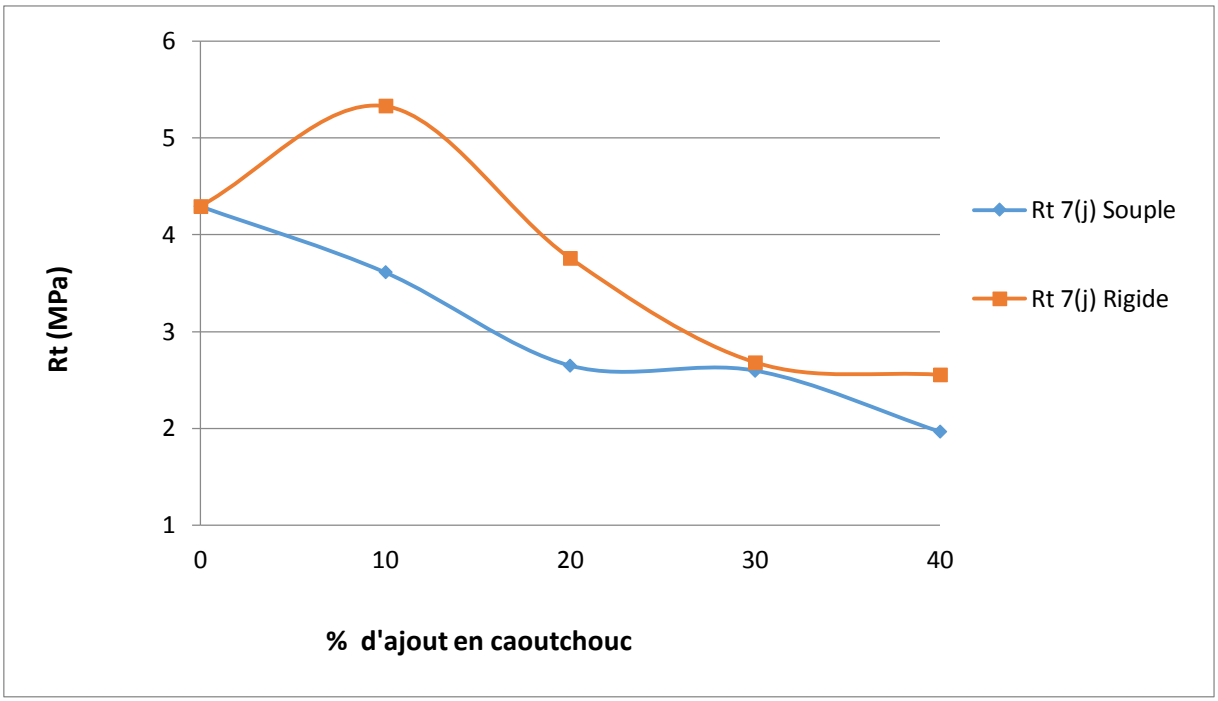


Figure 3.35 : Résistance à la traction à 7j des bétons à base de sable concassé

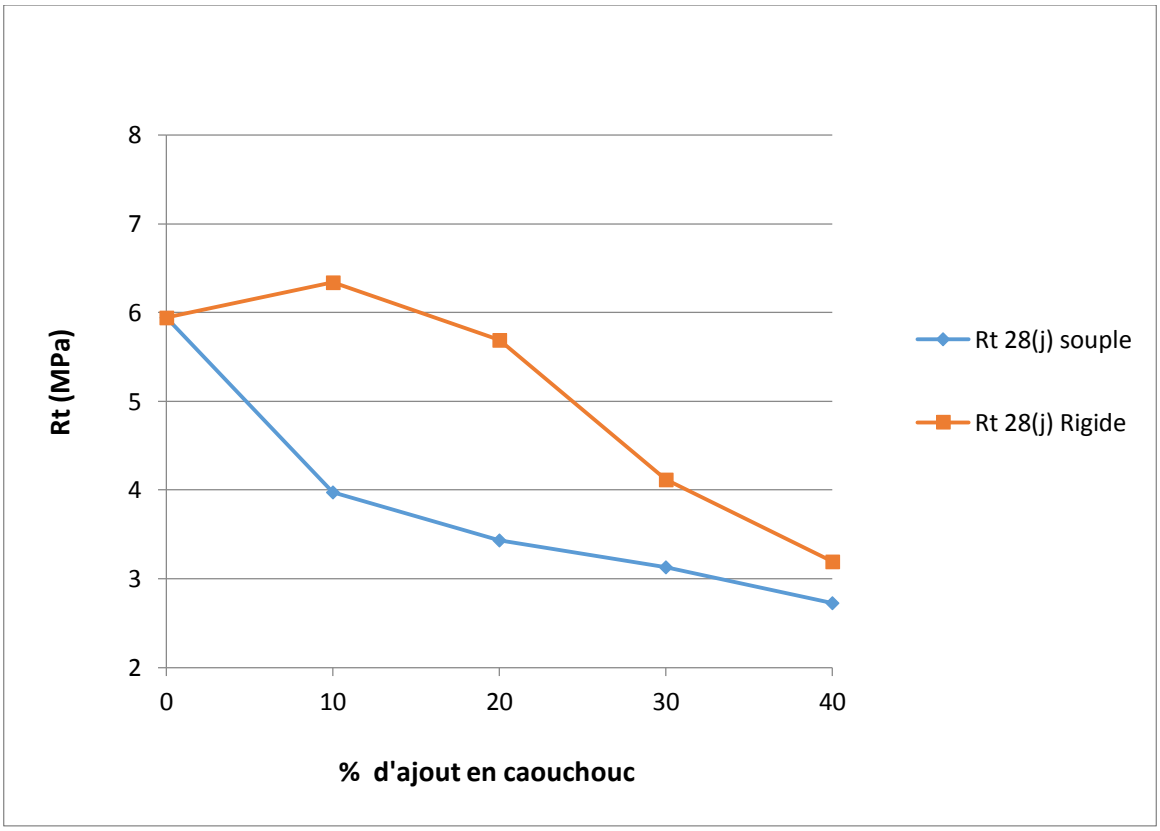


Figure 3.36 : Résistance à la traction à 28j des bétons à base de sable concassé

De la même façon que pour la résistance à la compression, les figures ci-dessus montrent que la résistance à la traction de tous les mélanges est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage des déchets de caoutchouc. Cette diminution des résistances est expliqué par le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases, ce qui confirme les résultats trouvé par Lutz et al. [97] .Une exception a été enregistrée pour les bétons de sable concassé pour un ajout de 10% de déchets rigide qui présente une légère augmentation, et qui présente aussi les meilleurs résultats des Rt, mais au-delà de cette valeur les résistances à la traction commencent à diminuer.

III.3.3 Le module d'élasticité

Afin de gagner un essai en plus et de permettre aux utilisateurs du béton de sable on a essayé de déterminer le module d'élasticité, Les résultats obtenus sont récapitulés dans les figures de 3.37 à 3.40 ci-dessous :

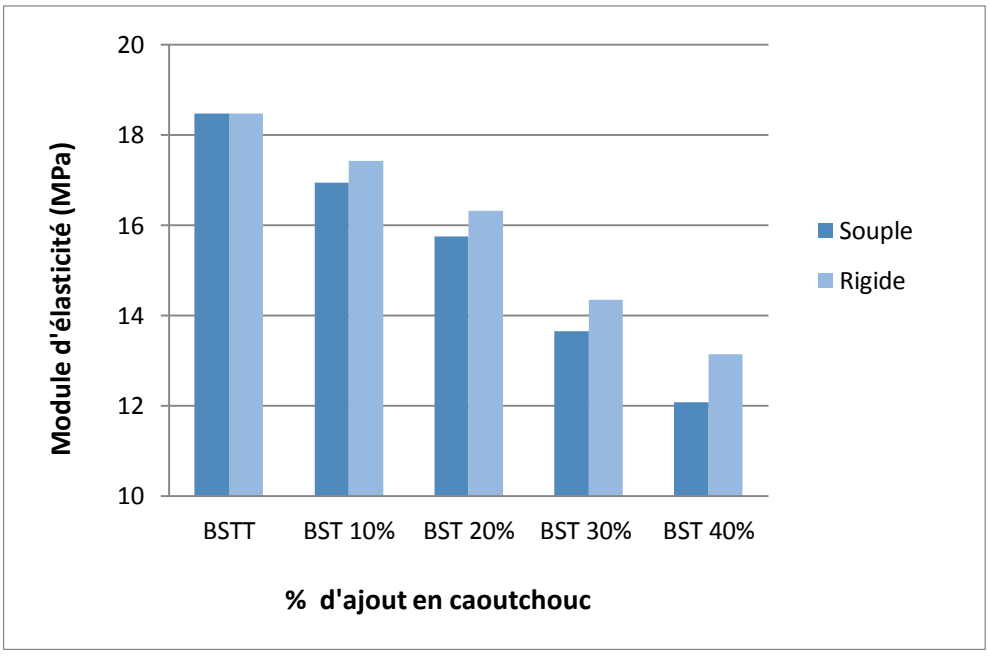


Figure 3.37 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable de Tamenrasset

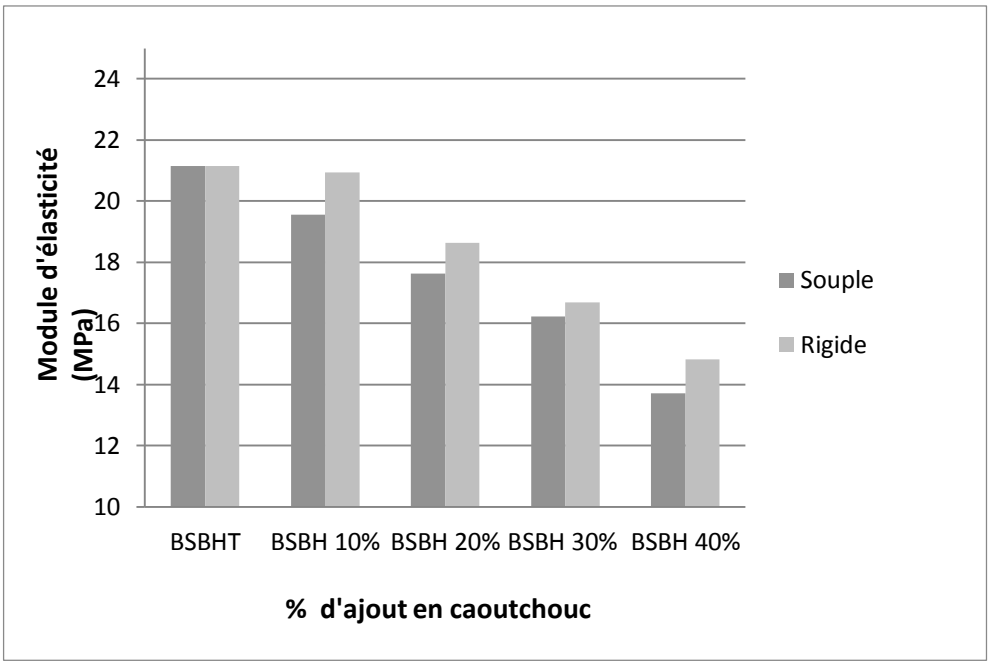


Figure 3.38 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable de Bahbah

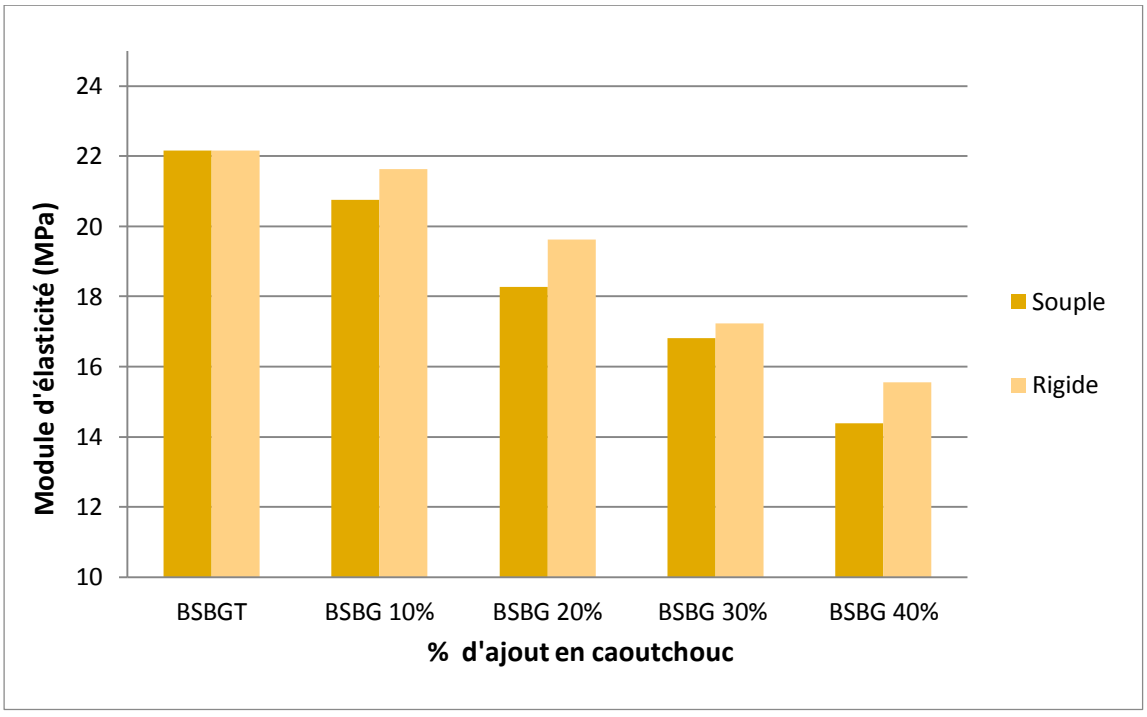


Figure 3.39 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable de Boughezoul

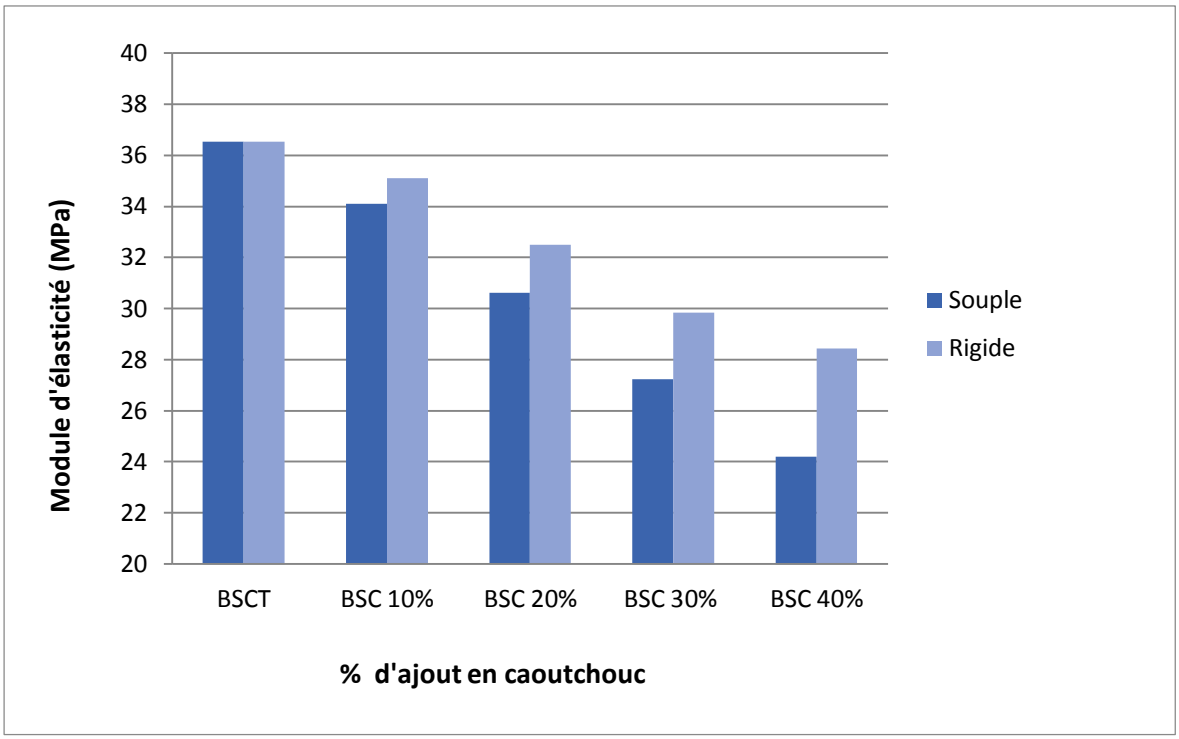


Figure 3.40 : Variation du module d'élasticité des bétons à base de sable concassé

D'après les résultats obtenus dans les figures précédents, on remarque que l'addition des déchets de caoutchoucs (souples et rigide) à la formulation de tous les types des BS influe négativement sur le module d'élasticité, et on remarque aussi que le module d'élasticité des bétons à base de déchets de semelles rigide et plus grand que celle des bétons de déchets de semelle souple. Au même titre que les résistances en compression et en traction, de nombreux travaux [97] confirment que l'incorporation de G.C. induit une chute importante du module d'élasticité. L'effet défavorable de l'incorporation de G.C. sur le module d'élasticité a été présenté par Güneyisi et al. [98] montrent une baisse de 83% du module d'élasticité lorsque la moitié du volume granulaire est remplacé par des granulats en caoutchouc. Finalement Les meilleurs résultats de module d'élasticité est donné par les BSC grâce à sa classe granulométrique qui est plus grande quel celle du BSBH, BST et BSBG.

III.4 Approche de durabilité

III.4.1 Absorption d'eau

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des différents bétons réalisés sont illustrés dans les figures de 3.41 à 3.48 suivantes :

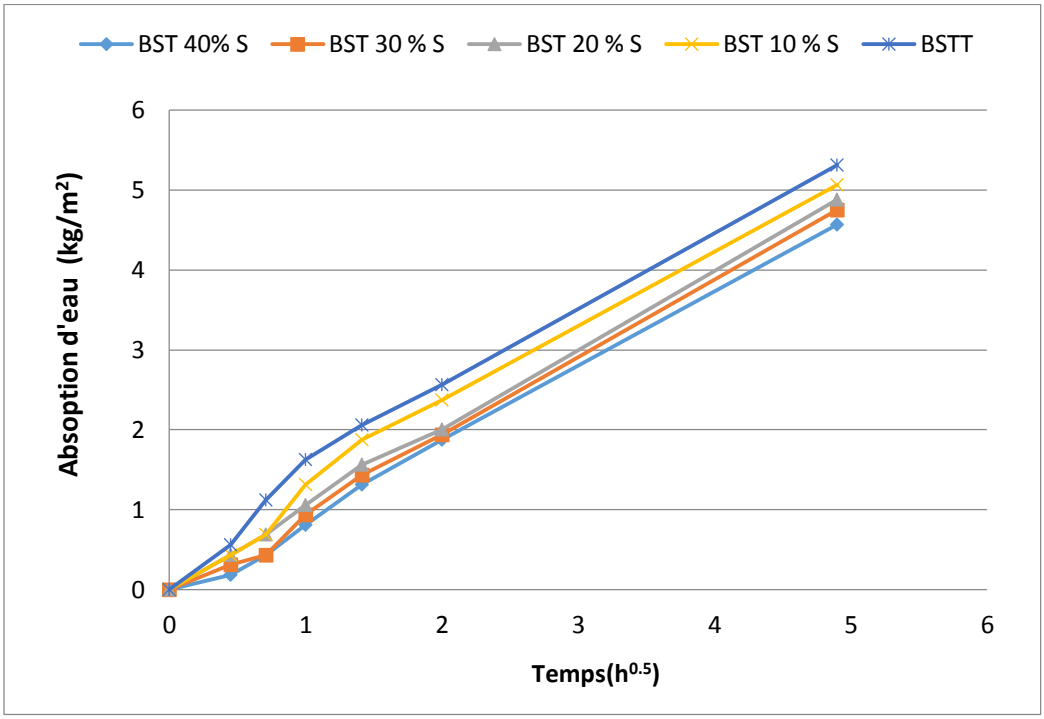


Figure 3.41 : Absorption d'eau des BSTS

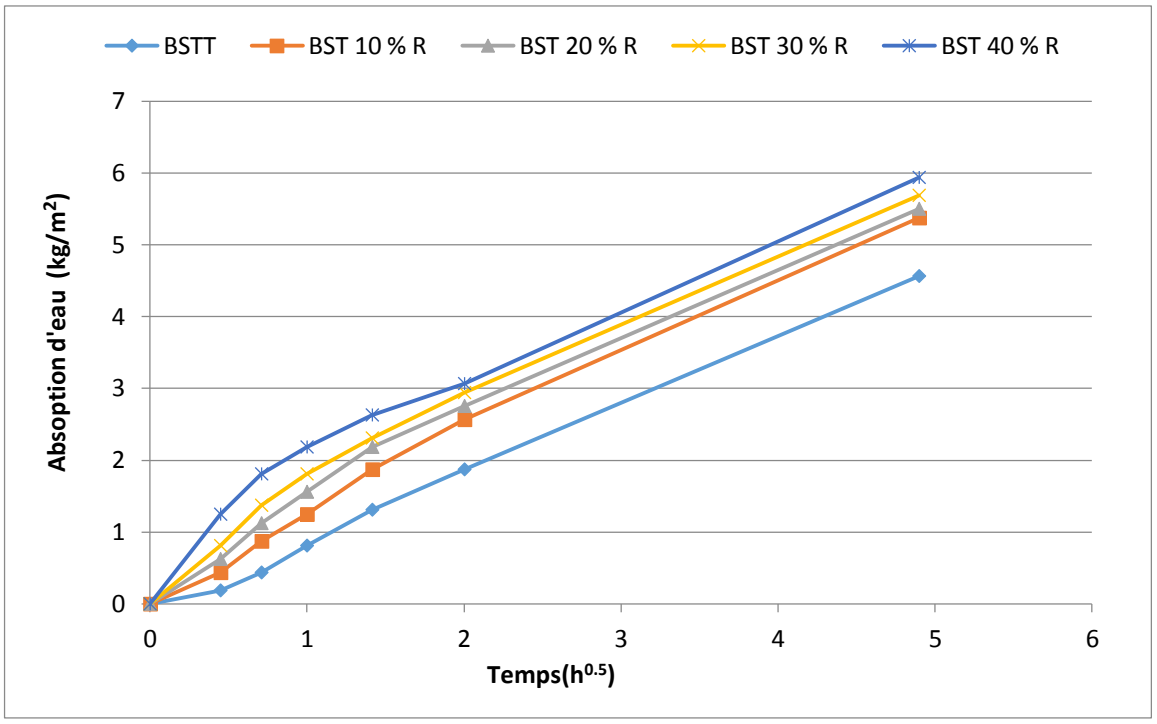


Figure 3.42 : Absorption d'eau des BSTR

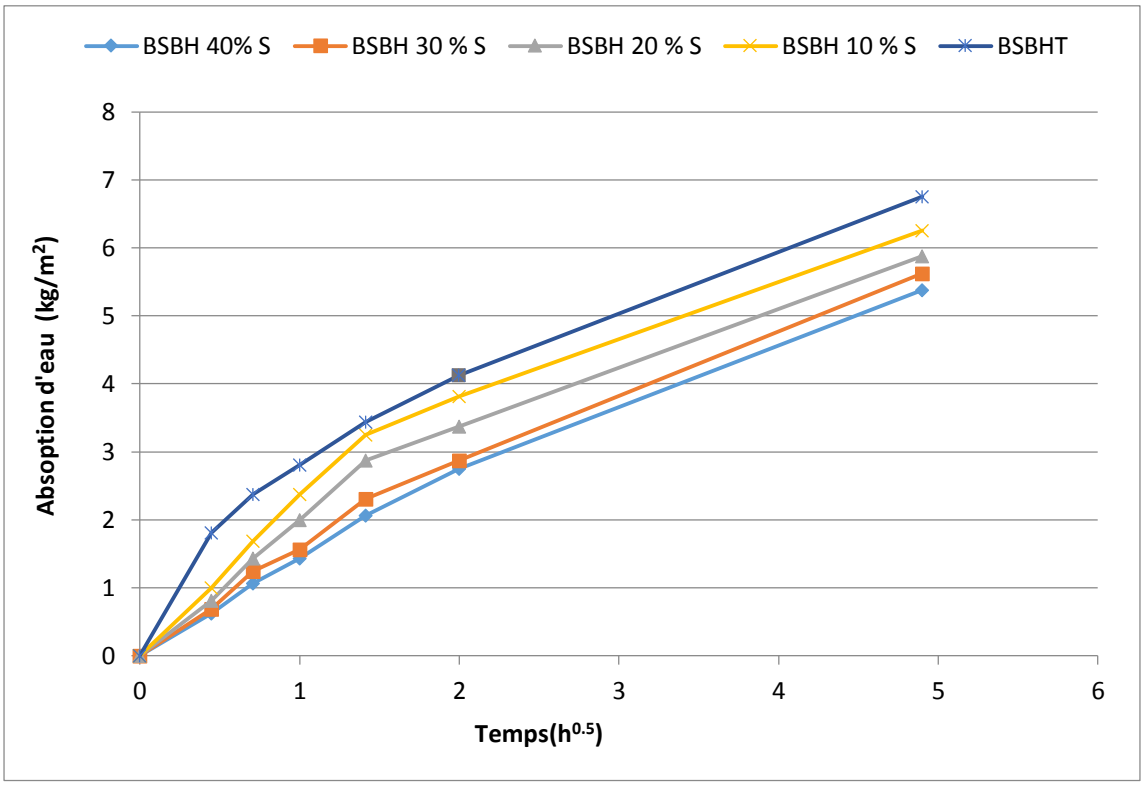


Figure 3.43 : Absorption d'eau des BSBHS

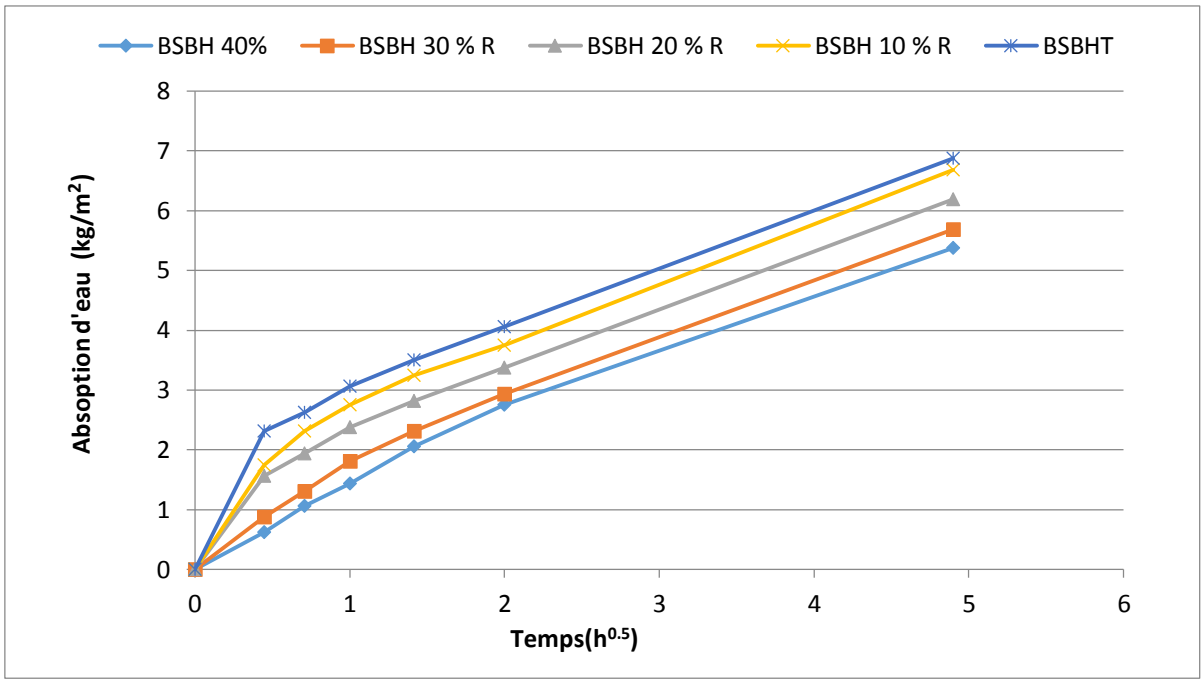


Figure 3.44 : Absorption d'eau des BSBHR

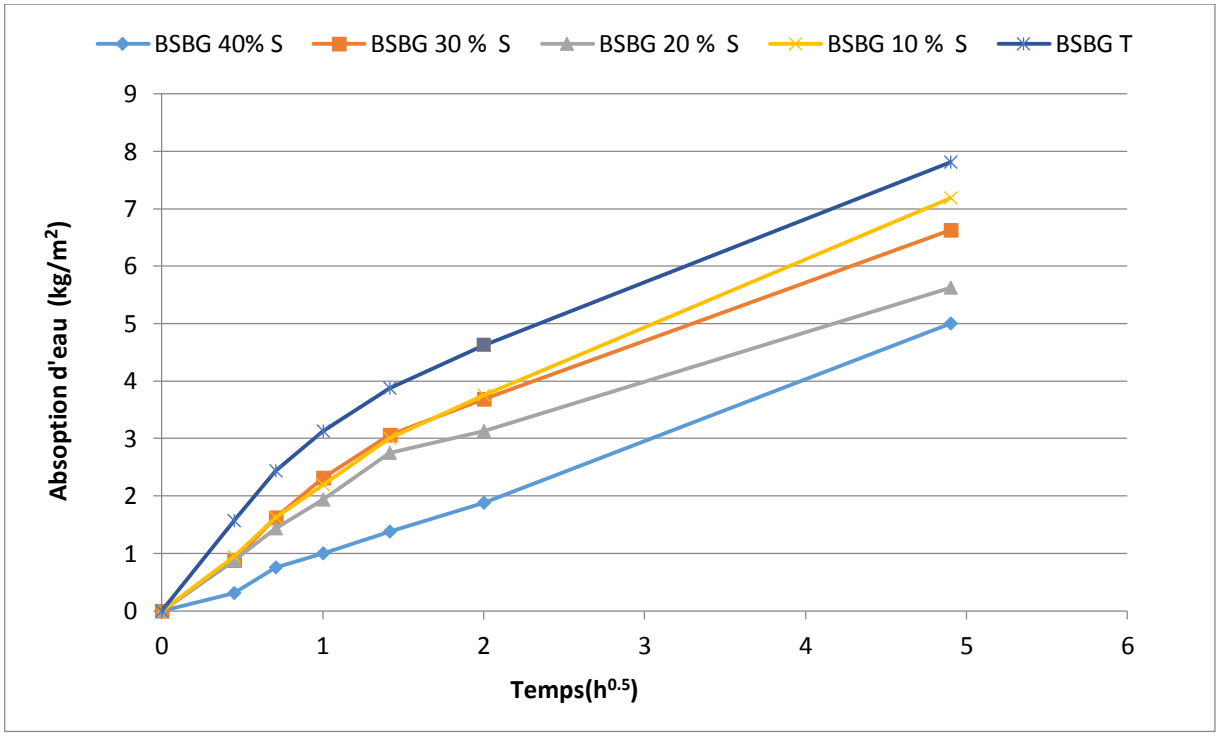


Figure 3.45 : Absorption d'eau des BSBGS

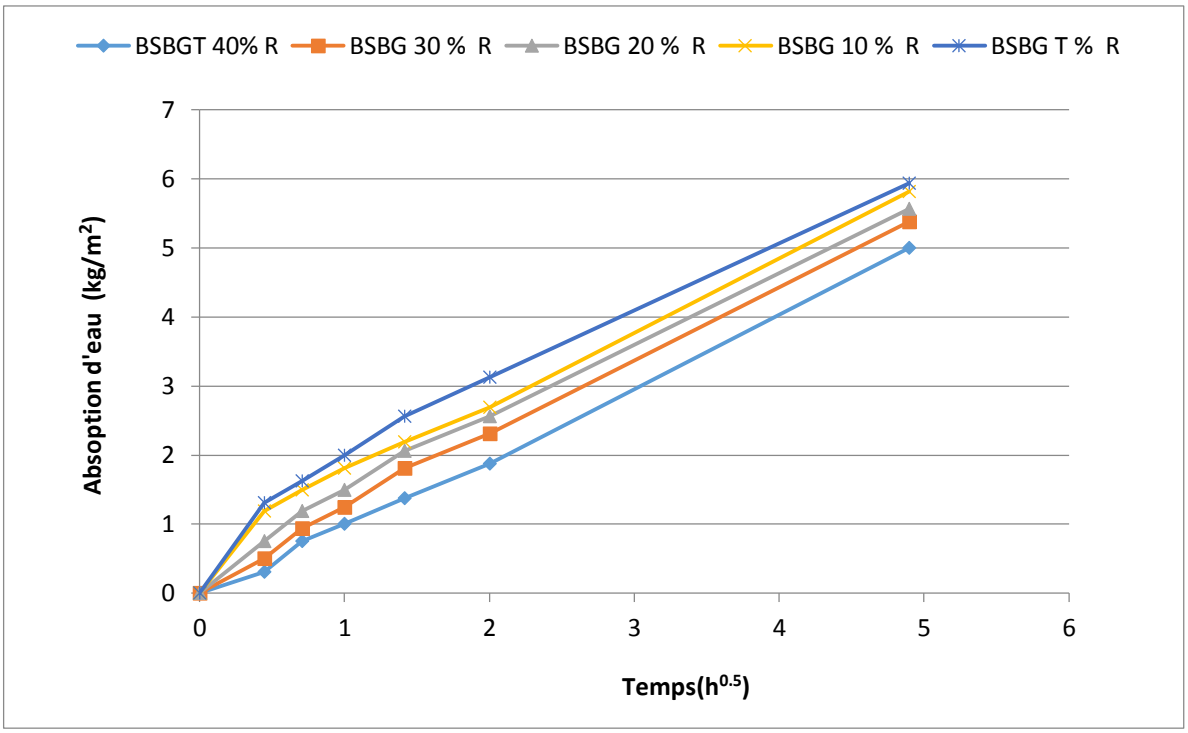


Figure 3.46 : Absorption d'eau des BSBGR

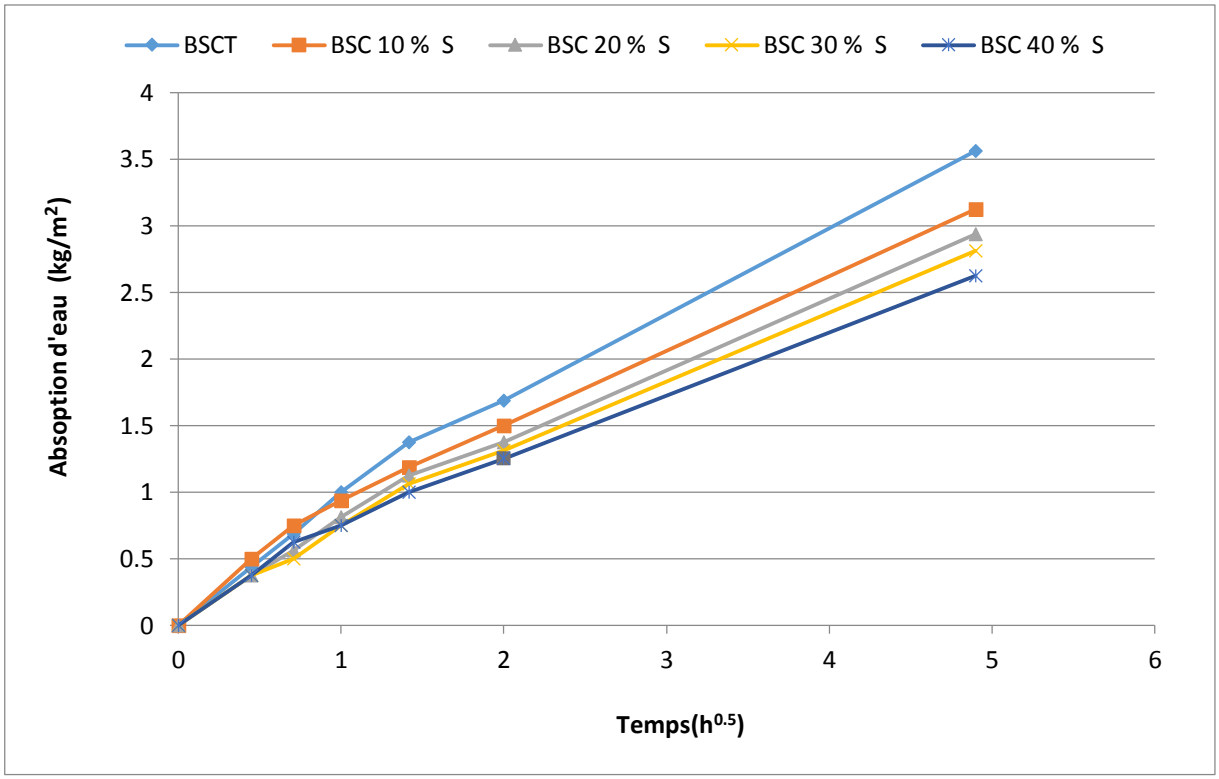


Figure 3.47 : Absorption d'eau des BSCS

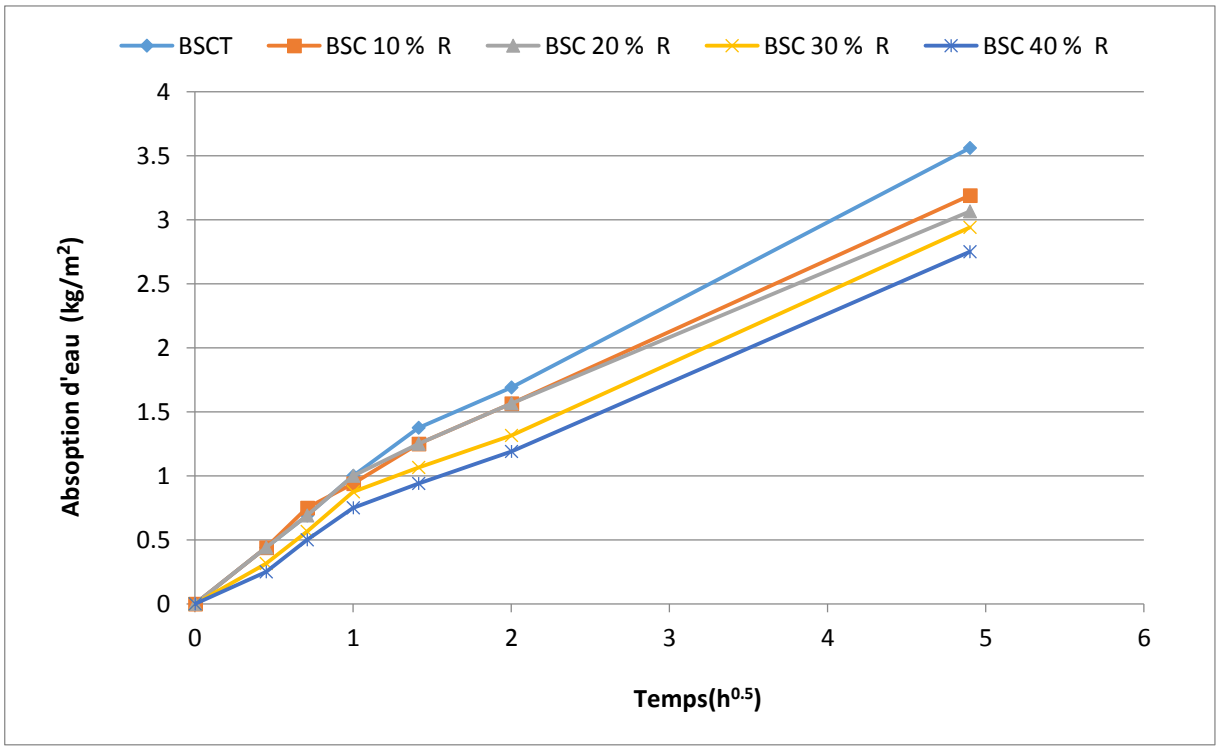


Figure 3.48 : Absorption d'eau des BSCR

D'après les résultats obtenus, on remarque que la capacité d'absorption d'eau de tous les bétons de sable est diminuée en fonction de l'incorporation de déchets de caoutchoucs. Les figures précédentes montrent aussi que l'absorption des bétons à base de déchets de semelles souple et plus grand que celle des bétons de déchets de semelle rigide. Ces résultats confirment les résultats trouvés par Benazzouk et al. [54] et ceux de Garros [46] qui ont montrés gue la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C., ce que les premiers auteurs expliquent par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire. Quand à Garros, il évoque aussi la nature hydrophobe du caoutchouc et la dimension de l'auréole de transition qui n'est pas de taille à favoriser l'ascension capillaire.

III.4.2 Mesure des variations de longueur

A. Retrait

Les figures de 3.49 à 3.56 permettent de mettre en lumière l'influence du dosage en déchets semelles sur le retrait en l'air libre des quatre types de béton de sable employé :

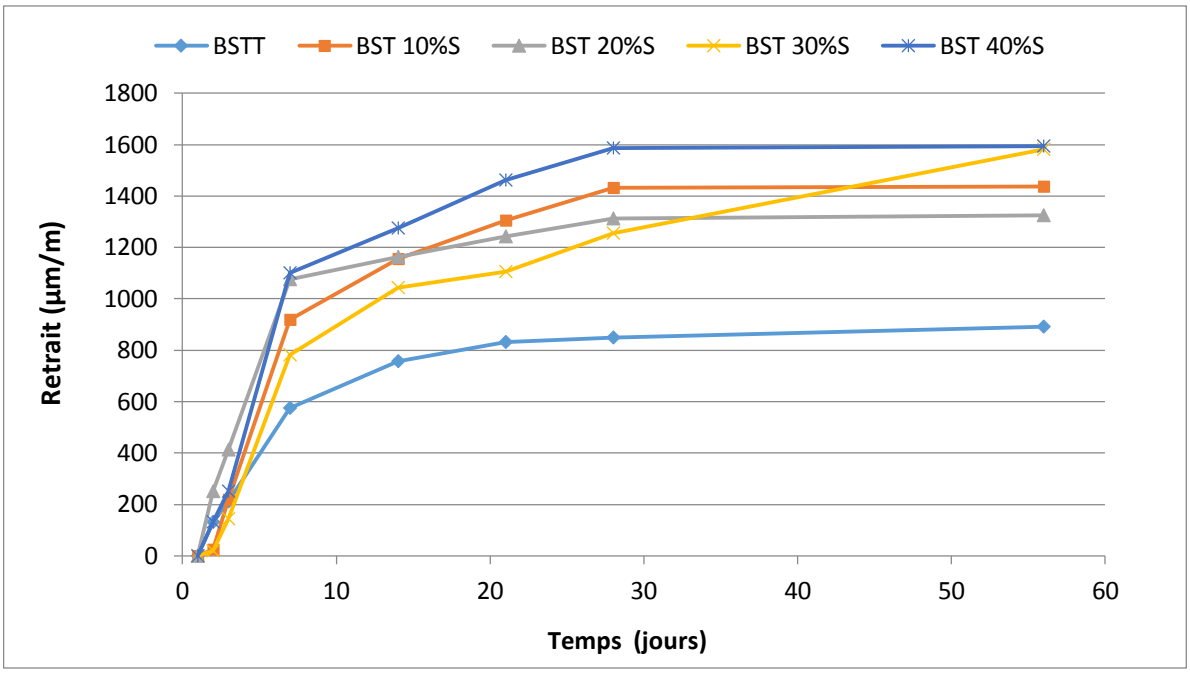


Figure 3.49 : Retrait des bétons BSTS

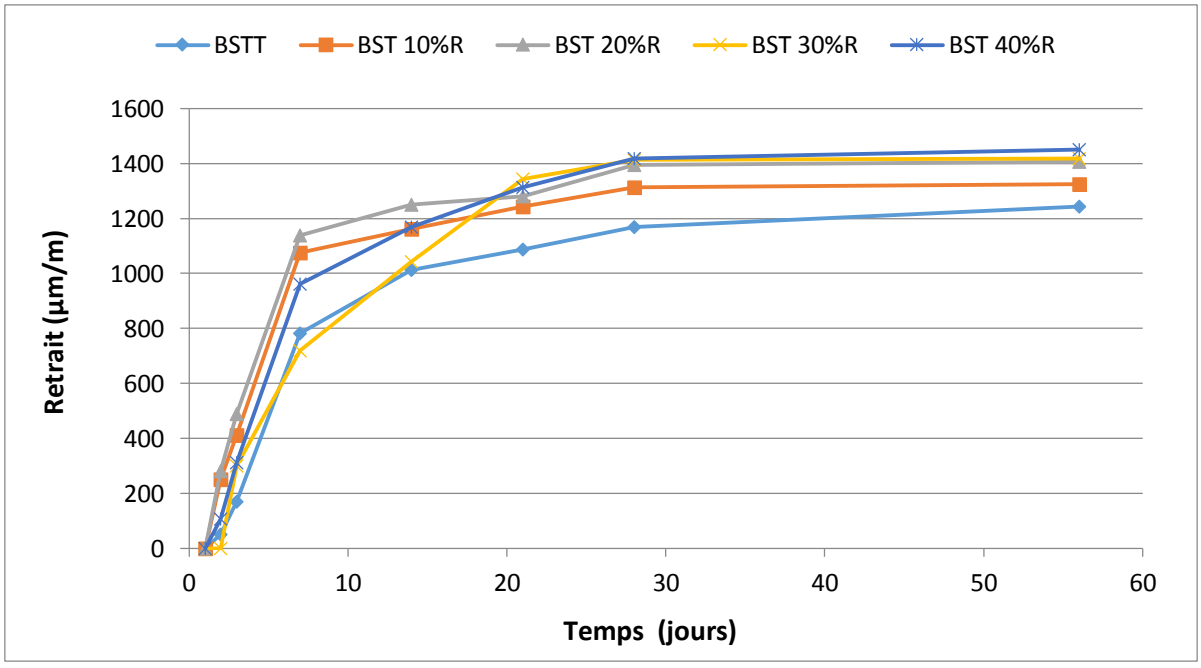


Figure 3.50: Retrait des bétons BSTR

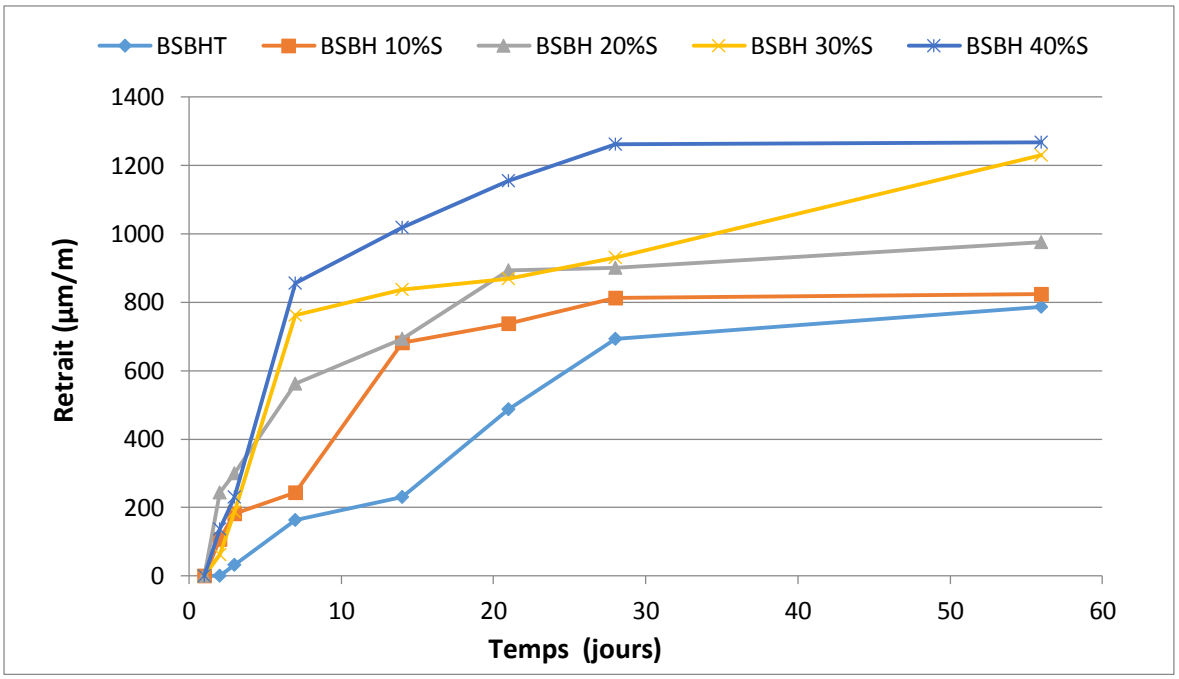


Figure 3.51 : Retrait des bétons BSBHS

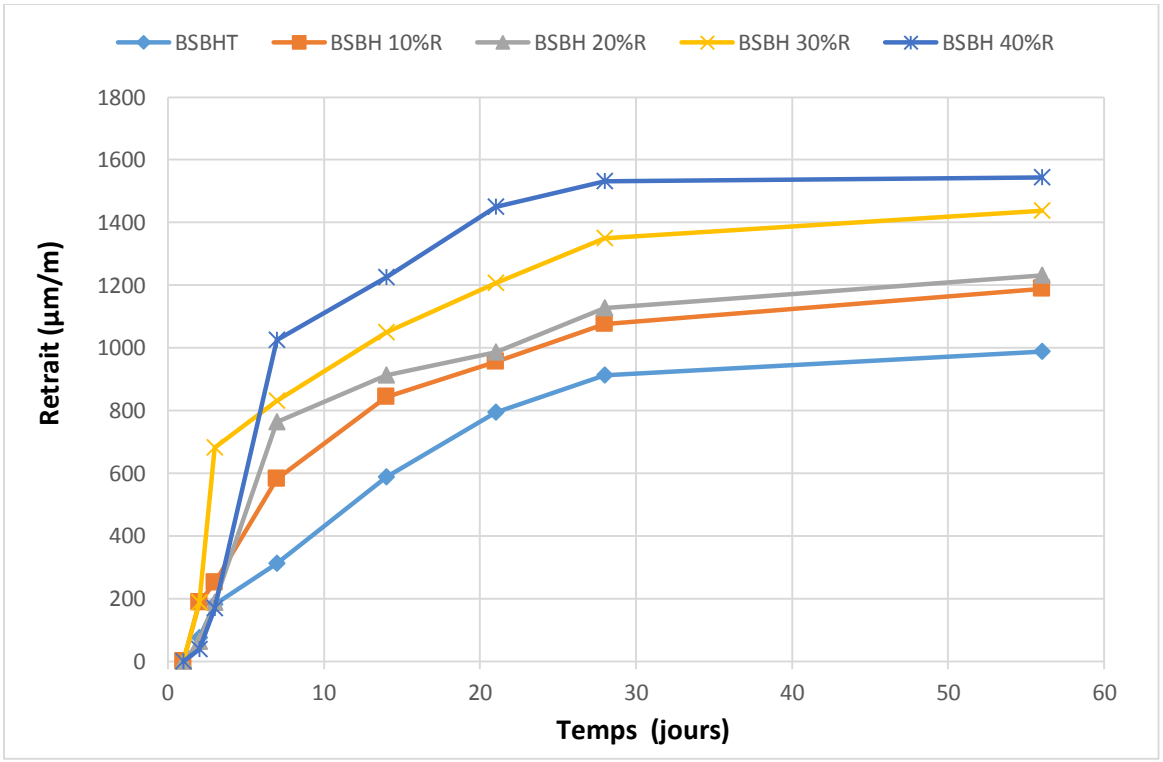


Figure 3.52: Retrait des bétons BBHR

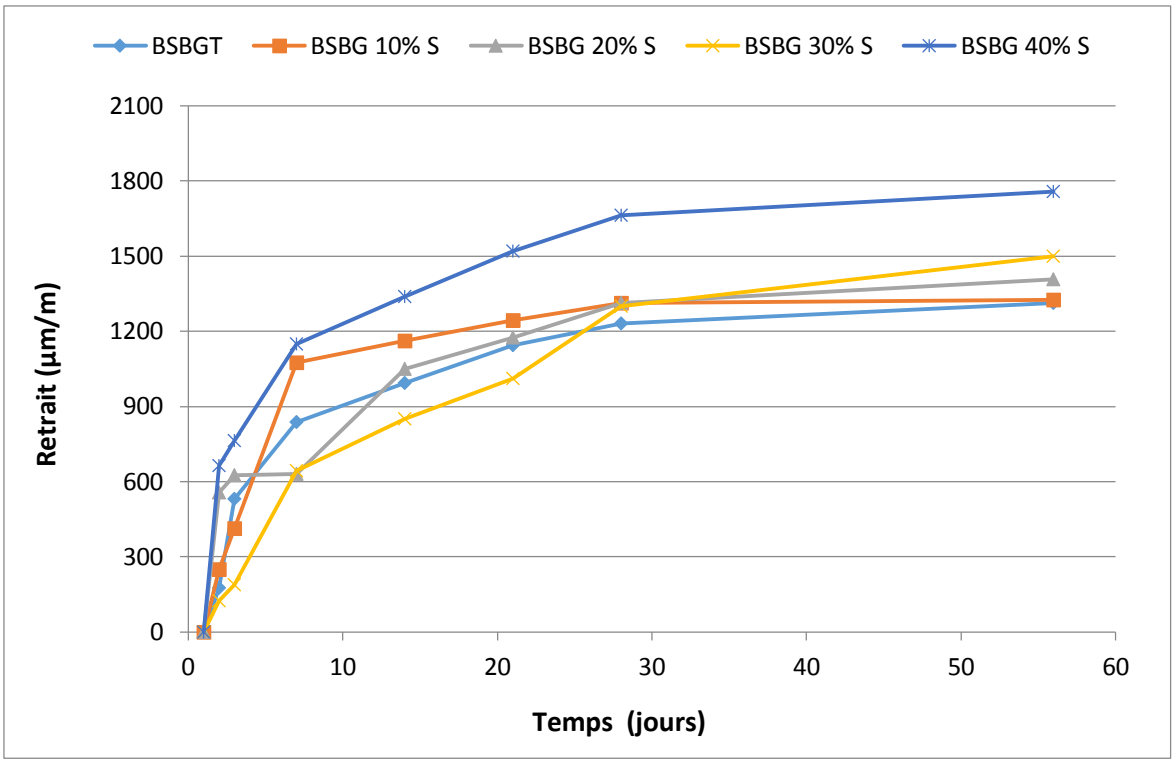


Figure 3.53 : Retrait des bétons BSBGS

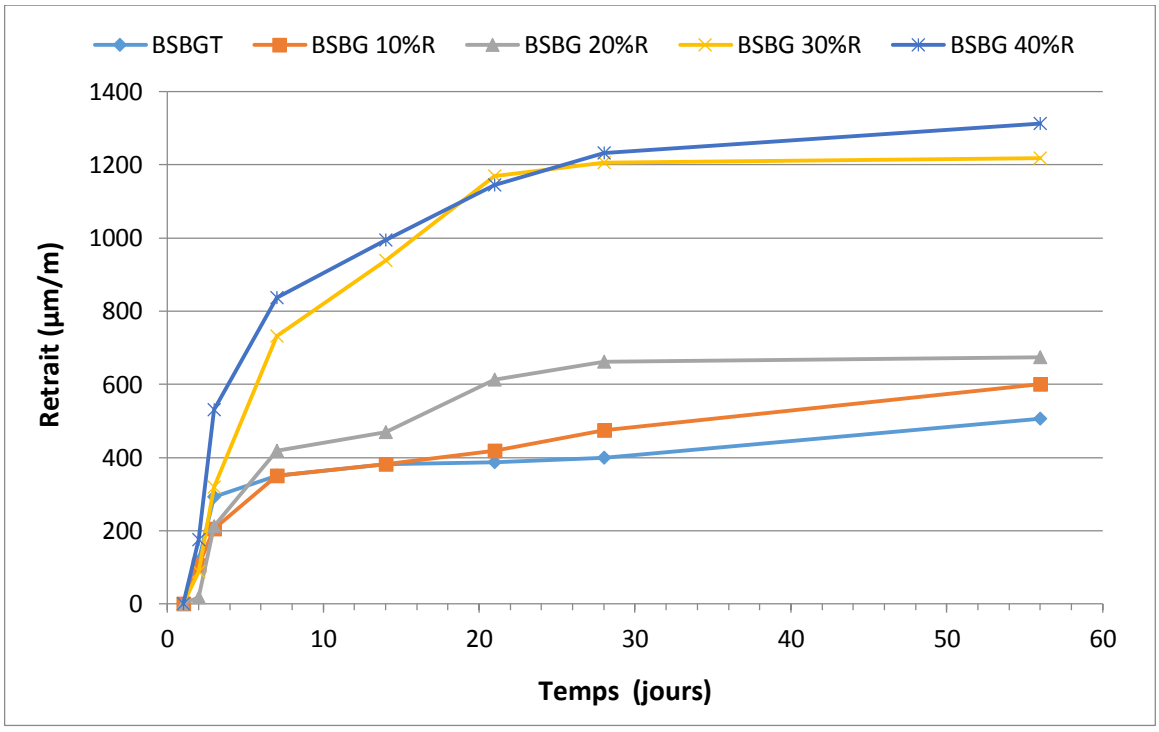


Figure 3.54 : Retrait des bétons BSBGR

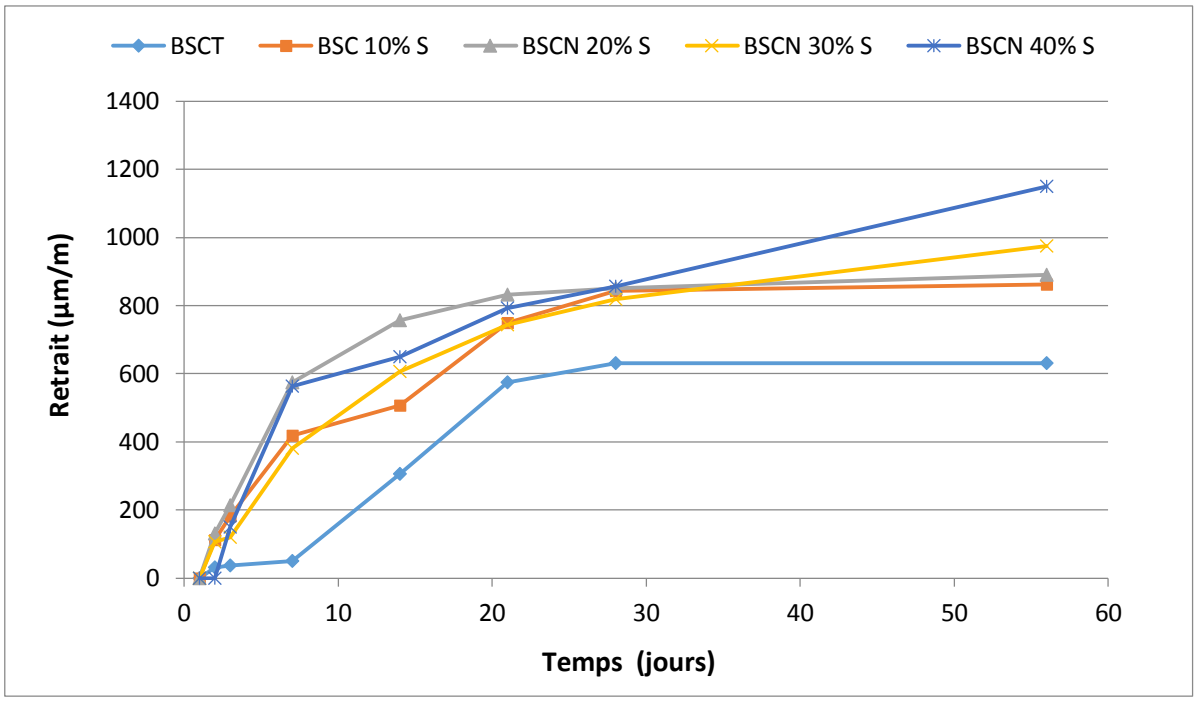


Figure 3.55: Retrait des bétons BSCS

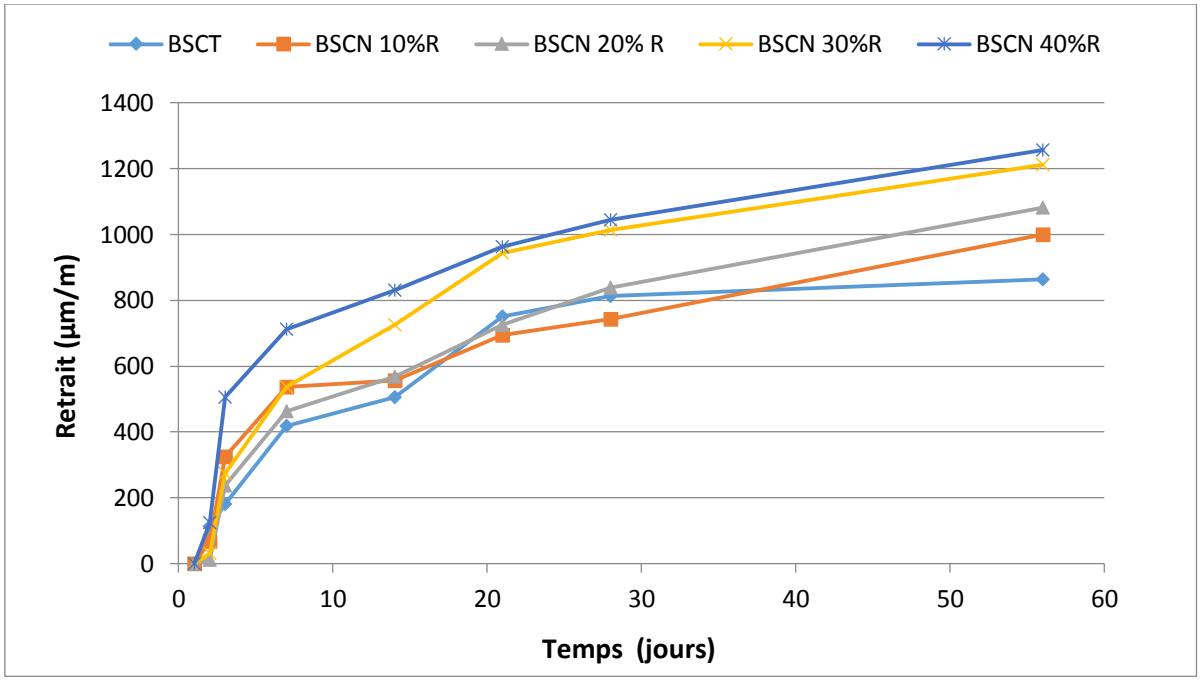


Figure 3.56 : Retrait des bétons BSCR

Les résultats obtenus montrent que tous les types de béton de sable à base de déchets de caoutchouc ont des retrait très important par rapport au béton de sable de référence, et on remarque aussi que plus le pourcentage de déchets (souple et rigide) augmente plus le retrait augmente.

Certains auteurs ont étudié l'influence de caoutchouc sur le retrait du béton et leurs résultats montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence.

Turatsinze et al. [51] ils ont confirmé que les variations dimensionnelles des mortiers incorporant des granulats de caoutchouc sont plus élevées que celles du mortier de référence.

B. Gonflement

De la même façon, le gonflement des différents bétons est illustré dans les figures de 3.57 à 3.64 suivantes :

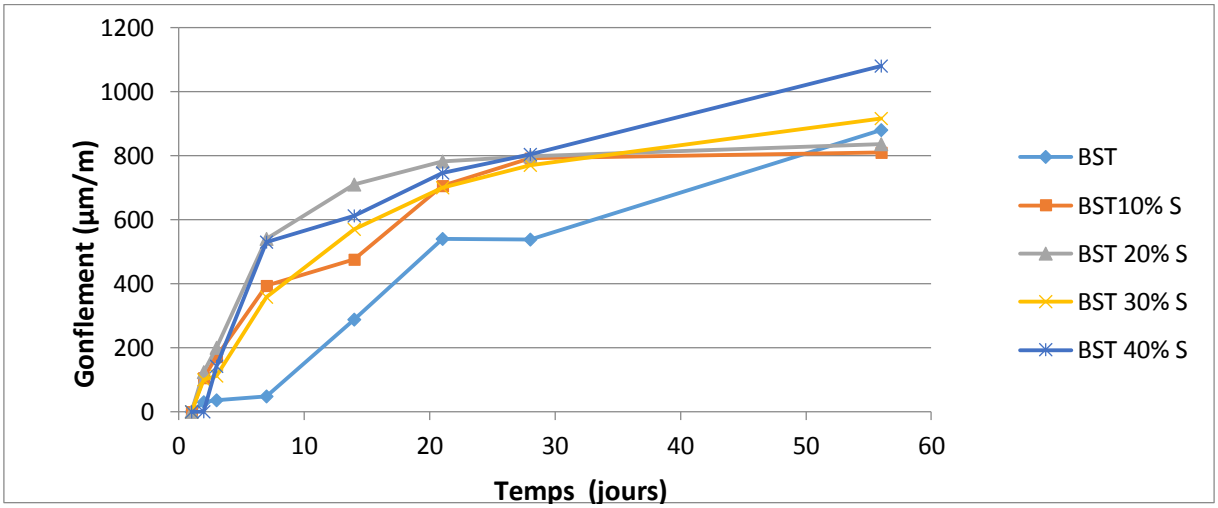


Figure 3.57 : gonflement des bétons BSTS.

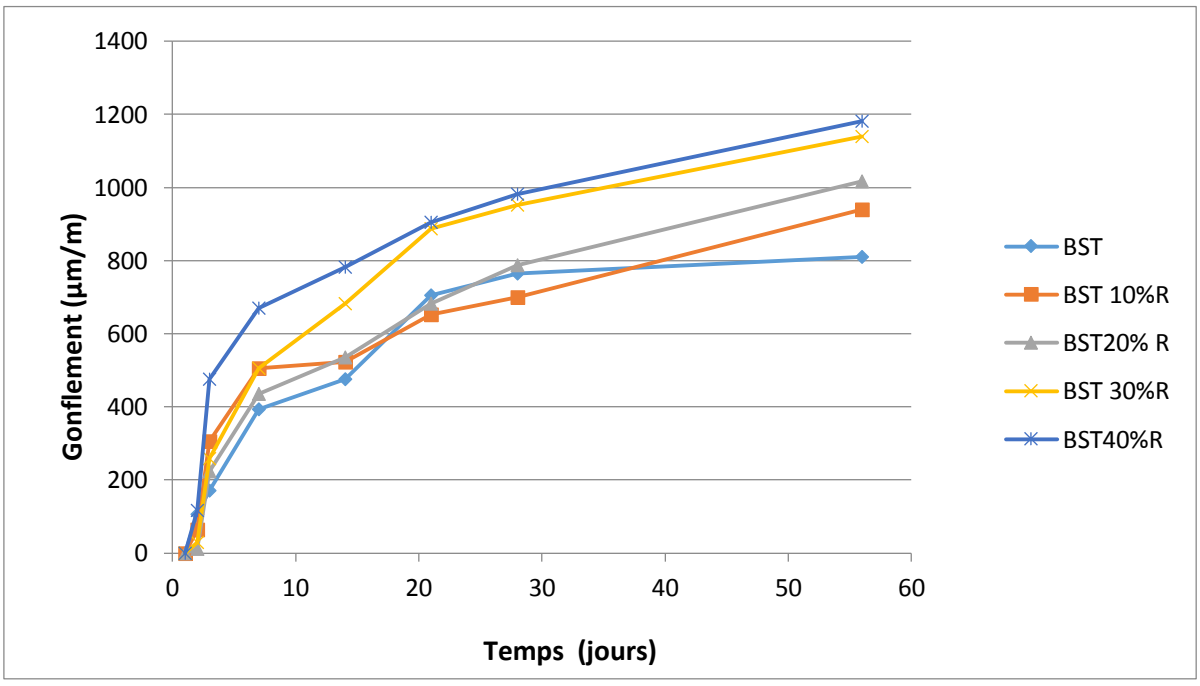


Figure 3.58 : gonflement des bétons BSTR.

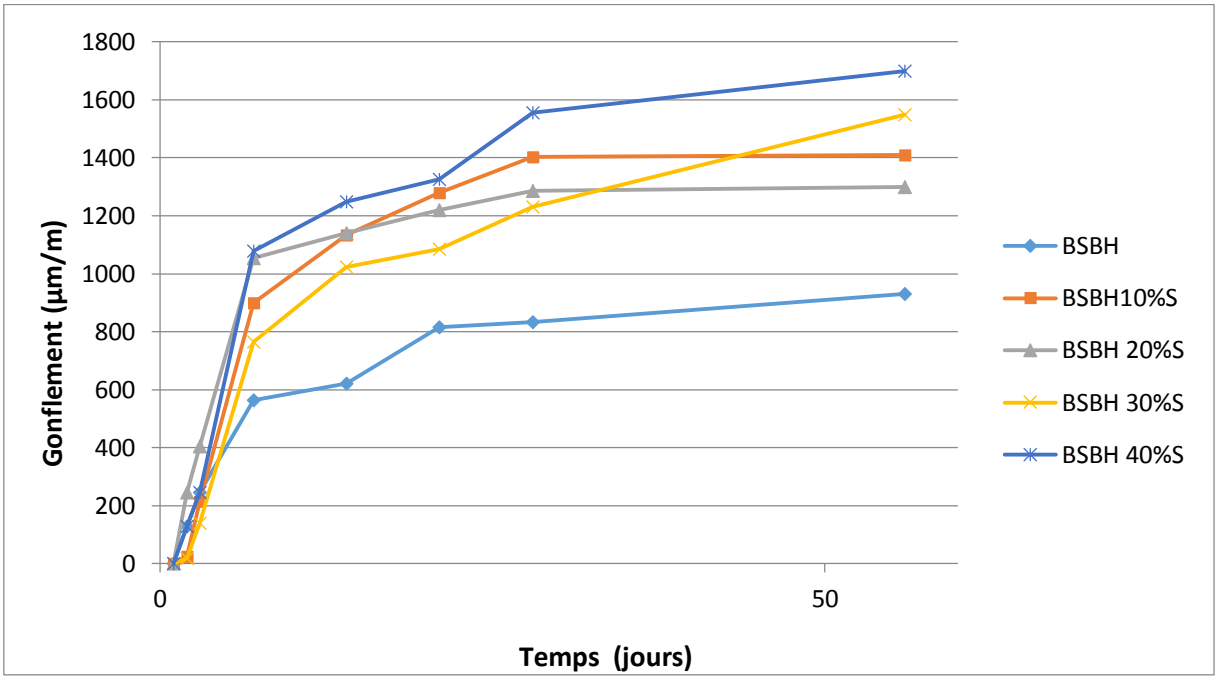


Figure 3.59: gonflement des bétons BSBHS.

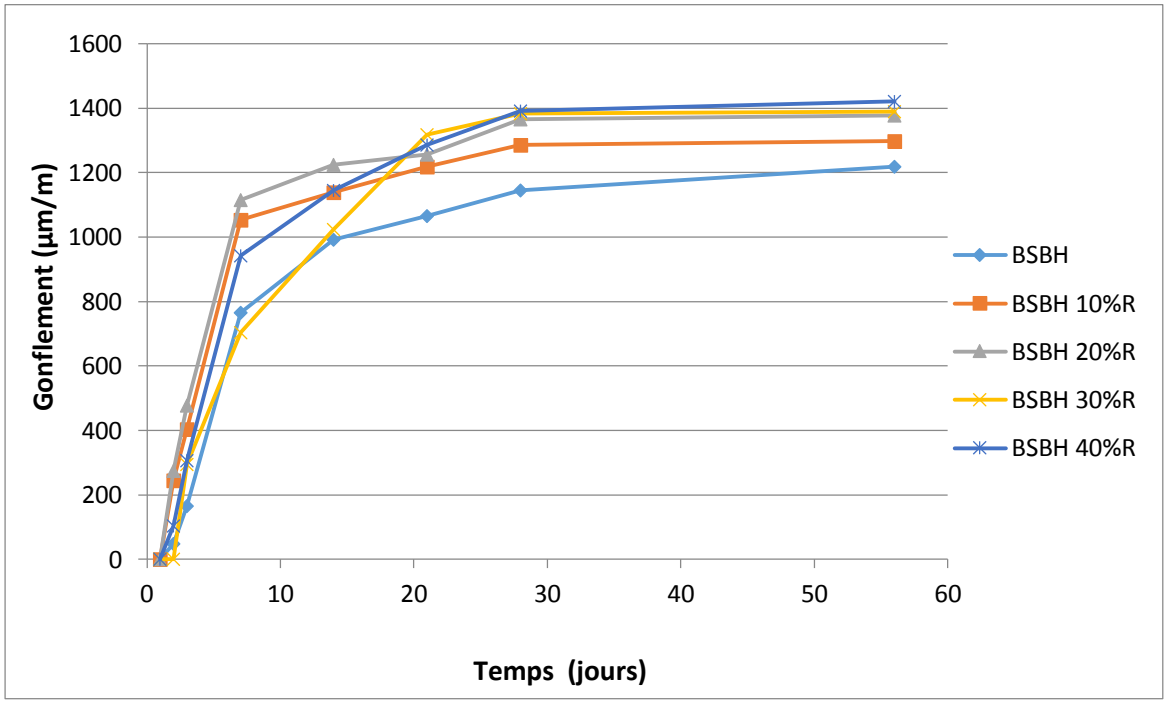


Figure 3.60 : gonflement des bétons BSBHR.

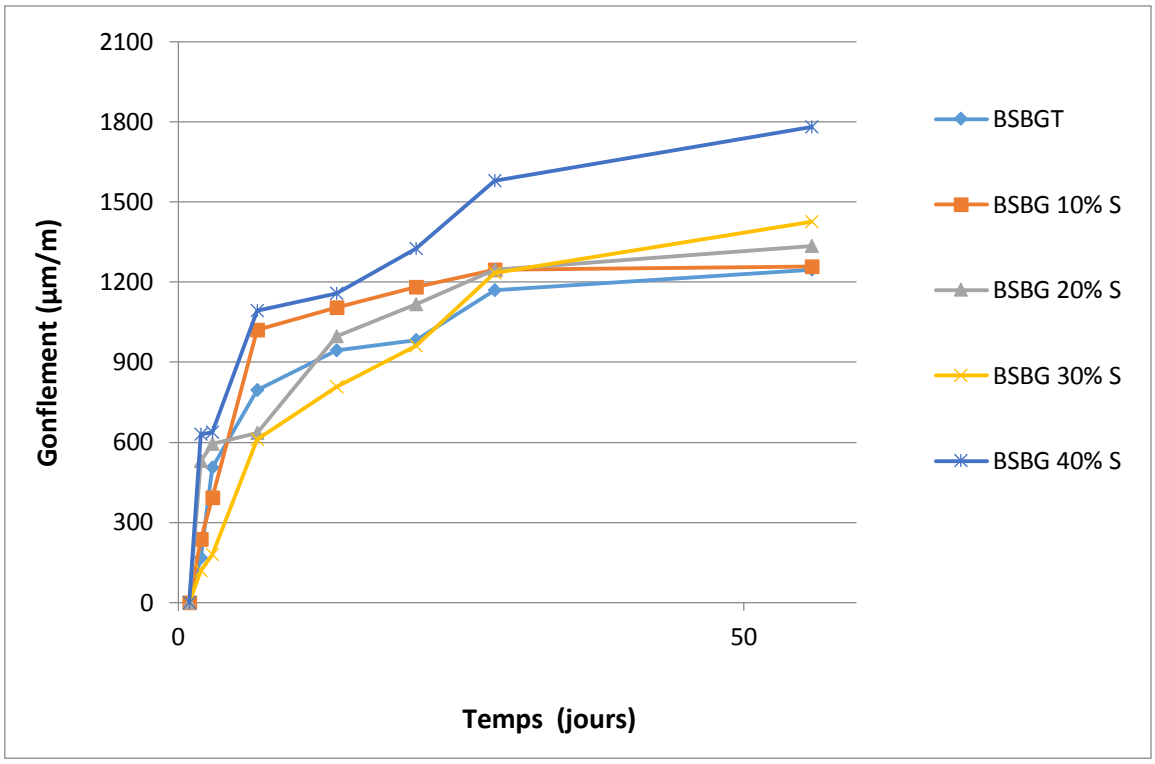


Figure 3.61 : gonflement des bétons BSBGS.

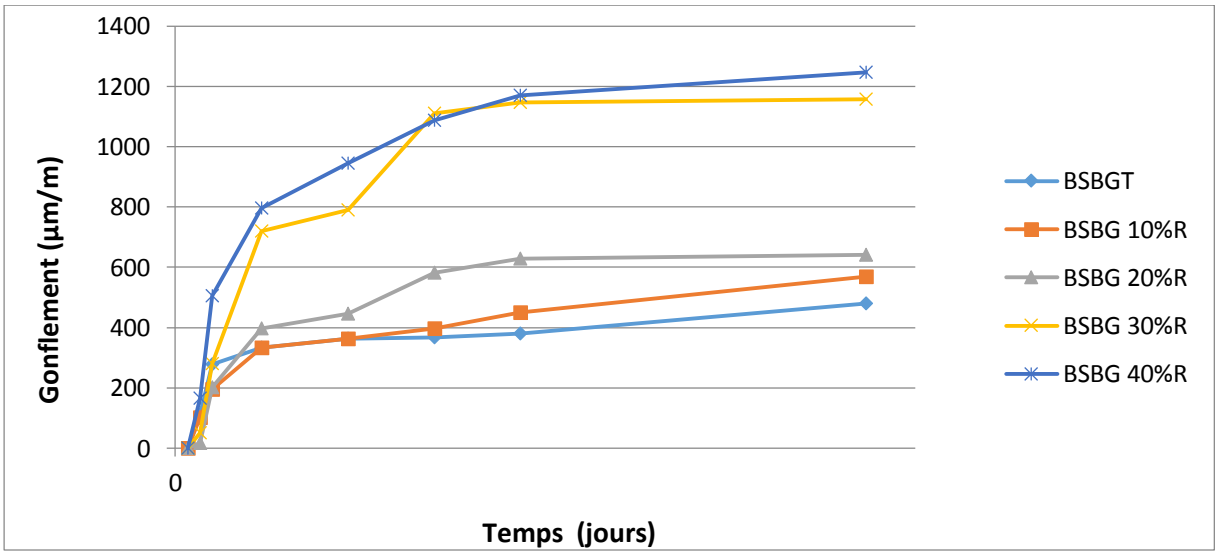


Figure 3.62: gonflement des bétons BSBGR.

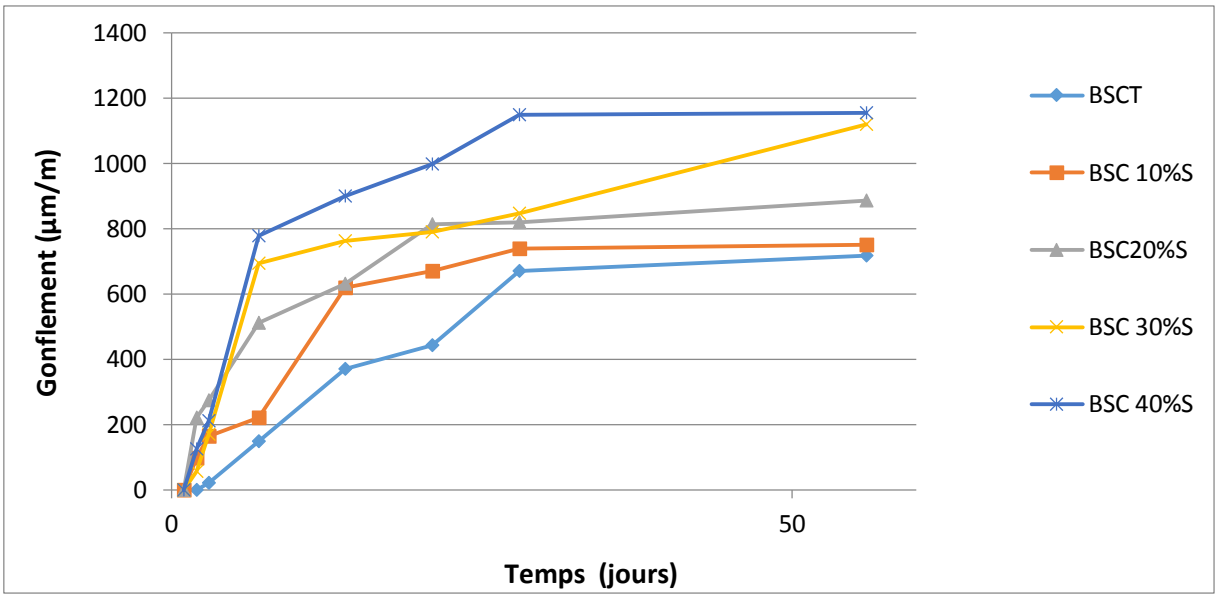


Figure 3.63 : gonflement des bétons BSCS.

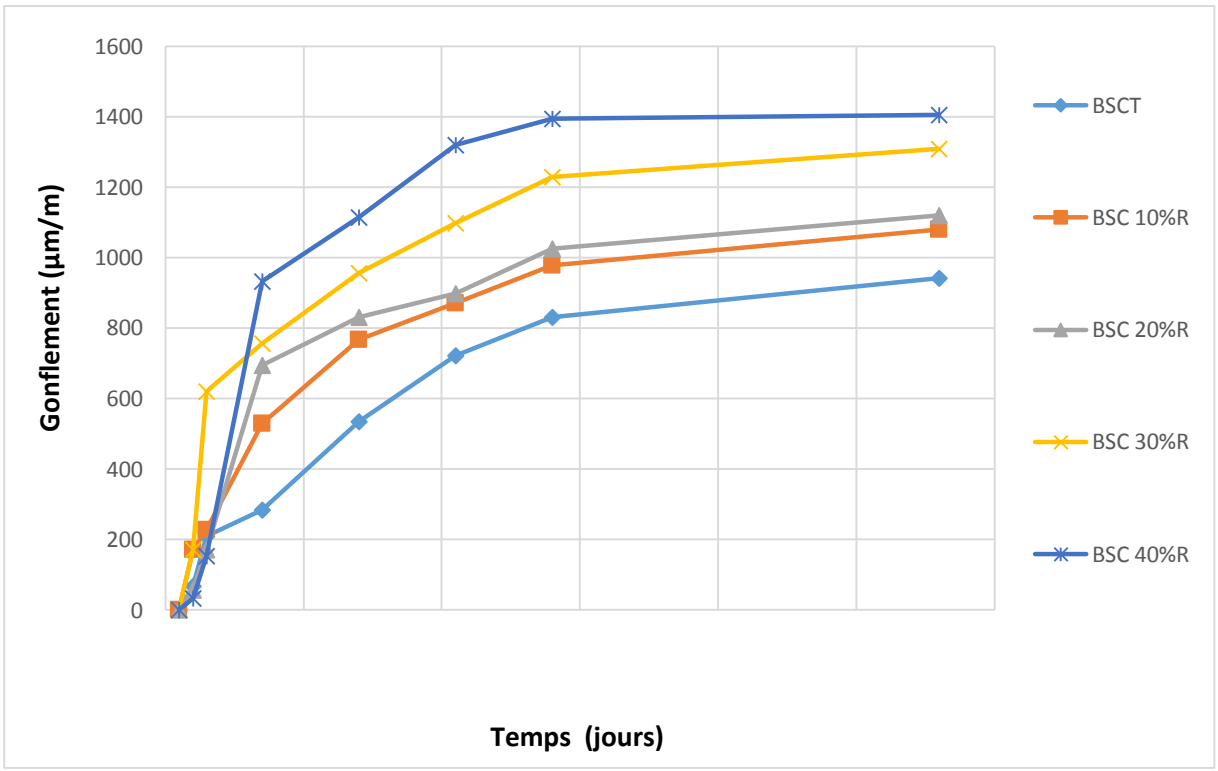


Figure 3.64 : gonflement des bétons BSCR.

Comme le retrait les résultats obtenus ici montrent que tous les types de béton ont des gonflements sous eau très important par rapport au béton témoin et on remarque que plus le

pourcentage de déchets (souple et rigide) augmente plus le gonflement augmente aussi. Les figures ci-dessus indiquent aussi que BSBGS et les BSBHS présentent des taux de gonflement plus grand que les autres types des BS.

III.4.3 Mesure des variations de masse

A. Perte de masse

La perte de masse des déférents bétons est illustrée dans les figures de 3.65 à 3.72 suivantes :

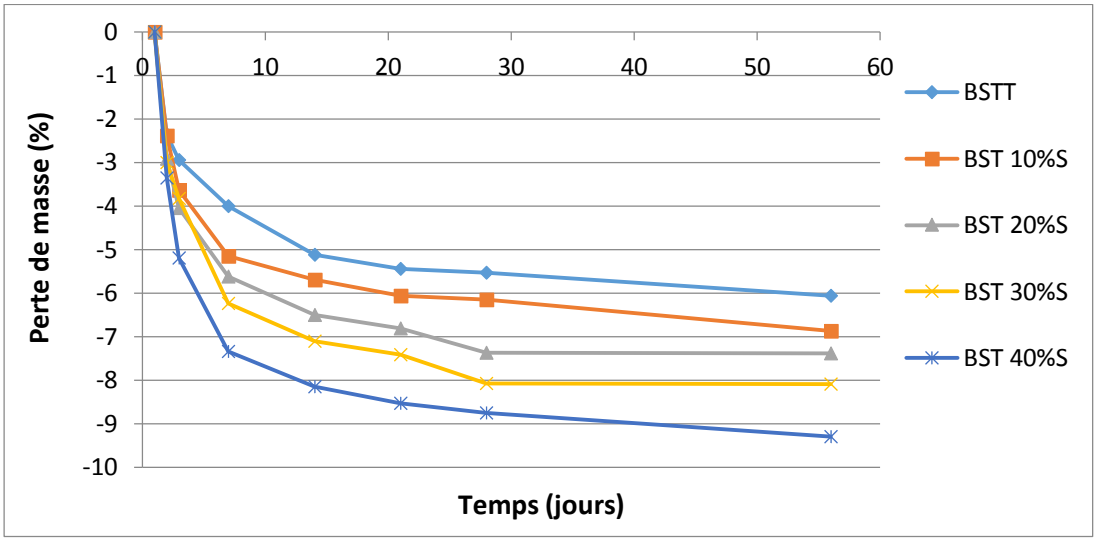


Figure 3.65: Perte de masse des bétons BSTS

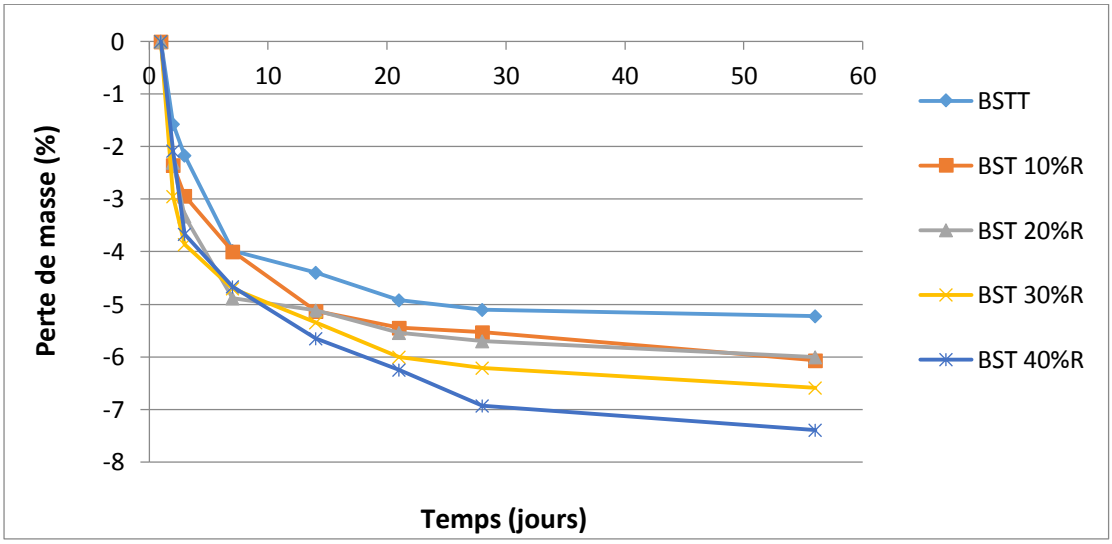


Figure 3.66: Perte de masse des bétons BSTR

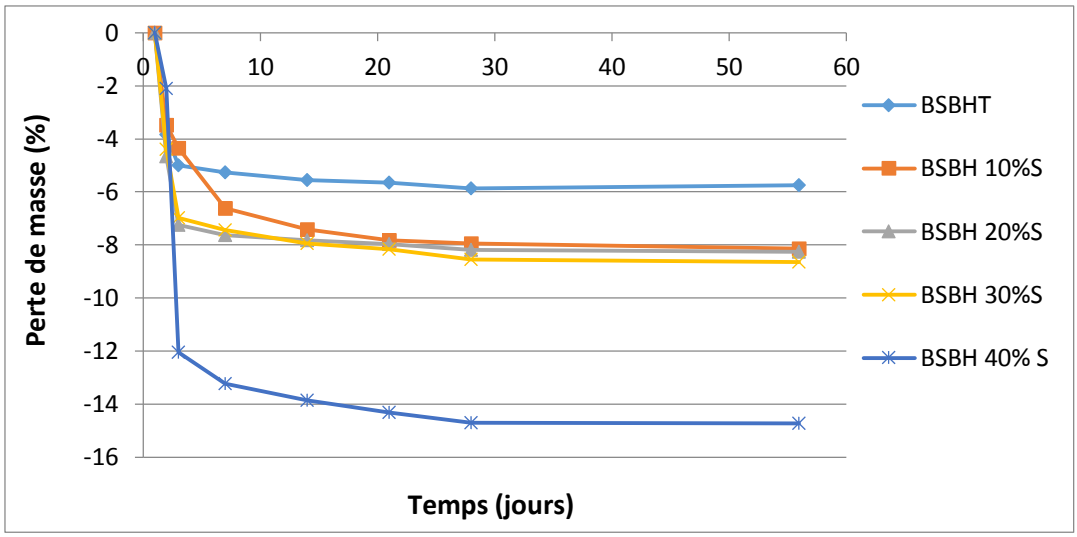


Figure 3.67 : Perte de masse des bétons BSBHS

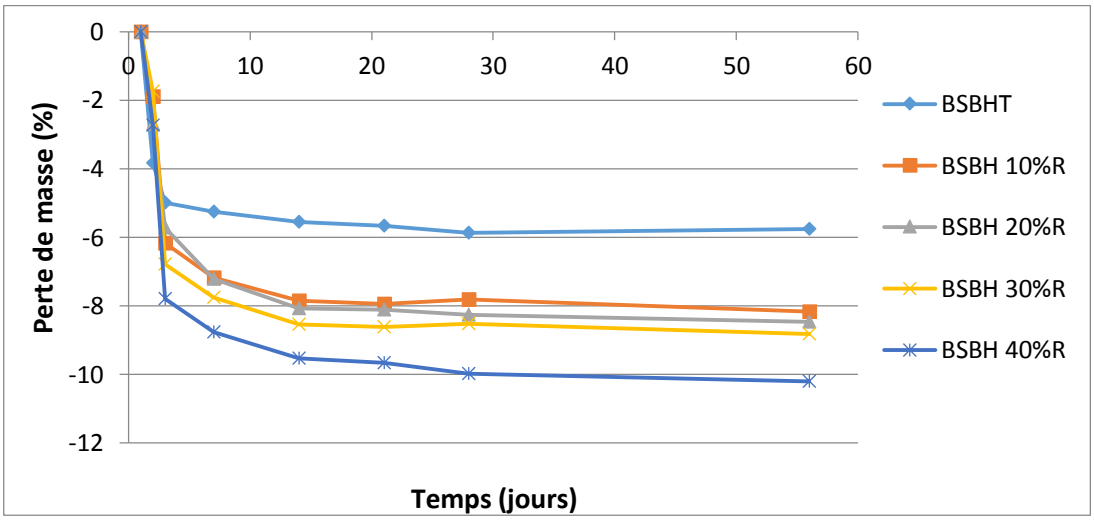


Figure 3.68 : Perte de masse des bétons BSBHR

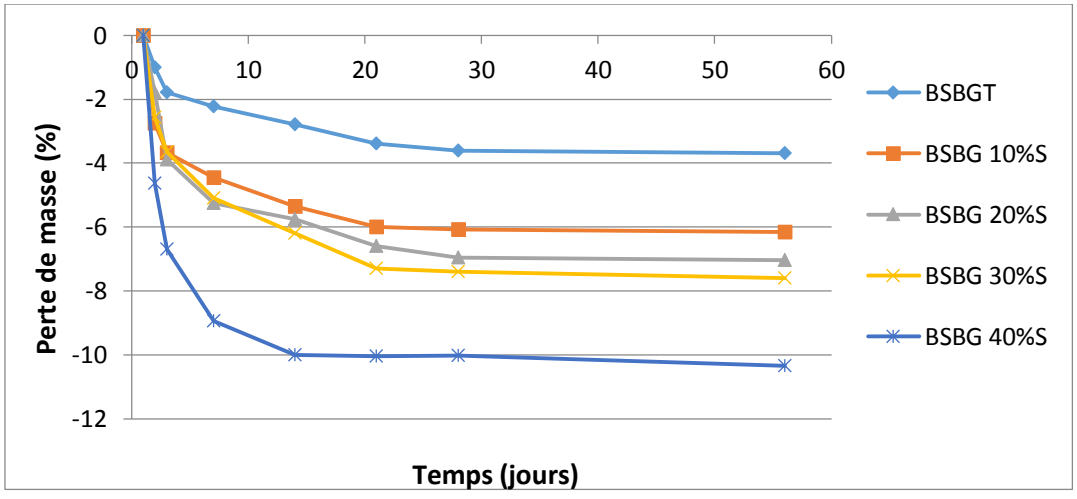


Figure 3.69 : Perte de masse des bétons BSBGS

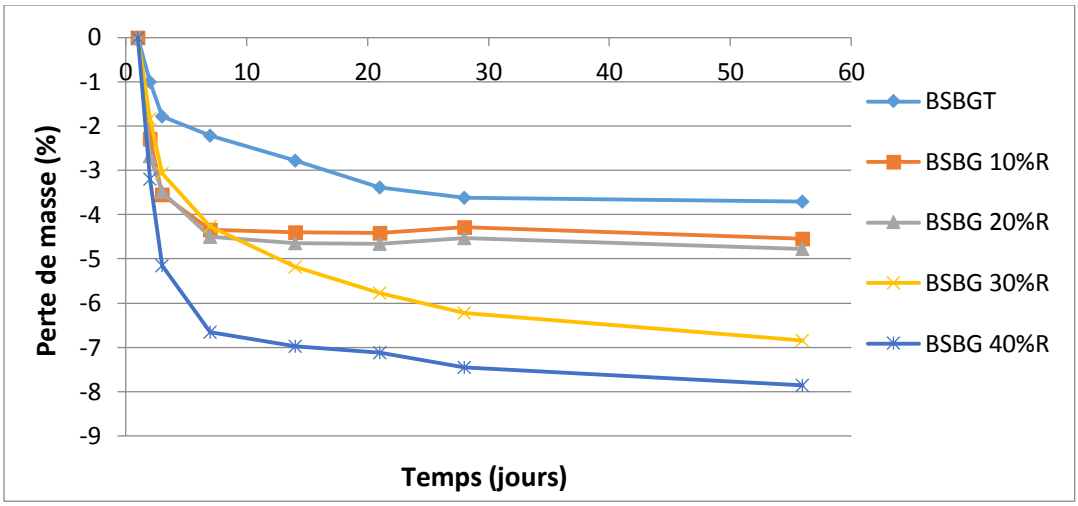


Figure 3.70 : Perte de masse des bétons BSBGR

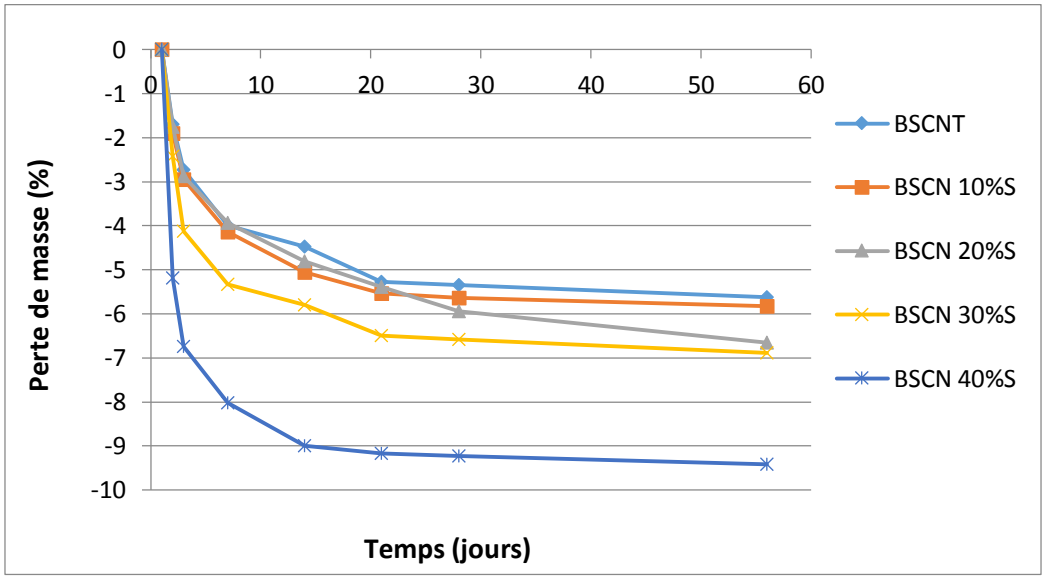


Figure 3.71 : Perte de masse des bétons BSCS

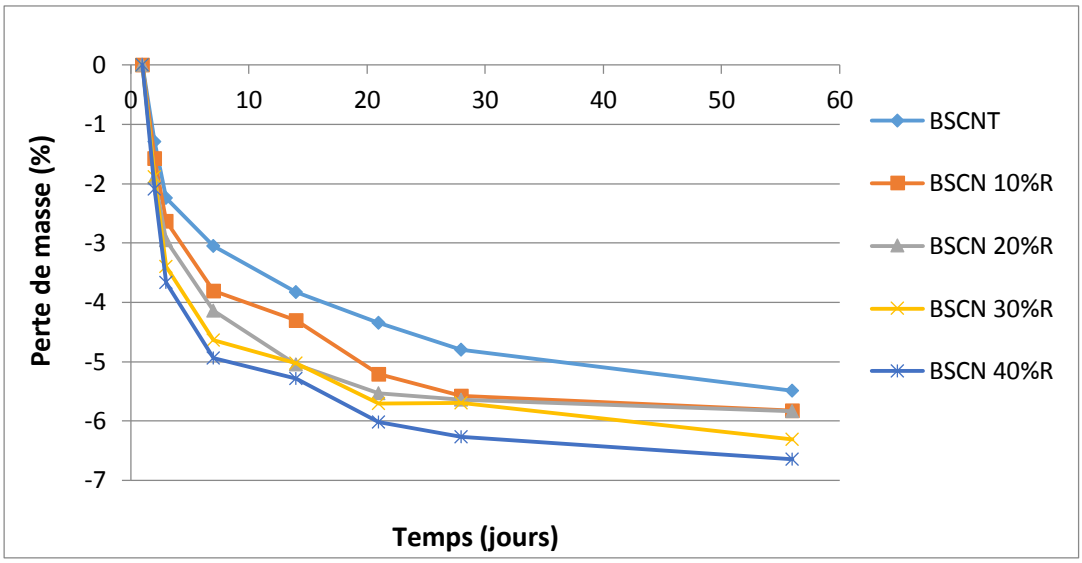


Figure 3.72 : Perte de masse des bétons BSCR

D'après les figures précédente on remarque que la perte de masse de tous les types du béton de sable augmente en fonction d'augmentation des pourcentages de déchet de caoutchouc (souple et rigide).On remarque aussi que la perte des bétons à base de déchets de semelles souple et plus grand que celle des bétons de déchets de semelle rigide. Ces résultats confirment les résultats trouvés par Sukontasukkul et Chaikaew [102] qui ont trouvé que la perte de masse du béton courant augmente avec le dosage des granulats de caoutchouc. Incorporant des granulats de caoutchouc est plus faible par rapport à celle du bloc de béton de référence.

B. Gain de masse

Le gain de masse des déférents bétons est illustré dans les figures de 3.73 à 3.80 ci-dessous :

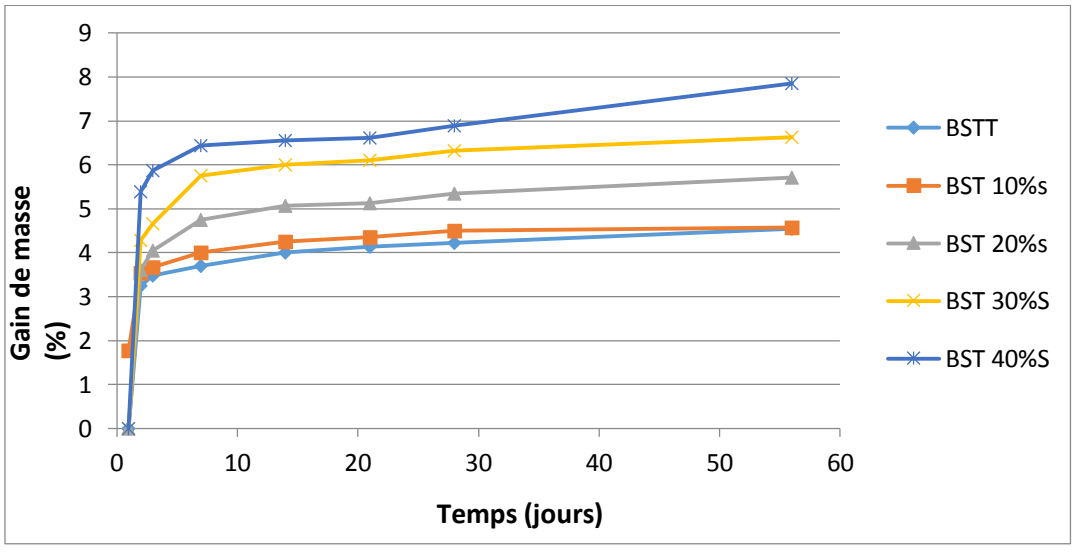


Figure 3.73 : gain de masse des bétons BSTS

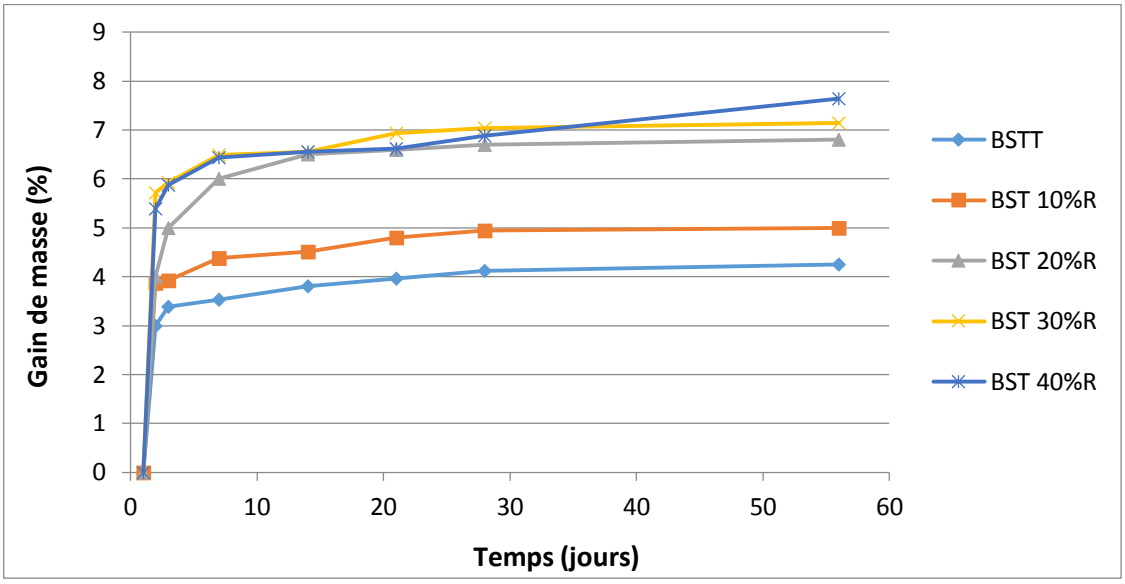


Figure 3.74 : gain de masse des bétons BSTR

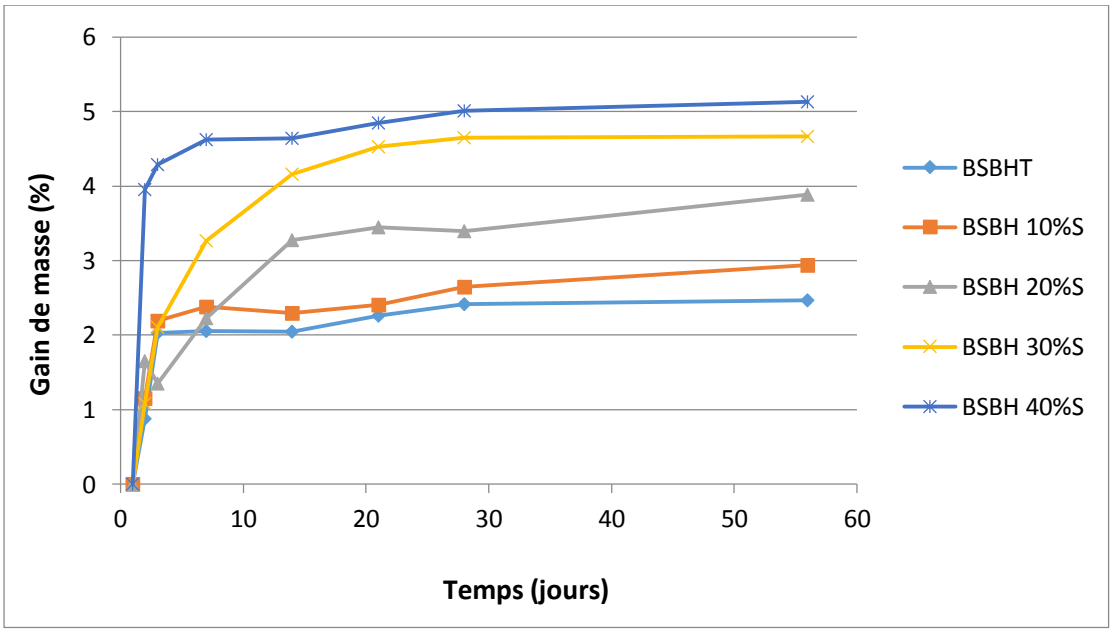


Figure 3.75: gain de masse des bétons BSBHR

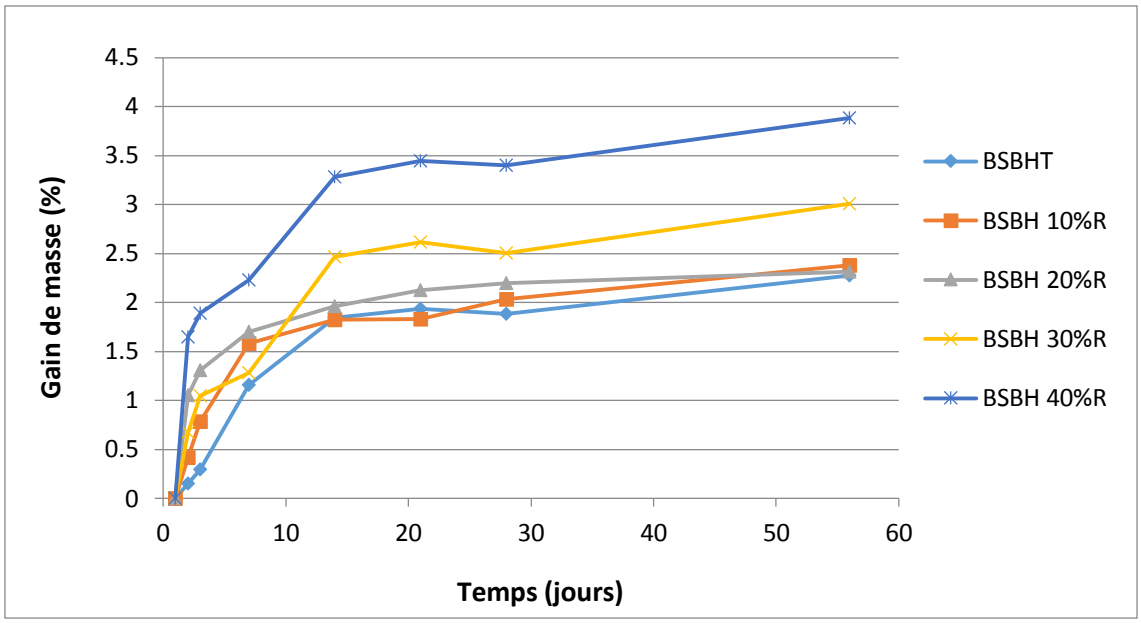


Figure 3.76 : gain de masse des bétons BSBHR

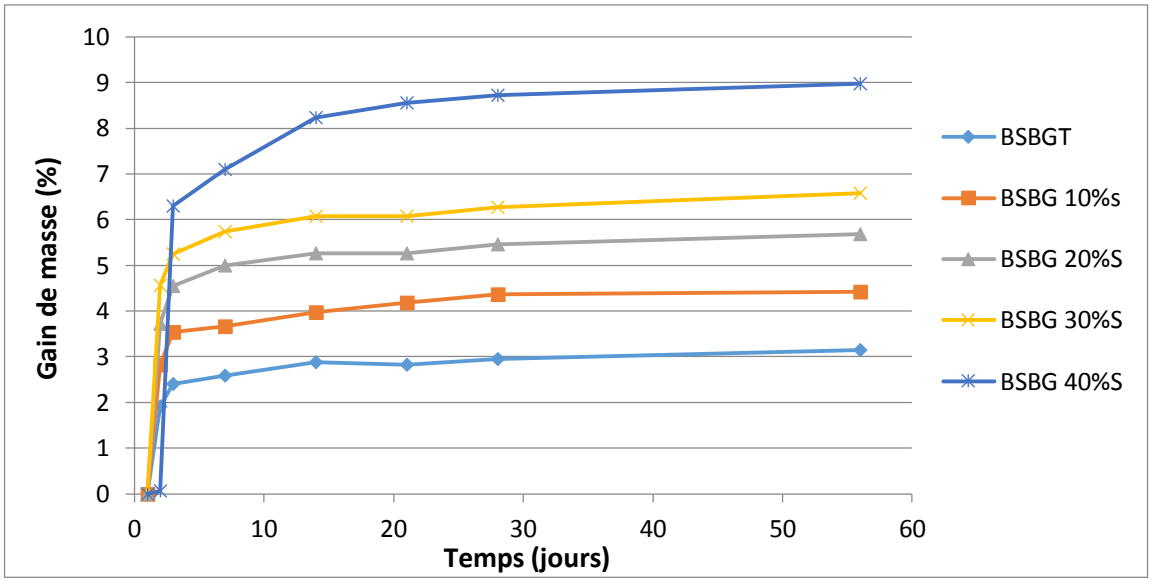


Figure 3.77 : gain de masse des bétons BSBGS

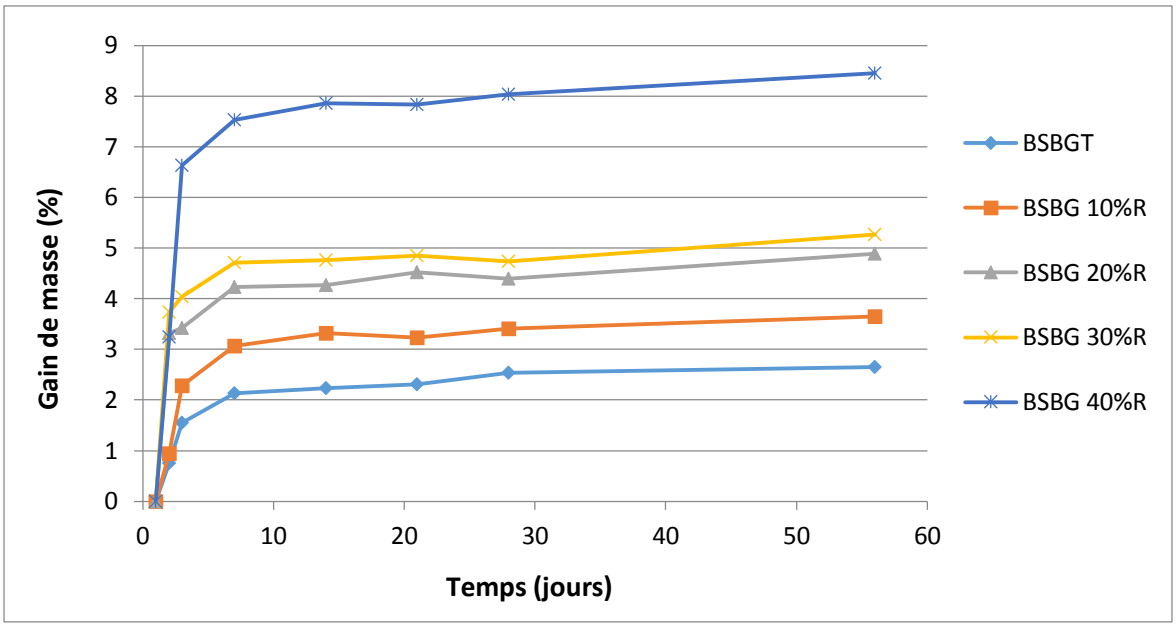


Figure 3.78: gain de masse des bétons BSBGR

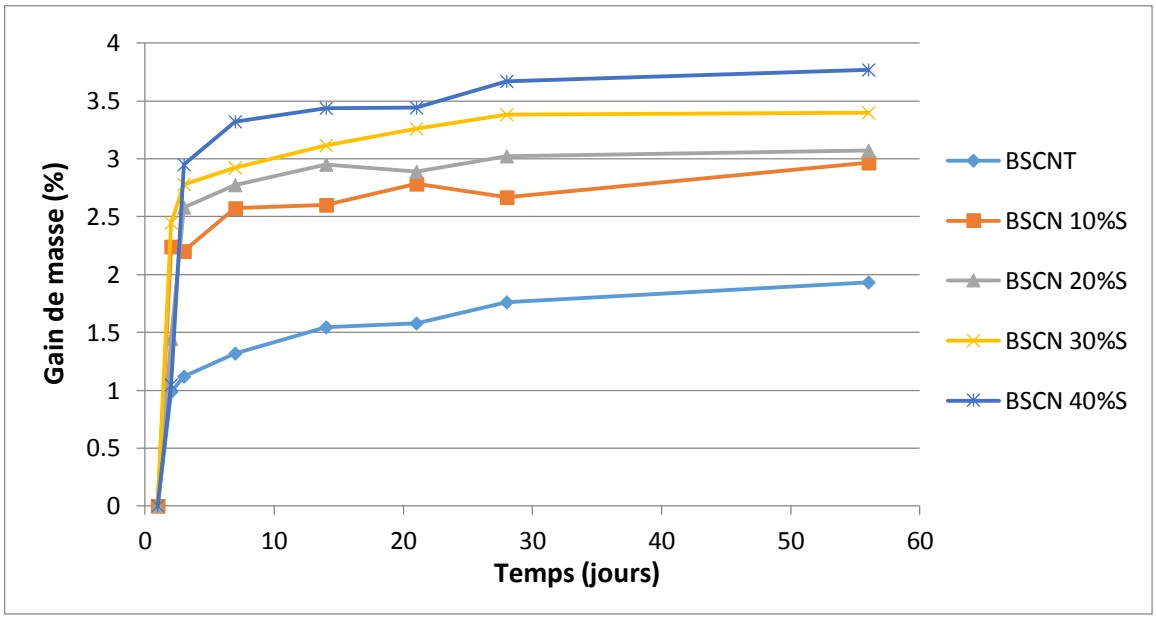


Figure 3.79 : gain de masse des bétons BSCN

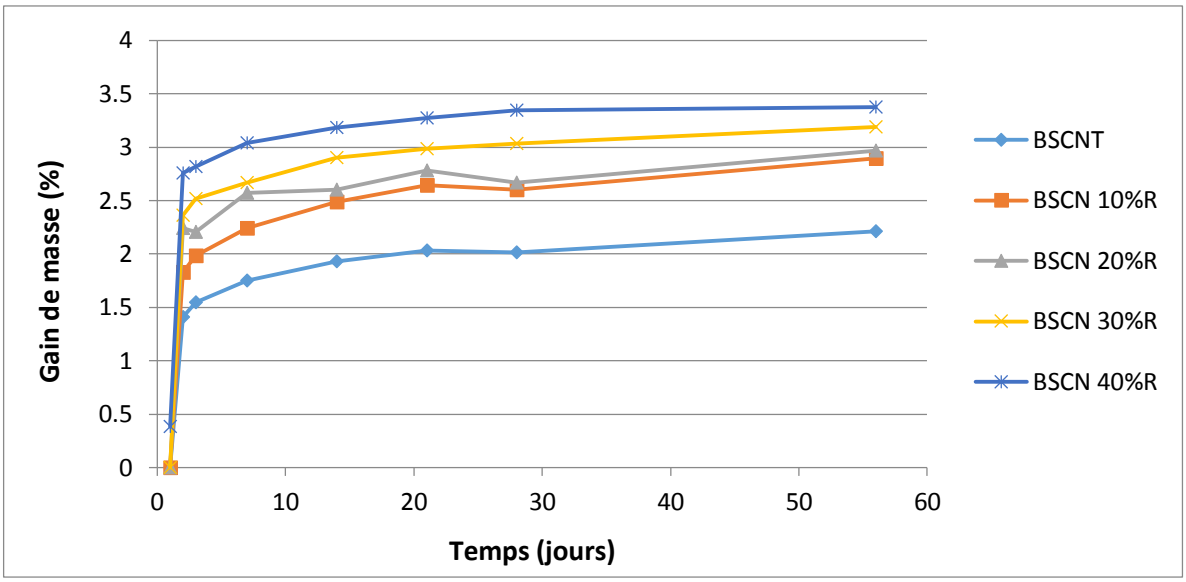


Figure 3.80 : gain de masse des bétons BSCR

Les résultats obtenus dans les figures ci-dessus montrent que le gain de masse des bétons de sable augmente avec l'incorporation de déchet de caoutchouc (souple et rigide).On remarque aussi que le gain de masse des bétons à base de déchets de semelles souple et plus grand que celle des bétons de déchets de semelle rigide.

III.4.4 Propriétés thermiques

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques obtenues décrite et identifiée dans les figures de 3.81 à 3.84 comme suit :

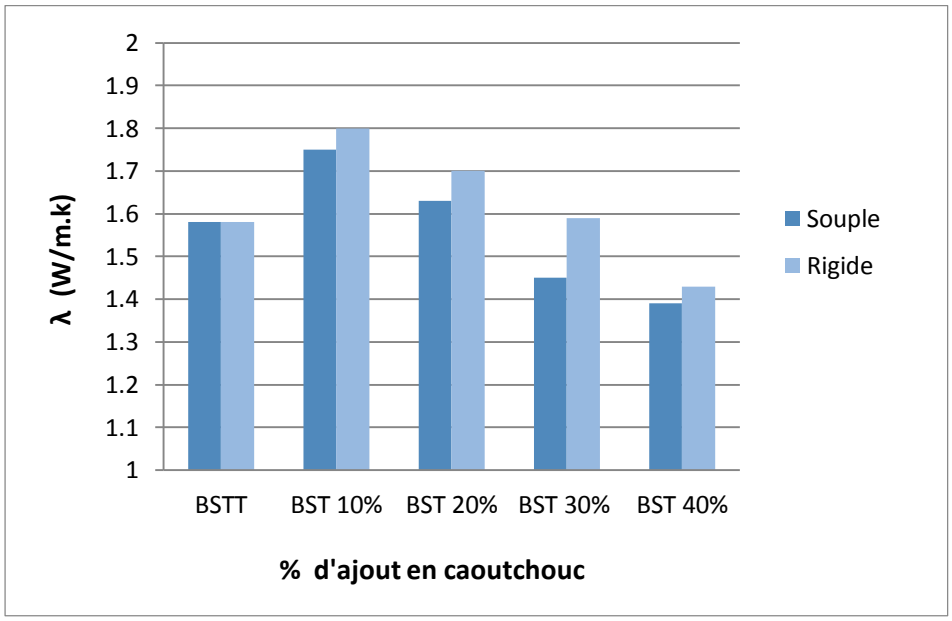


Figure 3.81 : La conductivité thermique des bétons à base de sable de Tamenrasset

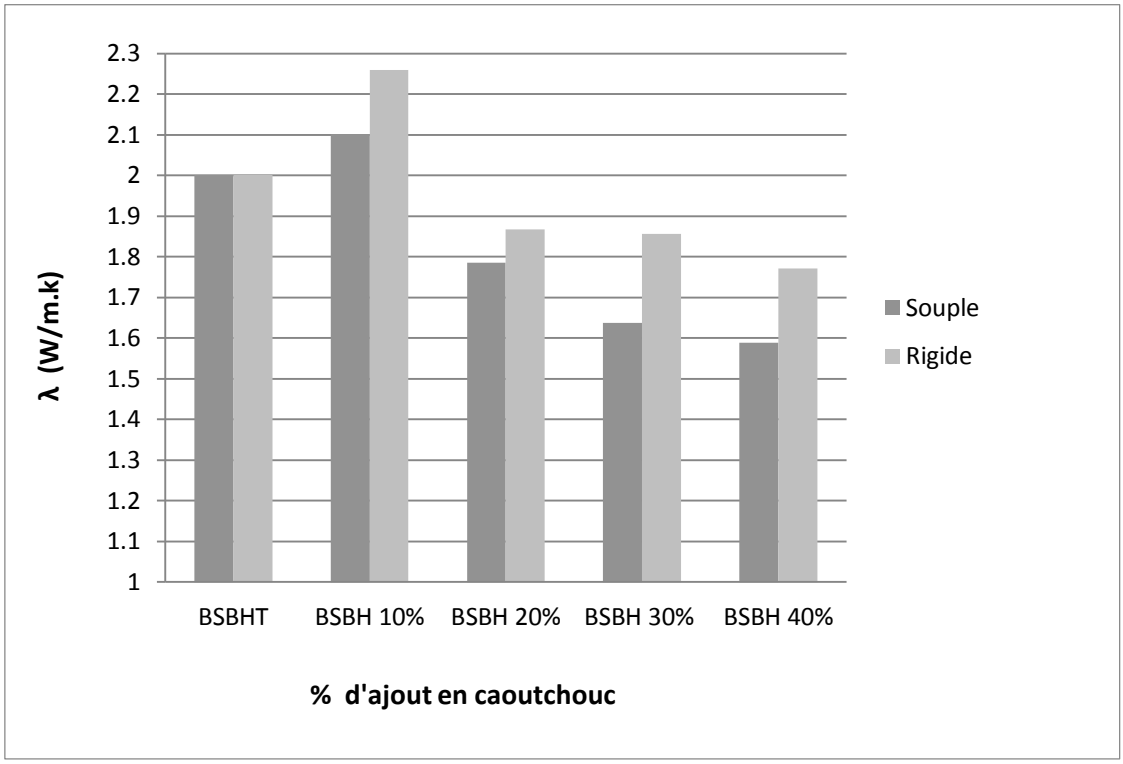


Figure 3.82 : La conductivité thermique des bétons à base de sable de Bahbah

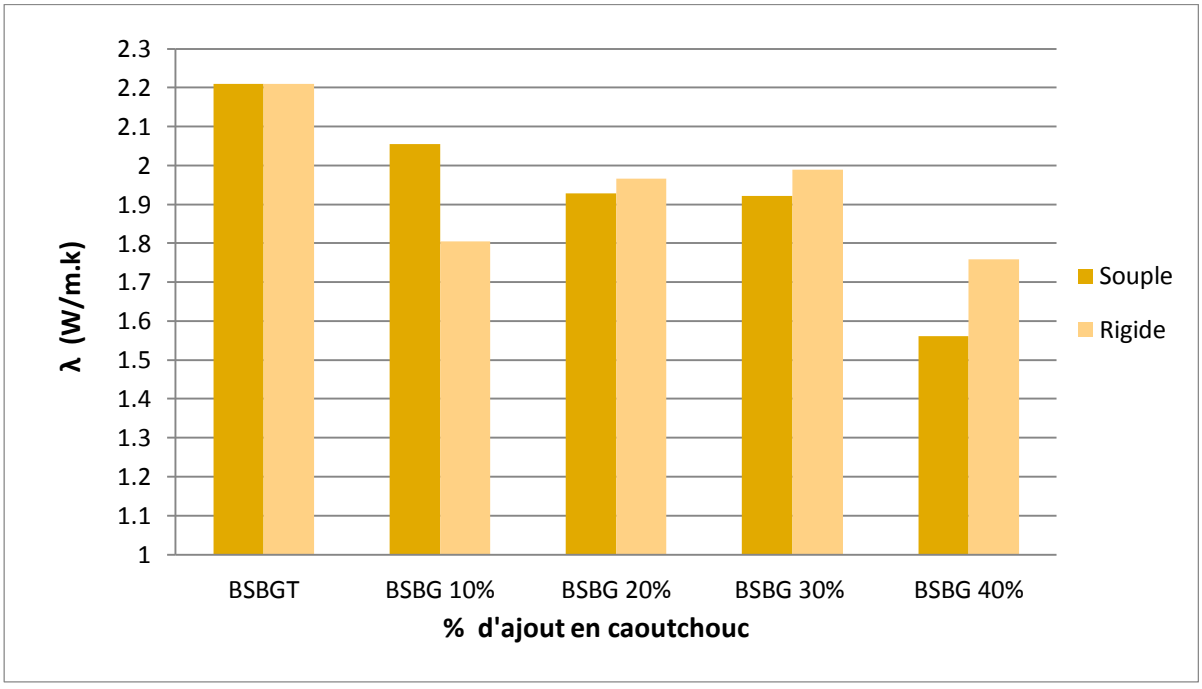


Figure 3.83 : La conductivité thermique des bétons à base de sable de Boughezoul

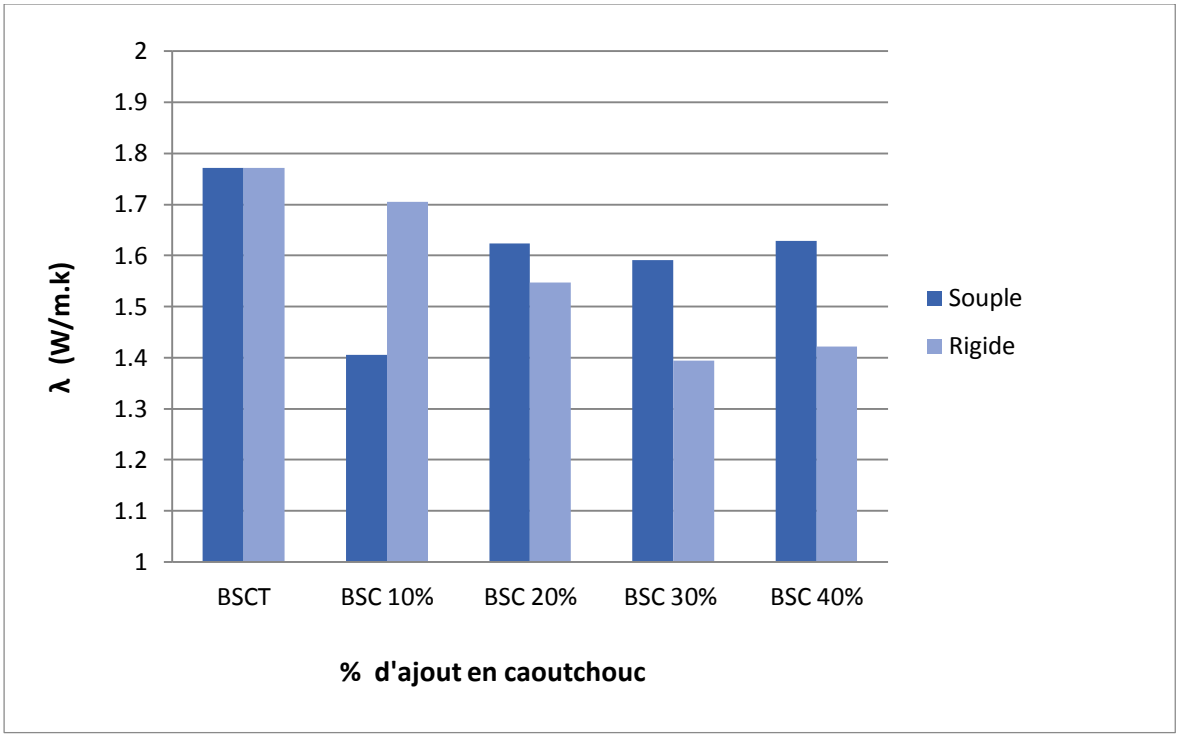


Figure 3.84 : La conductivité thermique des bétons à base de sable concassé

Les résultats obtenus dans figures ci-dessus montrent que la conductivité thermique des bétons de sable diminue avec l'augmentation de pourcentage de caoutchouc (souple et rigide).Cette diminution est varié d'un BS à l'autre, par exemple, la présence de déchets de semelle rigide dans un béton de sable de concassage BSC entraîne une réduction de la conductivité thermique de 20% lorsque l'on passe du béton de référence au béton incorporant 40% de déchets de semelle rigide. Les résultats obtenus indiquent aussi que le béton de sable Tamanrasset à base de 40% de déchets de semelle souple et rigide a une faible conductivité thermique par rapport aux autres types de béton de sable. Des exceptions ont été enregistrées pour les BSBH 10% S, BSBH 10% R, BST 10% S et BSBH 10% R, qui présente une légère augmentation par rapports au béton de sable de référence.

Ce changement peut s'expliquer par l'influence concomitante de plusieurs facteurs :

Dans un premier temps, on peut citer les caractéristiques des constituants du composite. Même avec les seuls granulats naturels, il est bien connu que leur nature minéralogique affecte grandement la conductivité thermique du béton [53].Plus la conductivité thermique du granulat est faible, plus faible sera celle du béton confectionné avec. En effet, le caoutchouc représente une structure amorphe et sa conductivité thermique de l'ordre de 0,4 W/m°C [101] est faible devant celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité

thermique généralement supérieure à 1,5 W/m°C. Un autre facteur qui rentre en jeu est la porosité du béton et cette porosité est plus importante avec l'adjonction de G.C. L'air ayant une conductivité thermique beaucoup plus faible (0,023 W/m°C) remplit les pores du béton et limite la conduction de la chaleur. Nous rappelons que ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Benazzouk [54]. D'après cet auteur, l'air entraîné lors du malaxage conduit à une porosité fermée dans la matrice cimentaire ce qui améliore encore les performances d'isolation du composite cimentaire incorporant des G.C.

Une tendance générale relevée par de nombreux auteurs comme Gül et al. [99], Blanco et al. [100] ou Demirboğa et Gül [99] est que la conductivité thermique du béton diminue avec la réduction de sa densité. On peut étendre cette conclusion aux bétons incorporant des G.C. tout en gardant à l'esprit que dans ce dernier cas, la chute de la densité n'est pas seulement due à l'augmentation de la porosité, mais aussi à la faible densité du caoutchouc.

III.4.5 La résistance au feu

A. La perte de masse

Les résultats obtenus sur la perte de masse après le chauffage des éprouvettes à 200et 600 C° sont représenté sur les figures de 3.85 à 3.92 suivantes :

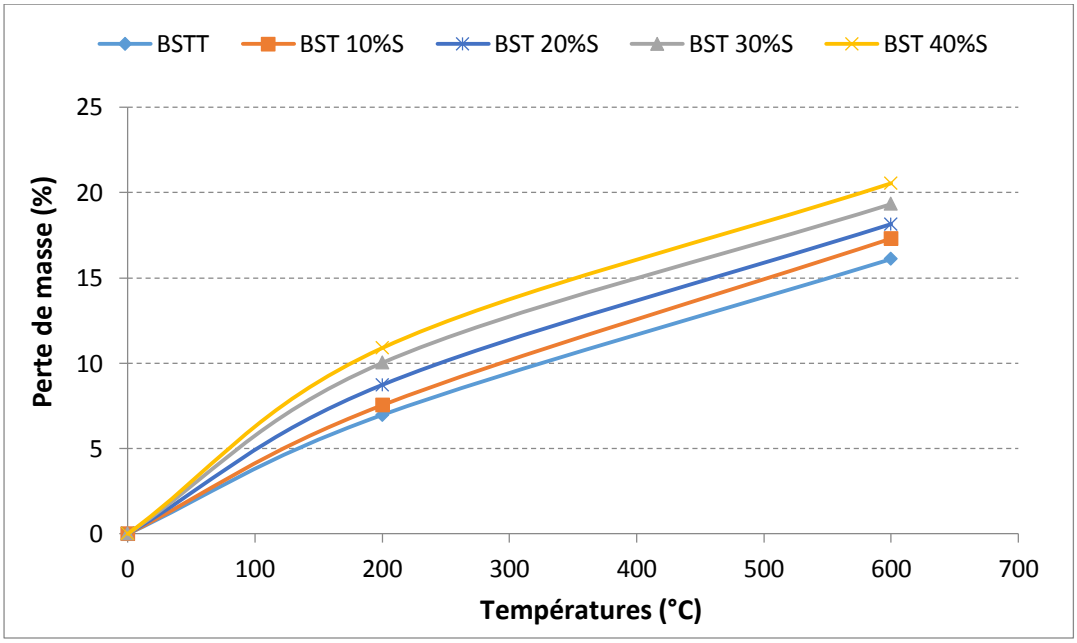


Figure 3.85 Perte de masse des BSTS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

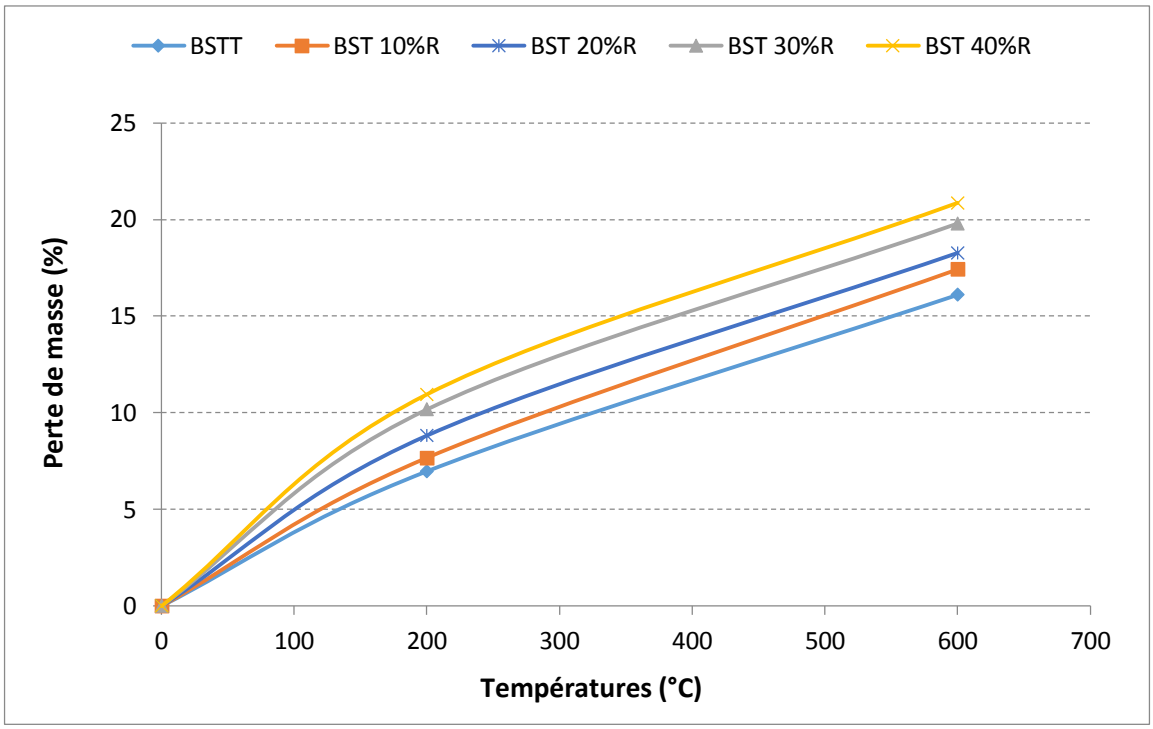


Figure 3.86 Perte de masse des BSTR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

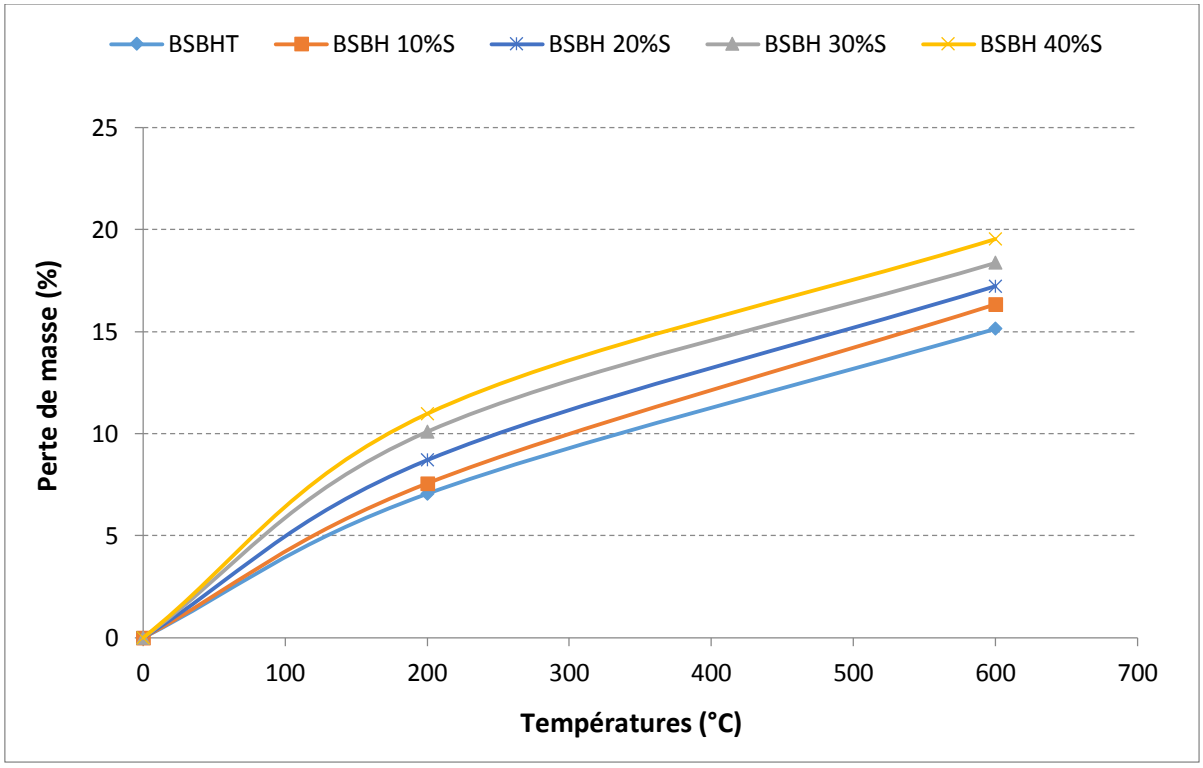


Figure 3.87 Perte de masse des BSBHS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

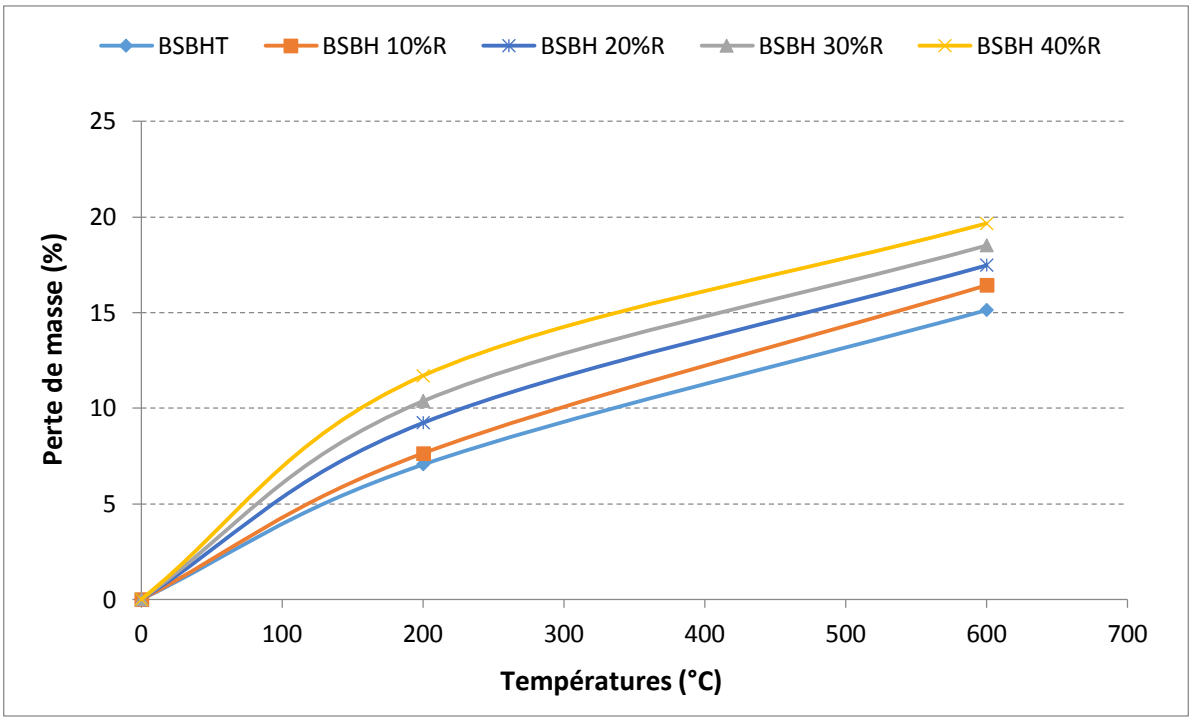


Figure 3.88 Perte de masse des BSBHR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

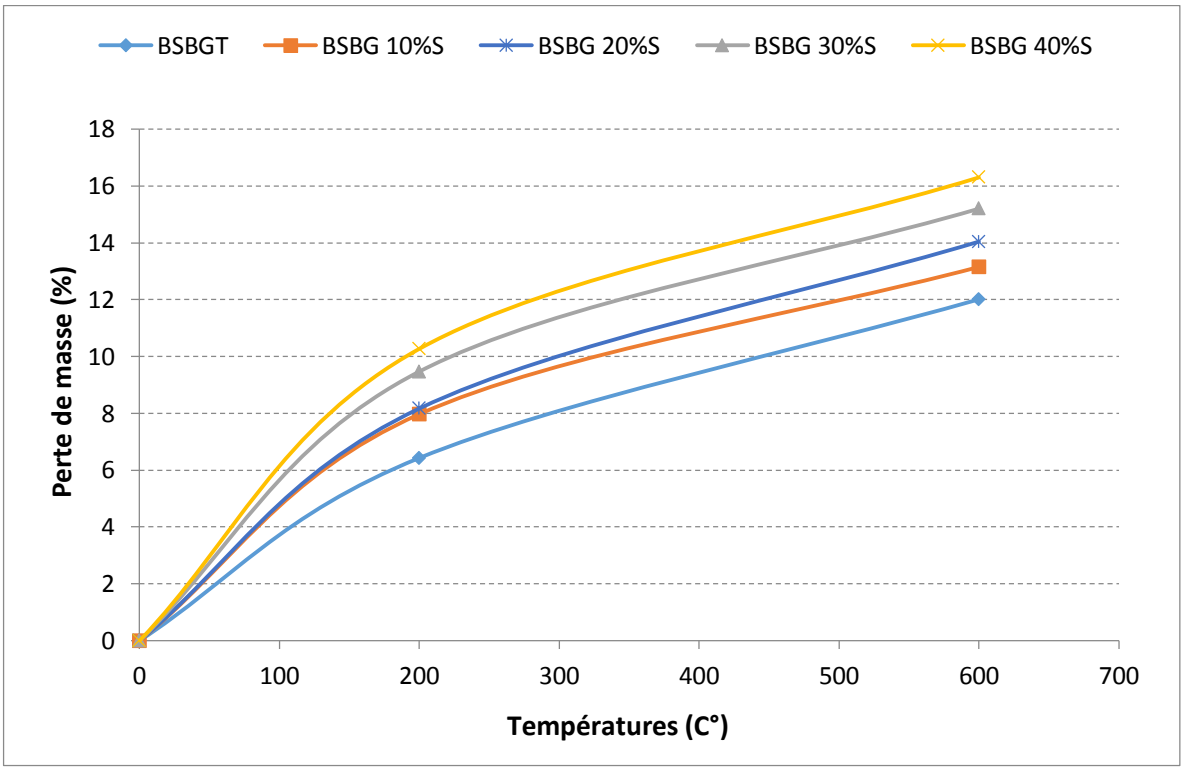


Figure 3.89 Perte de masse des BSBGS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

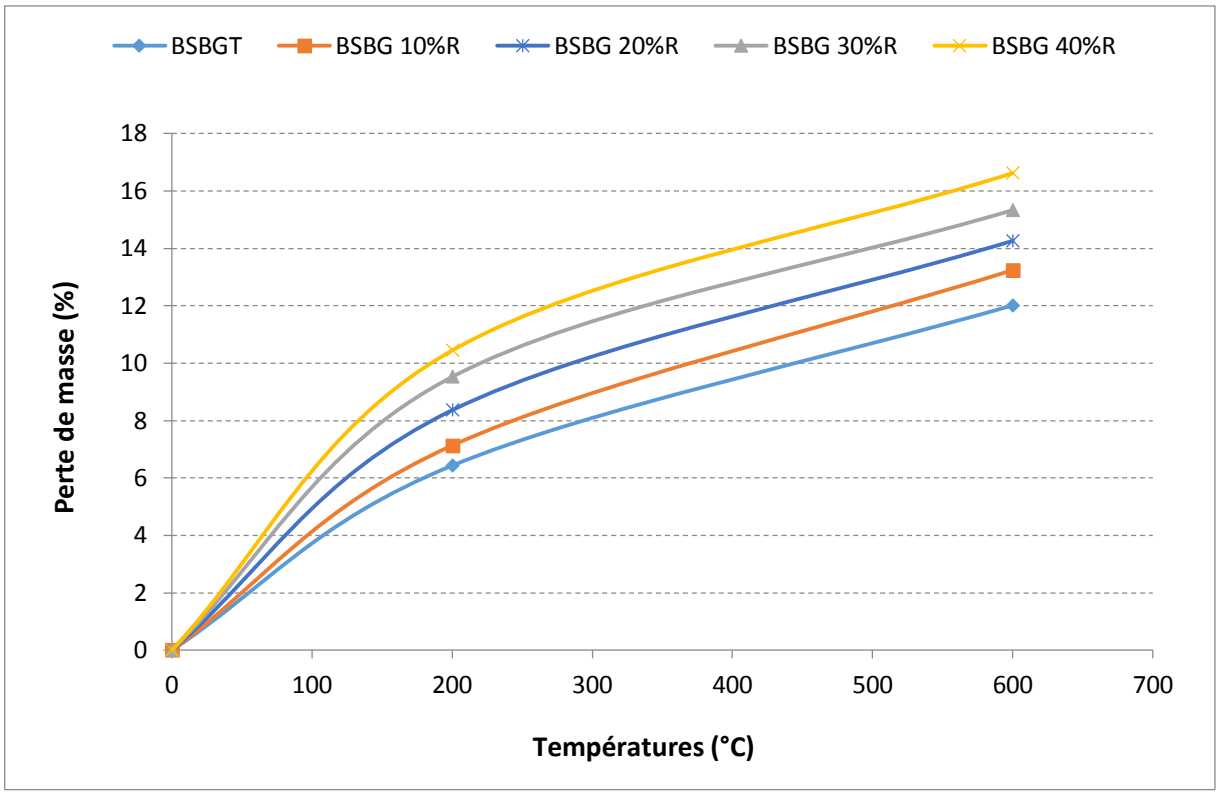


Figure 3.90 Perte de masse des BSBGR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

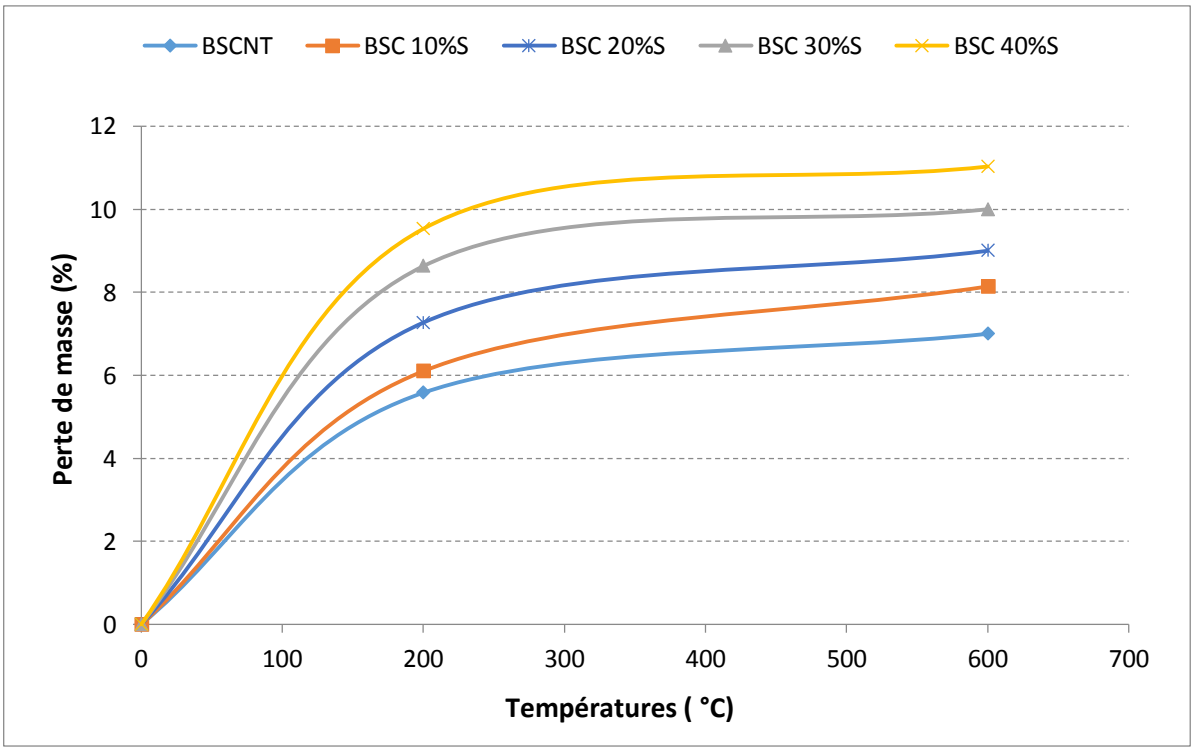


Figure 3.91 Perte de masse des BSCNS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

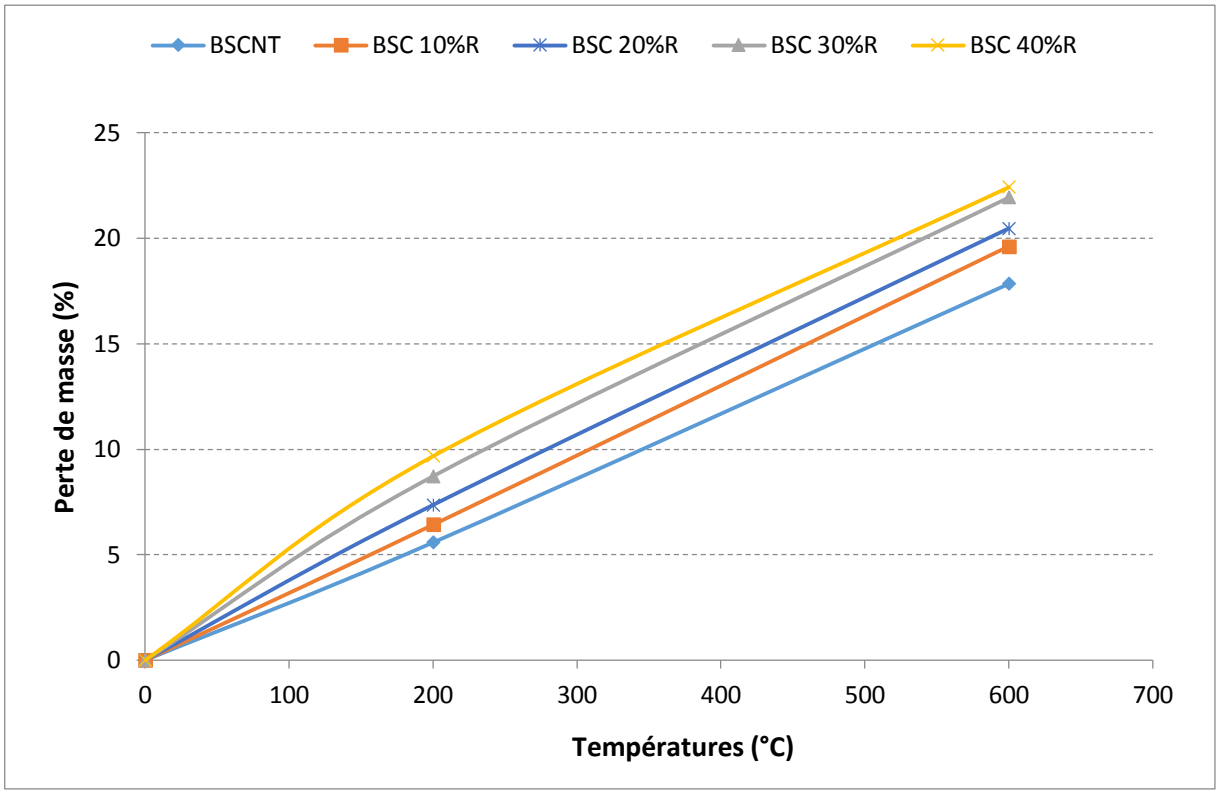


Figure 3.92 Perte de masse des BSCNR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

Les figures précédentes représentent l'évolution de la perte de masse des différents bétons de sable à base de déchets de caoutchouc en fonction de l'élévation de la température . On constate que quel que soit le types de BS et le déchet, la perte de masse est toujours permanente durant l'échauffement de tous les types des bétons de sable, et que la perte de masse des BS à base de déchets de caoutchouc est toujours plus importante que celle du béton de sable de référence. Elle varie entre 10 et 20% pour tous les types des BS .Ces pertes de masse sont dus à la déshydratation progressive du béton, et la fonte des déchets de caoutchouc. Jusqu'à la température de 200°C, l'eau libre et une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'ettringite s'évapore et les pores capillaires sont asséchés, et à 600°C il ne reste qu'une toute petite quantité d'eau 0,2 % dans l'éprouvette de béton, cette eau est absorbée par les granulats, ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [109] qui ont constaté que la masse de béton dans les éprouvettes est toujours diminue avec l'augmentation de la température. GUENDOUZ et al [110] ont trouvé les mêmes résultats pour son étude sur l'effet de l'élévation de la température sur les caractéristiques du béton de sable à base de déchets plastiques.

B. La résistance à la compression

Les résultats obtenus sur la résistance à la compression après le chauffage des éprouvettes à 200 °C, et 600 °C sont représenté sur les figures de 3.93 à 3.100 suivantes :

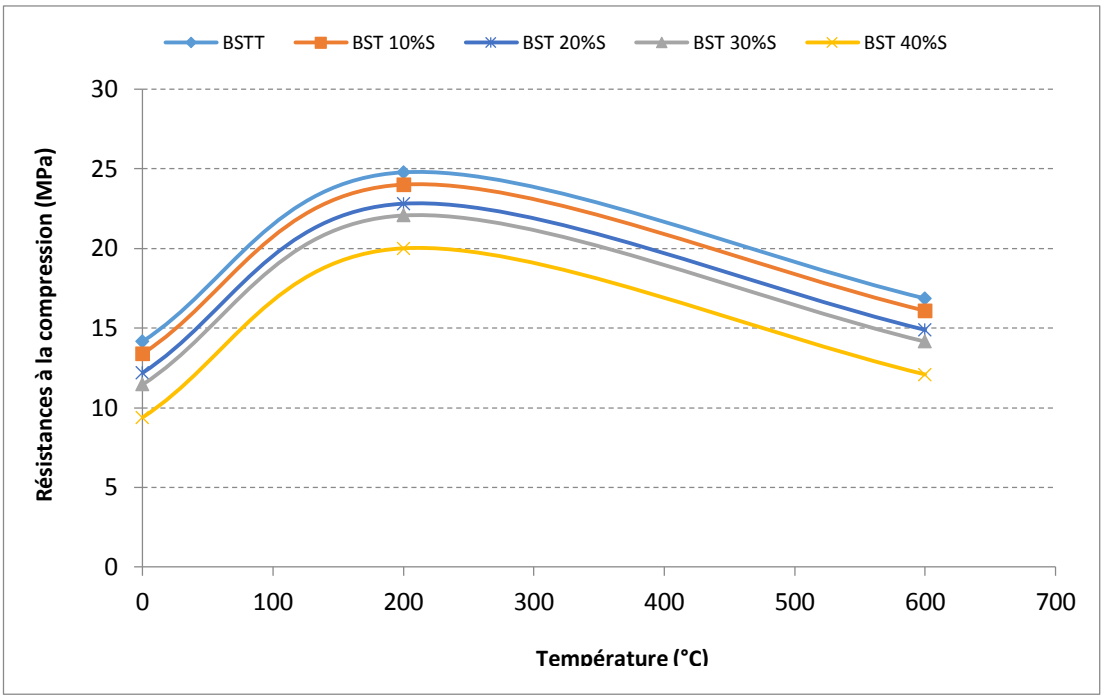


Figure 3.93 : Résistance à la compression des BSTS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

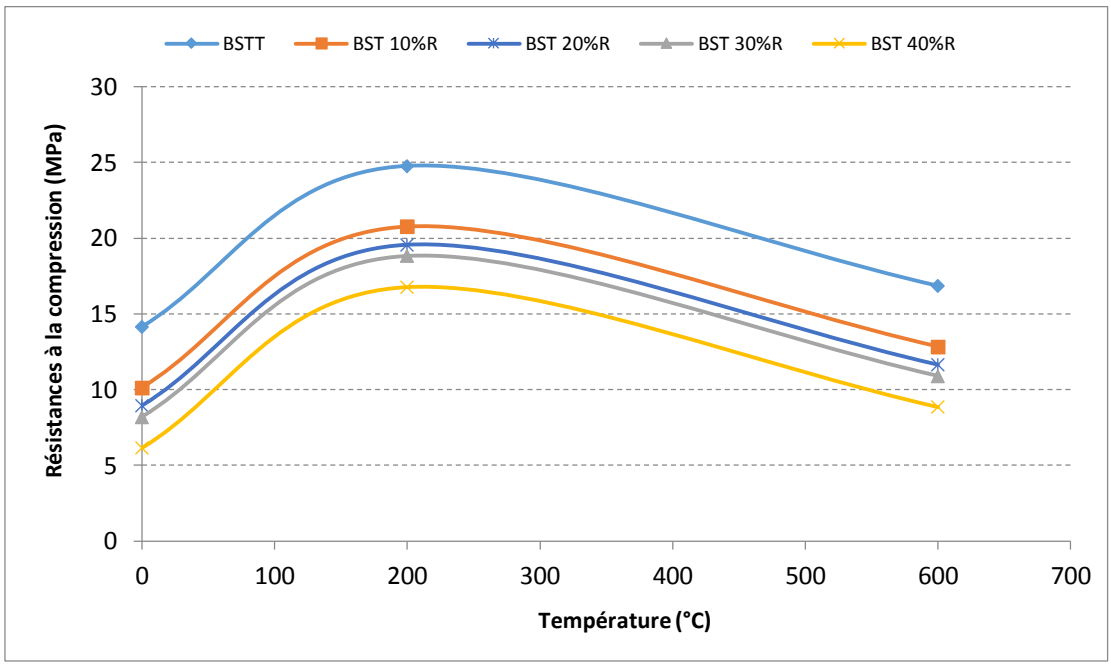


Figure 3.94 : Résistance à la compression des BSTR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

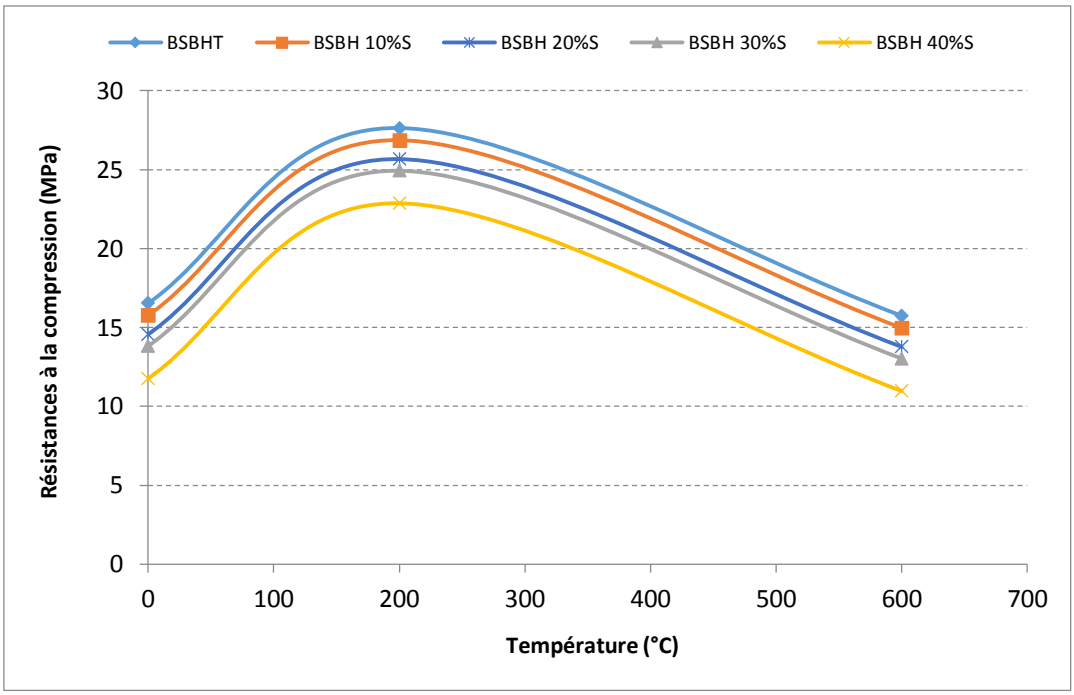


Figure 3.95 : Résistance à la compression des BSBHS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

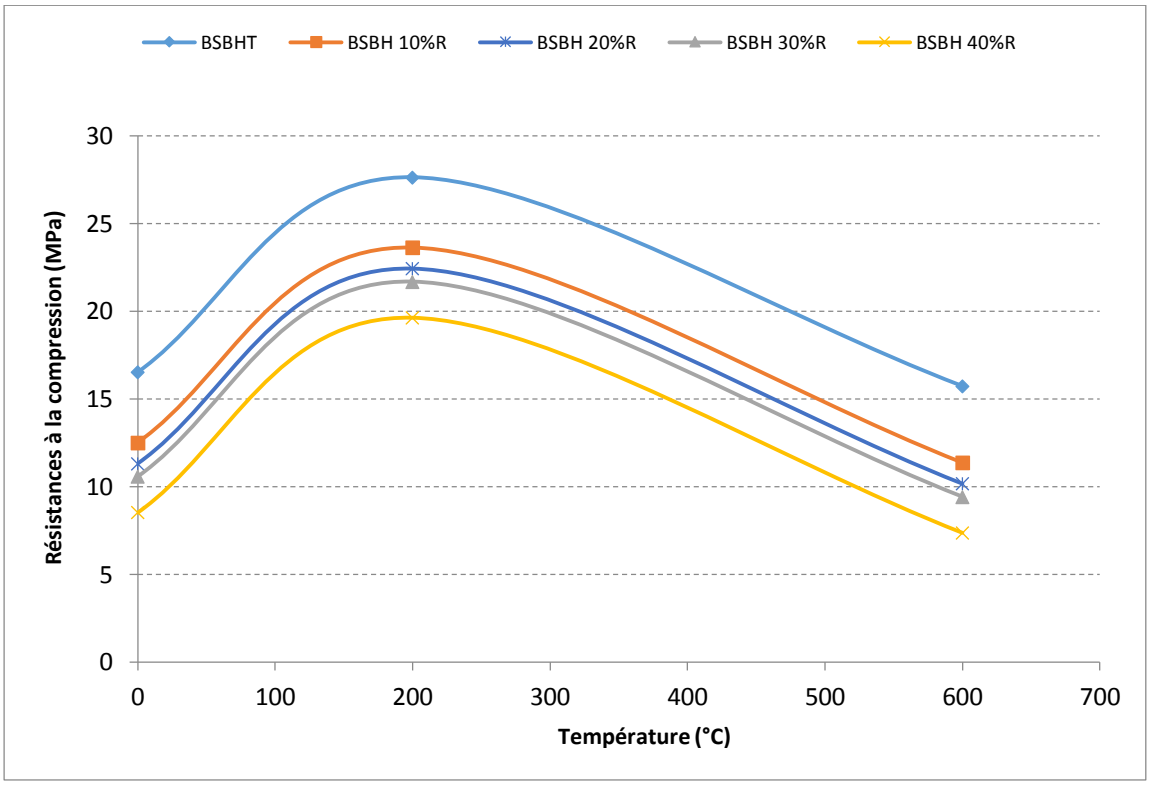


Figure 3.96 : Résistance à la compression des BSBHR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

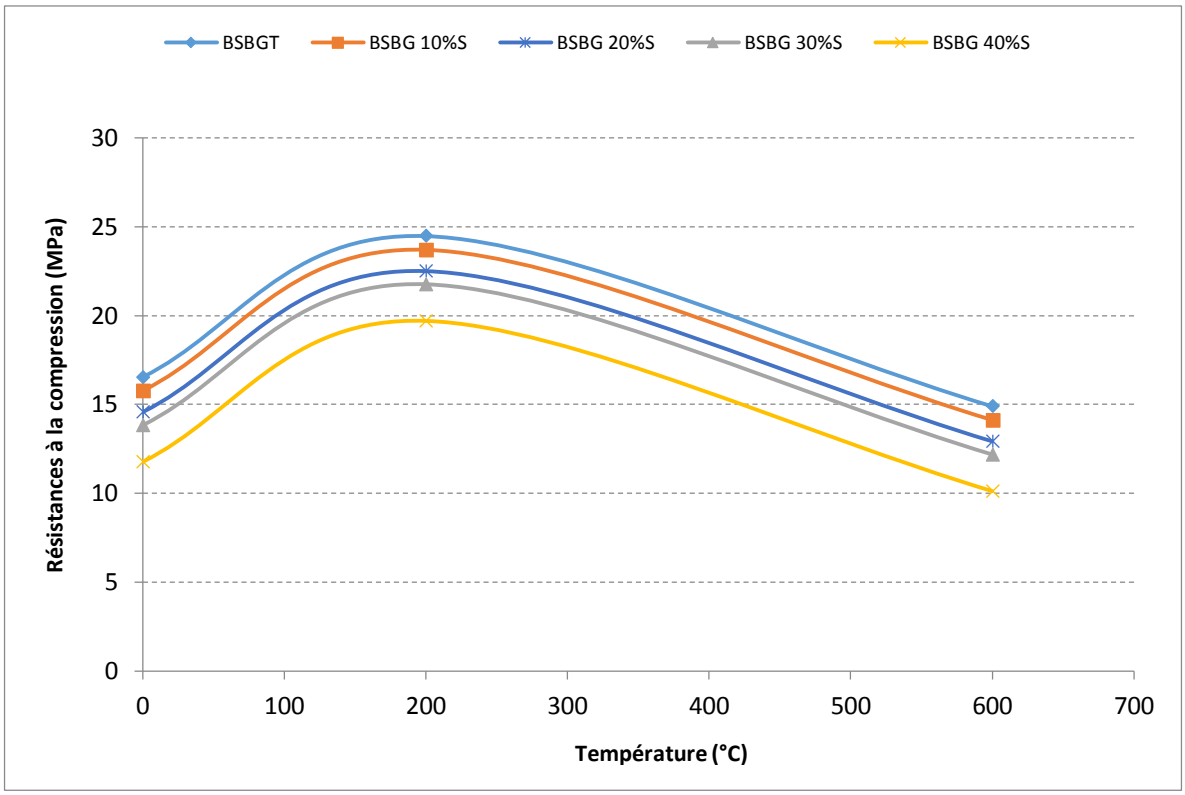


Figure 3.97 : Résistance à la compression des BSBGS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

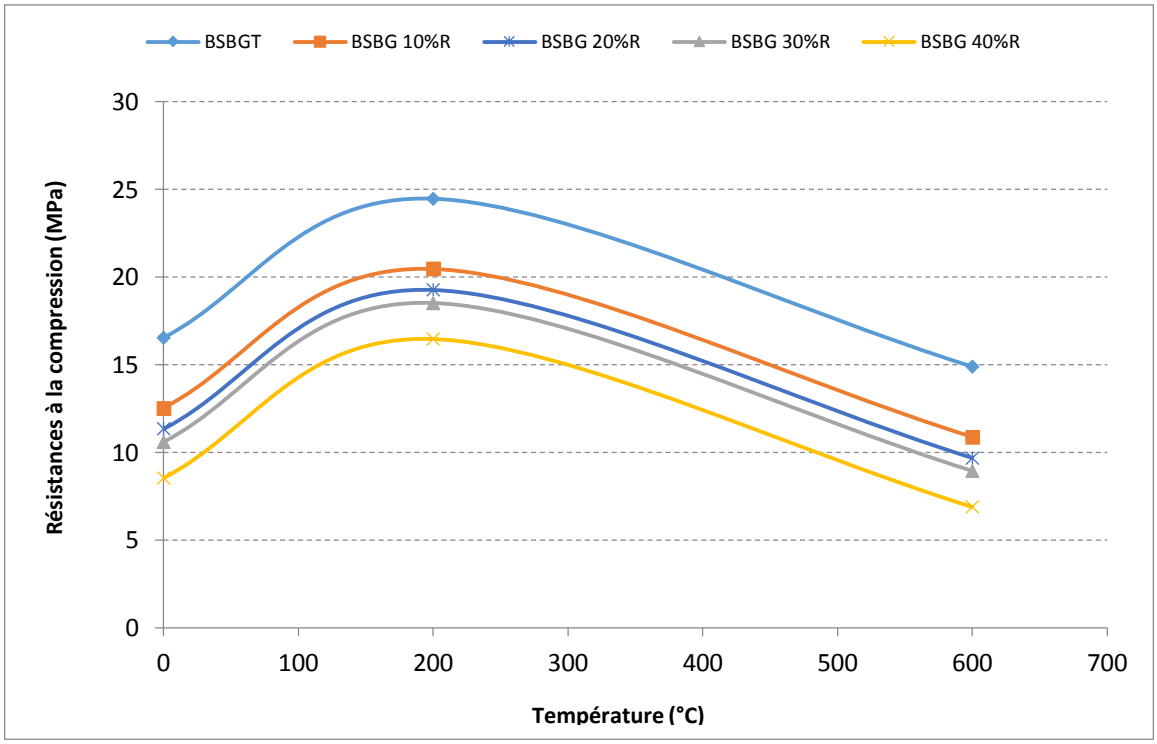


Figure 3.98 : Résistance à la compression des BSBGR chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

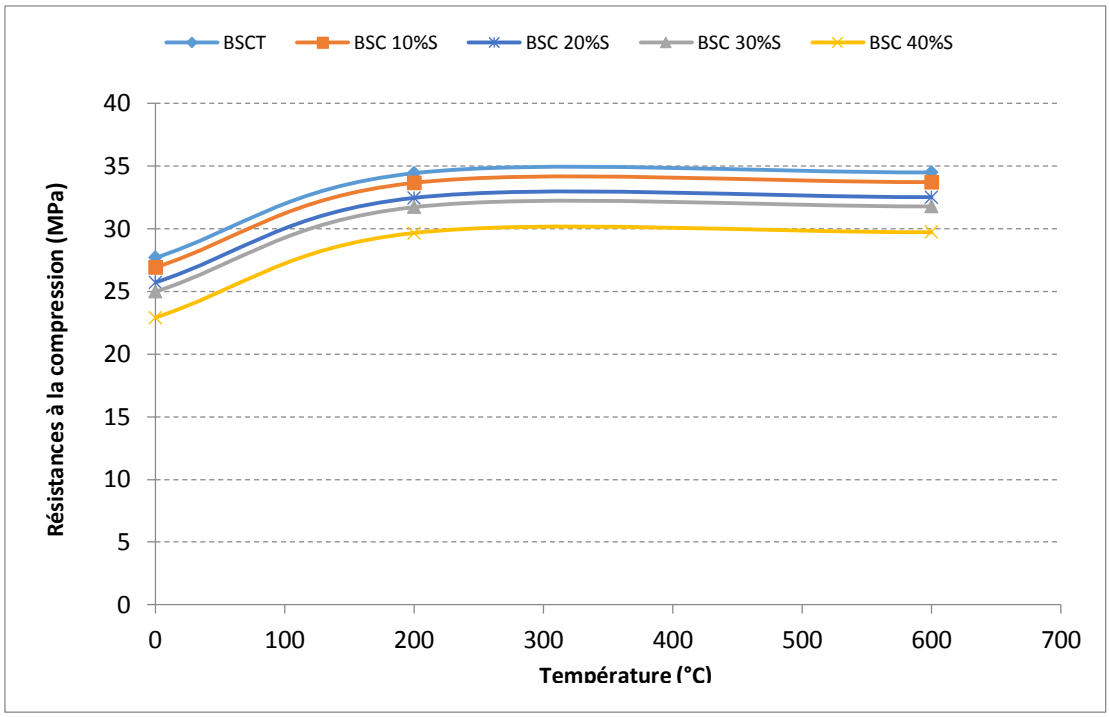


Figure 3.99 : Résistance à la compression des BSCNS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

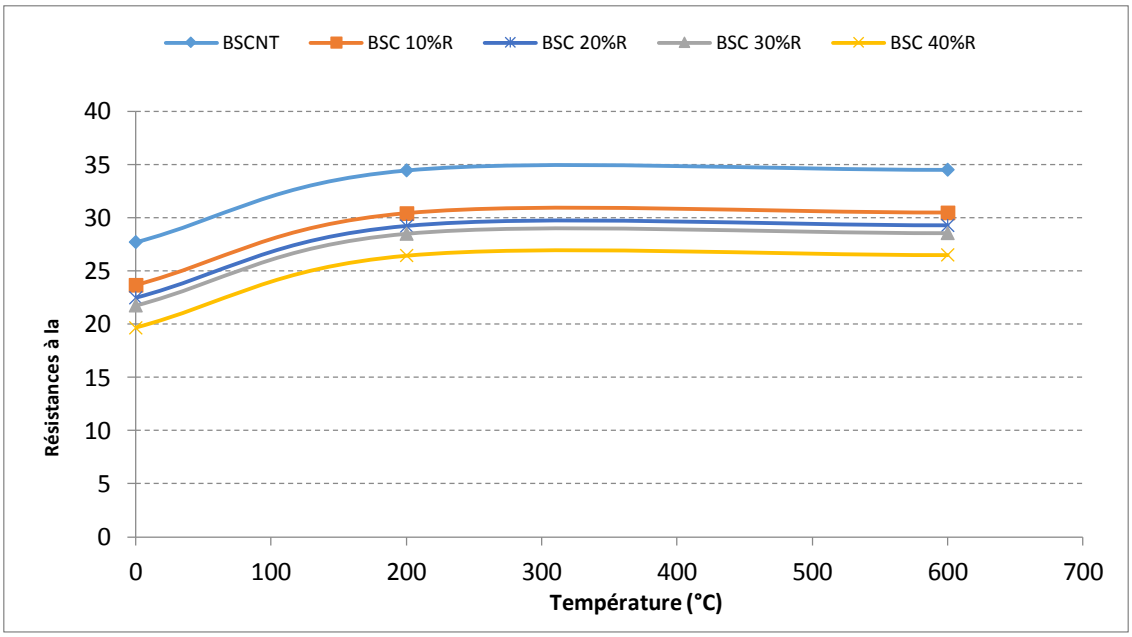


Figure 3.100 : Résistance à la compression des BSCNS chauffés à T=200 °C et à T= 600 °C

L'évolution de la résistance à la compression des différents bétons de sable chauffé est représentée en figure ci-dessus. Les résultats obtenus montrent qu'il y a toujours un pic de résistance au 200 °C pour tous les types des BS. On enregistre toujours à cette température une

augmentation de résistance d'ordre de 8 jusqu'à 12 MPa quelques soit le types de BS et la nature de déchet. Au-delà du pic de résistance à 200°C, on note toujours une diminution quasi linéairement de la résistance à la compression pour les bétons de sable chauffé à 600 C°.Une exception a été enregistré pour les BSCN qui présente une légère diminution de résistance après 200°C. Nous constatons que c'est l'eau non évaporable (notamment chimiquement liée dans les hydrates), qui participe à l'établissement des pressions internes qui jouent un rôle de précontrainte et par ceci à une augmentation de la résistance à la compression aux alentours de 200°C. Au-delà de 200°C, le rapport de la résistance à chaud diminue quasi linéairement jusqu'à une faible résistance obtenus à 600°C, ce qui est en concordance avec d'autres auteurs [8] qui sont remarqué que il y a toujours un pic de résistance des bétons chauffé à température à 200°C et 400˚C. GUENDOUZ et al [5] ont aussi trouvé les mêmes résultats sur des BS à base de déchets plastiques chauffés à 200°C ,400°C, 600°C. Ils ont constaté que la résistance à la compression présente toujours un pic de résistance au 200 °C et diminuer linéairement au-delà de cette température.

III.5 Conclusion

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

1. L'ajout des déchets de caoutchouc (souples et rigide) contribué à l'augmentation maniabilité du béton de sable.
2. La densité de tous les bétons de sable est diminuée en fonction d'ajout des déchets de caoutchouc.
3. L'air occlus et la porosité de tous les mélanges est augmentée en fonction d'augmentation des pourcentages des déchets de caoutchoucs.
4. Les performances mécaniques des bétons de sable (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité) sont diminuées en fonction d'augmentation des pourcentages d'ajouts des déchets de caoutchouc.
5. L'absorption capillaire des BS à base de déchets de caoutchouc est moins importante que celle des bétons de sable de référence.
6. Les variations dimensionnelles (retrait et gonflement) et les variations de masse (perte et gain de masse) de tous les bétons de sable à base de déchets de caoutchouc sont plus importantes que celle des bétons de sable de référence. .

7. L'ajout des déchets de caoutchouc au différents types des bétons de sable diminuer la conductivité thermique et améliore l'isolation thermiques.
8. La masse du béton de sable à base de déchets de caoutchouc est diminué avec l'augmentation de la température. Cette perte de masse augmente graduellement jusqu'à 600°C.

Finalement, si on compare les résultats qu'on a trouvés dans cette partie d'étude et les résultats des déférents chercheurs (citées dans la bibliographie) on peut dire qu'il y a une nette concordance entre les deux.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS

L'objectif de ce travail était de déterminer l'effet d'addition des déchets de caoutchouc (déchets de semelles des chaussures) sur les performances et la durabilité du béton de sable. La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous ont permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Quel que soit la nature du sable (Fin, moyen ou gros) l'ajout des déchets de caoutchouc contribué à l'augmentation maniabilité du béton de sable.
2. La densité de tous les bétons de sable est diminuée en fonction d'ajout des déchets de caoutchouc.
3. L'addition des déchets de caoutchoucs à la formulation des bétons de sable augmente l'air occlus à l'état frais et la porosité à l'état durci.
4. Les performances mécaniques des bétons de sable (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité) sont diminuées en fonction d'augmentation des pourcentages d'ajouts des déchets de caoutchouc.
5. L'absorption capillaire des BS à base de déchets de caoutchouc est moins importante que celle des bétons de sable de référence.
6. Les variations dimensionnelles (retrait et gonflement) et les variations de masse (perte et gain de masse) de tous les bétons de sable à base de déchets de caoutchouc sont plus importantes que celle des bétons de sable de référence. .
7. L'ajout des déchets de caoutchouc au différents types des bétons de sable diminuer la conductivité thermique et améliore l'isolation thermiques.
8. La masse de tous les types de béton de sable est diminués avec l'augmentation de la température. Cette perte de masse augmente graduellement jusqu'à 600°C.
9. Toutes les familles des bétons de sable réalisées présentent un pic de résistance à 200°C, ce pic est attribué à la présence de pressions de vapeur d'eau libérée par les différents hydrates qui jouent le rôle de force de précontrainte.
10. Les résistances en compression des bétons de sable diminuent en fonction d'augmentation de la température au-delà de 200°C. Cette diminution est attribuée à la dégradation de la portlandite à 600°C.

RECOMMANDATIONS

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette recherche pourraient mener à des développements futurs dans le domaine du recyclage des déchets de caoutchouc. Pour cela on recommande les étudiants d'approfondir dans ces recherches et surtout d'étudier :

-Valorisation d'autres types des déchets de caoutchouc dans le béton de sable.

- L'effet de ce type de déchets sur la santé humaine.

- l'incorporation d'autres dimensions de déchets de caoutchoucs dans le béton (fibres).

- La durabilité de ce type de béton.

- Le pompage de BS à base de déchets de caoutchouc.

- autre type de bétons (béton spéciaux) à base de déchets de caoutchouc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] MICHEL M." Valorisations des déchets et des sous-produits industriels "Ed Massion, Paris (1981).

[2] LANGUEDOC R. "Guide pratique des déchets" (site Internet google.fr), 2001.

[3] Courard L."Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil" Notes de cours(Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998), 195 p.

[4] Quebaud M. "Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats", Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.

[5] Recyclage " Encyclo-ecolo.com " l'encyclopédie écologique, 2014.

[6] M. HO Anh Cuong. " Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés " Application aux éléments de grande surface, 2010.

[7]Omar MEZIDI. " Etude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinairemodifiés à la poudrette de caoutchouc. Mémoire De Magister, 2008.

[8] Encyclopédie Universel ÉLASTOMÈRES ou CAOUTCHOUCS, universalis.fr (site Internet google.fr).avril 2015.

[9] "Production mondiale de caoutchouc" statistiques mondiales en temps réel PLANETOSCOP (site Internet google.fr). Avril 2015.

[10]" CAOUTCHOUCS SYNTHÉTIQUES", Societechimiquedefrance.fr (site Internet google.fr).février 2012.

[11]LETTRE DE L'ECO-CONSOMMATION N°34 . "question du mois novembre". 2002 (site Internet google.fr).

[12]CONSTANT E. "Le problème du pneu usagé non réadaptable P.U.N.R", (site Internet google.fr). Oct1997– Mar 1998.

[13]SANDRA B ; ANACLET T ; LOINS GRANJU J. "Un composite cimentaire résistant à la fissuration : synergie « Granulats en caoutchouc – renfort par des fibres »", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC); 250-251, Mai-Juin-Juil-Aout.2004.

[14] Benaissa A ;MorlierP ;Viguier C ;CauvinJ.J . "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable." Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics. juin 1992.

[15] ERIC F ; STEPHANE F. "Le béton de sable appliqué au chaussées routières", infrastructure, Montréal, Crein, Vol.9, 5 Juill-Août. 2002.

[16] BENMALEK. M. L ."contribution à l'étude des bétons de sables dunaires pour éléments de structures", Thèse de magister, Université de Constantine, Oct1992.

[17] SABLOCRETE, « Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses del'école nationale des ponts et chaussées (1994).

[18] CHAOUACH A. A. "Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes", Thèse de Magister, Ecole National Polytechnique (ENP), juillet 1993.

[**19**] **AFNOR,** "Bétons- Bétons de sable",Projet P 18-500.

[**20**]**GADRI KARIMA**."Contribution à l'étude d'un béton de sableavec Fibres etrésine destinépour la préparation mince des structures . Thèse de magister, Université MOHAMED KHIDER, BISKRA. Juillet 2007.

[**21**] **Sandrine Catinard**." Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines ", Thèse (P.H.D), Université LAVAL (Québec) ,CANADA (2000).

[**22**] **Yanéric Roussel**."Béton autoplaçant avec fibres comme matériau de réparation du béton " Mémoire de maîtrise ès science appliquées, Université Sherbrooke (Québec) CANADA (2000).

[**23**] **Mélanie SHINK.** " Fissuration des matériaux cimentaires renforcés de microfibres d'aciers ",Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université LAVAL CANADA (2000).

[**24**] **Moussa BAALABAKI**." Influence des interactions du couple cimentaire/ Adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons- importance du mode d'interactions des adjuvants ", Thèse de Doctorat ès sciences appliquées, Université Sherbrooke CANADA, (1998).

[**25**] **G.Dreux ;J.Festa**. " nouveau guide du béton et de ses constructions ", Edition Eyrolles, France (1995,1998).

[**26**] **J.J.Chauvin et G.Grimaldi**."Les bétons de sables " Bulletin liaison laboratoire, Ponts et chaussés N°157, Ref 3336, PP:9-15, (Sept-Oct 1988).

[**27**] **G.Chanvillard et O.Basuyaux**".Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées " Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, N°205, ref : 4047, PP : 49-63, Sept-Oct (1996).

[**28**] **Z.Boudaoud,** " Etude des mortiers, des microbétons et des bétons de sable à base de sable fin deBoussaada" Thèse de Magistère, université Med Boudiaf.

[**29**] **K.Gadri ;S.Haouara.**"Utilisation des fillers à bases de déchet de polissage de carrelage dans la préparation des bétons de sable " . Mémoire d'ingénieur d'état, Université Med Khider,Biskra (1998).

[**30**] **A.Benaîssa ; P.Molier et C.Viguier**." Fluage et retrait du béton de sable ", Materials and structures, N° :26, PP : 333-339 (1993).

[**31**] **A.Benaîssa ;P.Molier et C.Viguier**." Microstructure du béton de sable ",Cement and concreteresearch, Vol 23, PP : 663-674 (1993).

[**32**] **A.Benaîssa ;P.Molier et V.Tram**". Le béton de sable un matériau non fissurant ",AlgérieEquipement (matériau) PP : 7-10.

[**33**] **A.Benaîssa ;S.Aggoun**." Contribution à l'étude du fluage propre du béton de sable : Modelphysique », Colloque CEDIMAT (Oran), Décembre 2005.

[**34**] **Veronique le Mastère**". Utilisation des bétons de sable : comblement cavités sous pile de pont, "ITPE-DDE de Haute Garonne, Cellule, Ouvrage d'art N° : 22, PP : 29-33 (Novembre 1995).

[**35**] **J.J. Chauvin.**" le béton de sable en Union Soviétique ", Bulletin liaison laboratoire Ponts etChaussées, N° : 174, Ref 3589, PP : 61-68, (Juil - août 1991).

[**36] Mahmoud ISMAIL,**"étude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires) "DOCTORAT DE L'INSA 2006.

[**37] BENKALI SARAH**." caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction " université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU .Thèse de Magistère.

[**38] Les bétons hauts** performances, cours de génie civil de l'IUT de Grenoble, page 111.

[**39] Güneyisi E ;GesoğluM etÖzturan T.**" Properties of rubberized concretes containing silica fume", Cement and Concrete Research 34, 2309–2317, 2004.

[**40] Khaloo A. R;Dehestani M. etRahmatabadi P**."Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles". Waste Management 28, 2472–2482, 2008.

[**41**] Guide pour le béton de structure à base de granulats légers, T.A.C Approval Draft, American Concrete, Institue ACI committee 213.

[**42] Kaloush K. E ; Way G. B et Zhu H**." Properties of Crumb Rubber Concrete. Transportation Research Record". Journal of the Transportation Research Board, Volume 1914, 2005.

[**43] Khatib Z. K. etBayomy F. M**." Rubberized Portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering", 206-213.

[**44] FedroffD ; Ahmad S ; and Savas B. Z**." Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber". Transportation Research Board, No. 1532, pp.66-72, 1996.

[**45] M. HO Anh Cuong.** "Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés", Application aux éléments de grande surface , DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, 2010.

[**46] Garros M**." Composites cimentaires incorporant desgranulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition etcaractérisation", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.

[**47] Eldin N.N etSenouci A.B**." Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates". Volume 15, Issue 1, July 1993.

[**48] Biel T.D et Lee H**." Magnesium oxychloride cement concrete with recycled", Transportation Research Record No. 1561, pp. 6-12, 1996.

[**49] Papakonstantinou C.G et Matthew J.T**."Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete". Cement and Concrete Research 36, 1686–1691, 2006.

[**50] Ganjian E; KhoramiM etMaghsoudi A. A**."Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete". Construction and Building Materials 23, 1828–1836, 2009.

[**51] Turatsinze A ; Bonnet S etGranju J.L**." Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance", Construction and Building Materials, 21: 176-181, 2005.

[**52] Hobbs D.W**." The dependence of the bulk modulus, Young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration",Mat. Struct. 4: 107-114, 1971.

[**53] Neville A.M** ." Propriétés des bétons", Quatrième édition. Edition française par CRIB, Editions Eyrolles, 2000.

[**54] Benazzouk A ;Douzane O et Quéneudec. t'Kint M**. "Transport of fluids in cement–rubber composites", Cement & Concrete Composites 26, 21–29, 2004.

[**55] Kerasley E. P. et Wainwright P.J**." Porosity and permeability of foamed Concrete ", Cement Concr Res, 31: 805–12, 2001.

[**56] Savas B.Z; Ahmad S et Fedroff D**." Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber", Transportation Research Record No. 1574, Transportation ResearchBoard, Washington DC, 80-88, 1996.

[**57] Benazzouk A et Quéneudec M** ."Effet du caractère cellulaire desgranulats sur le comportement d'un composite ciment-caoutchouc aux cycles de gel/dégel", Proceeding of CNR IUT Roanne, publication de l'Université de St-Etienne, ISBN 2 86272 2200, Tome 2, pp. 477–87, 2001.

[58] NA 442, Normes Algérienne : "Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants", 1994, 2000.

[59] NF 15-301, Normes Européenne : "Ciments courants ",1994.

[60] DUPAIN. R, LANCHON. R, J. C. SAINT ARROMAN « granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Edition casteilla – 25, ruerouge-75005 Paris 1995

[61] NF EN 12350-7, « Essai pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air occlus », AFNOR.1999.

[62]NF EN 12350-6, 1999, « *Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique* », AFNOR.

[63]NA 436 ,1992-08-20 «béton frais, détermination de la consistance-essais d'affaissement ».Norme algérienne.

[64] Modulus of elasticity of concrete in compression. Materials and structure. Vol. 6, No. 30, 507-512, Recommendations RILEM CPC8, Nov.-Dec. 1972.

[65] SABLOCRETE, « Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (1994).

[66] NF P 15-404, Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules »1989.

[67] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.

[68] planete-gaia.e-monsite.com ,les déchets et l'homme (site Internet google.fr) ,2015.

[69] institut national de la statique et des études économiques, www.insee.fr. (site Internet google.fr) 2008.

[70] Martha J. Gilleland . Introduction to general, organic, and biological chemistry. 1982

[71] NF EN 993-15 .Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle) Octobre 2005.

[72] La chimie des polymères. Université Numérique des Sciences Odontologiques Francophones, campus.cerimes.fr(site Internet google.fr).2010-2011.

[73] seniorforums.com(site Internet google.fr) ,2015.

[74] dreamstime.com/photo-stock

[75] LES DIFFERENTES CONTRAINTEScol-frank-illzach.ac-strasbourg.fr(site Internet google.fr) ,2015.

[76] La production mondiale de caoutchouc.wipiv.com

[77] M. HO Anh Cuong, Optimisation de la composition et caractérisation d‟‟un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface, 2010.

[78] La maison de **COIGNET** wikimedia.org (site Internet google.fr).2015

[79] Wikipedia.org (site Internet google.fr).2015

[80] Plastiques A9, techniques de l'ingénieur, paris 1985.

[81] BELFERRAG Allaoua, Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes, Mémoire MAGISTER juin 2006.

[82] TMC chapitre 5 "Expériences"(site Internet google.fr).2015

[83] Guinette ARLIGUIE, Hugues HORNAIN, Grandubé, presse de l'école nationale des ponts et chaussées, avril 2007.

[84] ASTM CPC8 ASTM CPC8, Mesure du module d'élasticité en compression, 1975

[85] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[86] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[87] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.

[88] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[89] NF EN 1097-2, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation », AFNOR.

[90] NF EN 12620, 1988, Granulats pour béton, AFNOR.

[91] chaussure.com, (site Internet google.fr).2015

[92] ISO 8497, 1994 Isolation thermique : Détermination des propriétés relatives au transfert de chaleur en régime stationnaire dans les isolants thermiques pour conduites

[93] ISO 834-1, Essai de résistance au feu -- Éléments de construction -- Partie 1: Exigences générales. 1999

[94] CPA-CEM I 42.5 ES fiche technique du ciment chlef .2004

[95] Paco Diederich, Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE décembre 2010.

[96] Granitex.dz, notice technique MEDAFLUID 104, 2015.

[97] Li Z., Li F. and Li. J. S. L., Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. Magazine of Concrete Researche, 50, No4, 297-304, Dec.1998.

[98] Güneyisi E., Gesoğlu M and Özturan T., *Properties of rubberized concretes containing silica fume*. Cement and Concrete Research 34, 2309–2317, 2004.

[99] Gül R., Uysal H. and Demirboğa R., *Investigation of The Thermal Conductivity of Lightweight Concrete Made with Kocapınar's Pumice aggregate* (Kocapınar Pomzası ile Üretilen Hafif Betonların ısı Đletkenliklerinin Arastırılması), Advanced in Civil Eng. III. Technical Congress, vol. 2, METU, Ankara, Turkey, pp. 553–562, 1997 (in Turkish).

[100] Blanco F., Garcia P., Mateos P. and Ayala J., *Characteristics and properties of lightweight concrete manufactured with cenospheres*. Cement Concrete Research 30, pp. 1715–1722, 2000.

[101] Document Technique Unifié, *Règle de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction*. Etablies par Le Groupe de coordination des textes techniques. Novembre 1977.

[102] Sukontasukkul P. and Chaikaew C., *Properties of concrete pedestrian block mixed with crum rubber*. Construction and Building Materials, 20: 450–457, 2006.

[103] GUENDOUZ Mohamed, DEBIEB Farid "Etude du comportement de béton de sable à base de déchets plastiques**"** 3éme conférence international sur les matériaux et les structures en composites, 02 ET 03 Décembre 2014 A ORAN.

[104] SIDDIQUE, R., NAIK, T. R.., 2004. "Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview". Waste Management (24) 563–569.

[105] **KHATIB, Z.K., BAYOMY, F.M.,** 1999."Rubberized Portland cement concrete" ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 11 (3), 206–213.

[106] **Saikia N, De Brito J.** Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review. Constr Build Mater 2012;34:385–401.

[107] **F. Iucolano, B. Liguori, D**. Caputo, F. Colangelo, R. Cioffi. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties,Materials and Design 2013 ,52 , 916–922.

[108] **Barbara Liguori, Fabio Iucolano, Ilaria Capasso, Marino Lavorgna, Letizia Verdolotti**'' The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars,Materials and Design 2014 ,57 , 578–584.

[109] **EN 1992-1-2** – Eurocode 1 – Actions on structures - Part 1. 2: General rules – Actions on structures exposed to fire, Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

[110] **GUENDOUZ.M, DEBIEB .F, KADERI El** «Effets de l'élévation de la température sur les caractéristiques sur les caractéristiques du béton de sable à base de déchets de caoutchouc »,1er Works shop international 'Risque Feu 2015'07,08 Avril 2015 à CHLEF.

[111] Le carbone en première ligne. valorplast.com (site Internet google.fr).2015

ANNEXES

CIMENT PORTLAND COMPOSE
CPJ-CEM II/A 42.5

NORME ALGERIENNE NA 442-2000

Conforme à l'arrêté interministériel du 04 juin 2002 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments

Notre ciment

L'activité principale de l'entreprise est la fabrication et la commercialisation du ciment portland composé CPJ CEM II/A 42.5.
ECDE produit à la commande d'autres types de ciments tels que : Le CPJ CEM II/A 52.5 et le CPJ CEM II/A 32.5



Aperçu d'un sac de ciment (50 Kg)

Présentation

Le ciment CPJ-CEM II/A 42.5 est un ciment Portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts.
Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Composition

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 est constitué de:

- 80 à 94% de clinker Portland.
- 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur).
- Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

Spécification

Le CPJ-CEM II/A 42.5 de l'ECDE répond aux exigences de la norme NA 442- 2000:

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

Norme NA 442	Ciment ECDE
Sulfates: SO3 ≤ 3.5 %	SO3 ≤ 2.00 %
Chlorures Cl- ≤ 0.1 %	Cl- ≤ 0.08 %

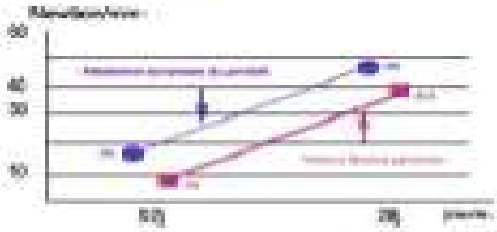
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Norme NA 442	Ciment ECDE
Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise> 60 mn
Stabilité à chaud ≤ 10mm	Stabilité à chaud < 7mm
Retrait 28j ≤ 1000 µm/m	Retrait 28j < 650 µm/m

EVOLUTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION

Les résistances mécaniques à la compression, mesurées sur éprouvettes de mortier normal à 28 jours d'âge conformément à la norme NA 234 donnent les résultats suivants:

- Limite inférieure (Li) : ≥ 42.5 Newtons/mm2
- Limite supérieure (Ls) : ≤ 62.5 Netons/mm2



Valeurs limites garanties:

- A 02 jours d'âge : 10.0 Newtons/mm2
- A 28 jours d'âge : 40.0 Newtons/mm2

Domaine d'utilisation

- Béton courant (non armé ou faiblement armé: fondations, portées réduites, décoffrage différé).
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...).
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc ...)
- Béton routier.
- Béton fortement sollicité.

Précautions et recommandations pour l'emploi

- Il est recommandé de stocker le ciment dans les endroits étanches secs pour éviter l'hydratation du produits.
- Pendant le durcissement et en saison chaude, maintenir le béton humide en l'arrosant régulièrement ou en utilisant des produits de cure afin d'éviter la dessiccation des parties superficielles.
- Eviter les décoffrages prématurés pour préserver les résistances à long terme.
- Utiliser les agrégats propres (sable, gravier ...).
- Respecter le dosage ciment – eau – agrégats.
- Utiliser tout moyen (vibreur ...) pour assurer une compacité maximale du béton, facteur important pour la garantie de résistance mécanique optimums.
- Eviter un surdosage de ciment qui provoquerait une tendance à la fissuration du béton et donc une perte de résistance.



Figure 03 : Tamiseuse électrique



Figure 04 : broyeur



Figure 05 : Le malaxage du béton



Figure 06 : Essais de l'air occlus

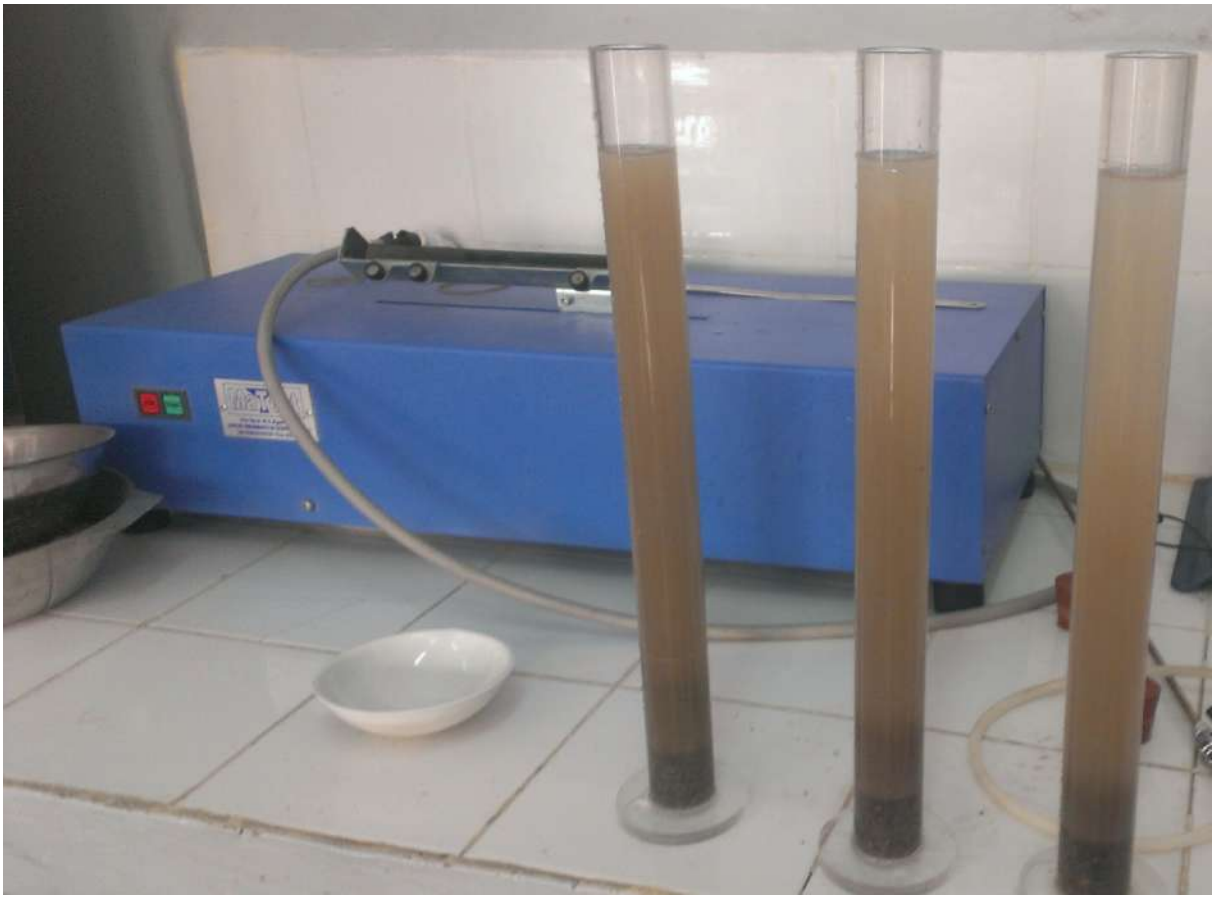


Figure 07 : Essais d'équivalent de sable

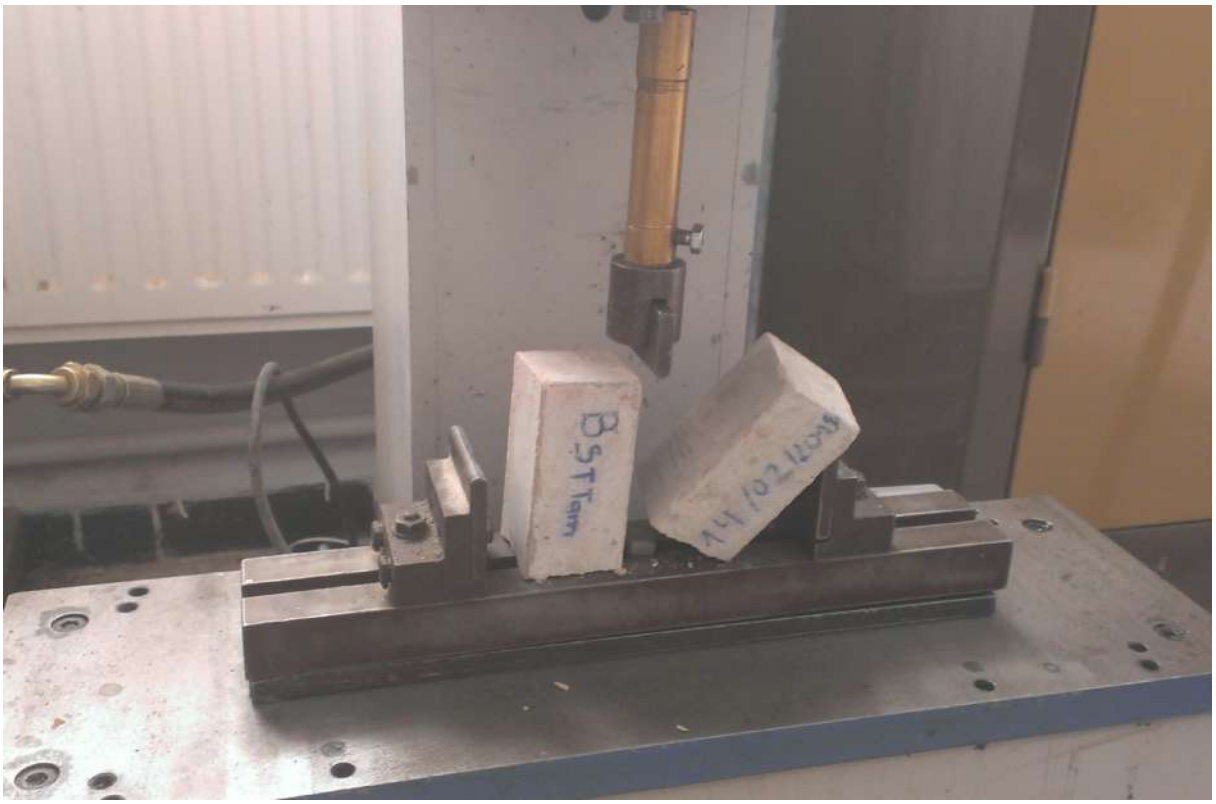


Figure 08 : Essaie de traction



Figure 09 : Essaie de compression

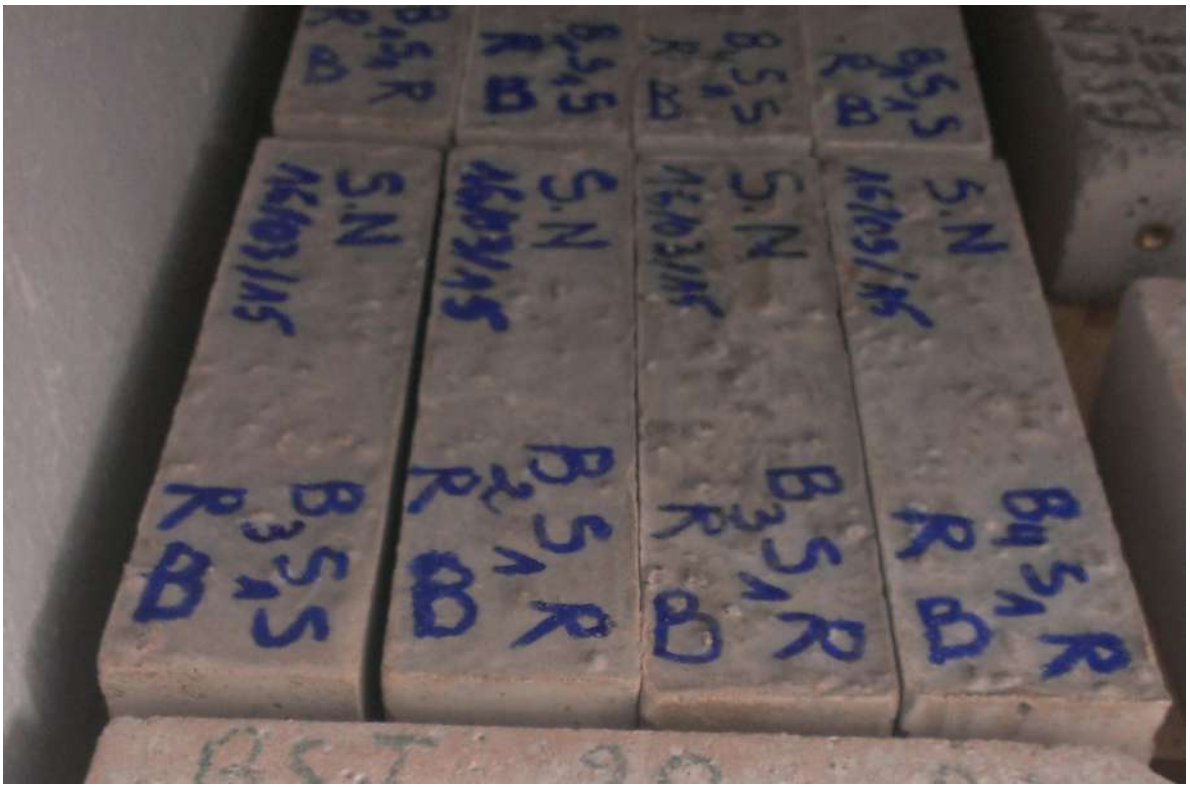


Figure 10 : Éprouvettes pour l'essai de retrait

F



Figure 11 : mélange de 1L

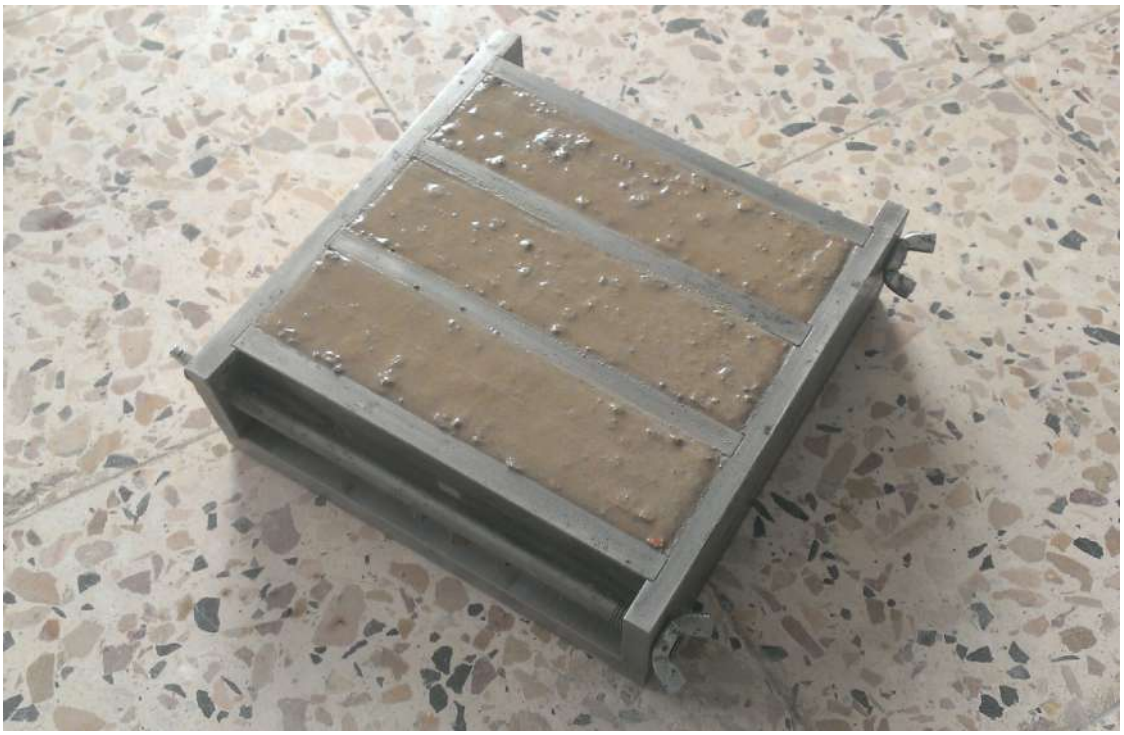


Figure 12 : Coulage du béton



Figure 13: éprouvette après écrasement



Figure 14 : éprouvettes après décoffrage

H



Figure 15 : l'essaie d'absorption



Figure 16 : l'essai du module d'élasticité



Figure 17 : béton témoin et avec 40% de déchets



Figure 18 : mesure de la conductivité thermique

J



Figure 19 : four a moufle