



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et
Environnement



Thèse de Doctorat en Sciences
En Génie Civil
Option : Matériaux

Présentée par :
MEZIDI Amar

Ingénieur d'état et Magister en Génie Civil diplômé de l'ENP

Intitulée

**Etude comparative de deux bétons
modifiés par la poudrette de
caoutchouc**

Présentée et Soutenue publiquement le : 16 /06/ 2022 devant le jury composé de :

Mr. BALI Abderrahim	Professeur, ENP, Alger	Président
Mme. MITICHE-KETTAB Ratiba	Professeur, ENP, Alger	Directrice de thèse
Mr. BENZAOUZ Ibrahim Khalil	MCA ENP, Alger	Examineur
Mr. OUDJIT Mohamed Nadjib	Professeur, USTHB	Examineur
Mr. CHAID Rabah	Professeur, UMB Boumerdes	Examineur
Mr. HADDADI Smail	Professeur, USTHB	Examineur

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et
Environnement



Thèse de Doctorat en Sciences
En Génie Civil
Option : Matériaux

Présentée par :
MEZIDI Amar

Ingénieur d'état et Magister en Génie Civil diplômé de l'ENP

Intitulée

**Etude comparative de deux bétons
modifiés par la poudrette de
caoutchouc**

Présentée et Soutenue publiquement le : 16 /06/ 2022 devant le jury composé de :

Mr. BALI Abderrahim	Professeur, ENP, Alger	Président
Mme. MITICHE-KETTAB Ratiba	Professeur, ENP, Alger	Directrice de thèse
Mr. BENZAOUZ Ibrahim Khalil	MCA ENP, Alger	Examineur
Mr. OUDJIT Mohamed Nadjib	Professeur, USTHB	Examineur
Mr. CHAID Rabah	Professeur, UMB Boumerdes	Examineur
Mr. HADDADI Smail	Professeur, USTHB	Examineur

ENP 2022

ملخص

أصبحت خرسانة فتات المطاط مادة بيئية جديدة جذيرة بالاهتمام في العقدين الأخيرين، الأمر الذي يتطلب دراسات بحثية حول استعادة المواد المحلية وكذا استخدام النفايات الصناعية. هذا العمل مخصص لدراسة سلوك الخرسانة المصنوعة فقط من رمل الكثبان والخرسانة العادية المعدلتين بنسب أوزان مختلفة من فتات المطاط. خصائصهم الميكانيكية والفيزيائية مثل الكثافة ، ومقاومة الانضغاط ، والضغط النسبي ومقاومة الجذب عن طريق قوة الانحناء لخرسانة الكثبان الرملية والخرسانة العادية المعدلتين قد تمت دراستها بنسبة أوزان مختلفة من فتات المطاط ، 1% ، 2% ، 3% ، 4% و 5%. بينت النتائج المتحصل عليها أن النسبة المثلى للفتات المطاطية هي 3%. بالإضافة إلى ذلك، تشير النتائج إلى أن الخرسانة المصنوعة فقط من الكثبان الرملية لها معامل مرونة أضعف (-54% تقريباً)، ومقاومة ضغط منخفضة بـ 63% مقارنة بالخرسانة العادية المعدلة. وبالتالي، أثبت مزيج الخرسانة الكلاسيكي المعدل بإضافة مواد محفزة نتائج مقبولة للاستخدام النهائي في العناصر الهيكلية ، وبالمقابل ، فإن خرسانة الكثبان الرملية المعدلة قد تنحصر استخداماتها في بعض التطبيقات الهيكلية الصغيرة كحدود الأرصفة. أخيراً ، تم نمذجة الخرسانة العادية وخرسانة رمال الكثبان المعدلتين بطريقة العناصر المحدودة ومقارنتها مع النتائج التجريبية.

كلمات مفتاحية: فتات مطاطي، الخرسانة المعدلة، معامل المرونة، السلوك الميكانيكي للمواد ؛ عناصر محدودة..

Abstract

The Crumb rubber concrete is becoming a new interesting environmental material in the last two decades, which requires research studies on the recovery of local materials using industrial waste. The present work is devoted to investigate the behavior of concrete made only with dunes sand and an ordinary concrete modified with various percentages contents of crumb rubber. Their mechanical and physical properties such as the density, the compressive strength, the relative compaction and the tension by bending strength are investigated with different weight percentage of rubber crumb, 1%, 2%, 3%, 4% and 5%. The obtained results show that the optimal percentage of the crumb rubber is 3%. In addition, the results indicate that concrete made only with dunes sand has weaker elasticity modulus (-54% approximately), and reduced compressive strength -63% compared to the modified ordinary concrete. Consequently, the ordinary concrete mix with crumb rubber and admixture incorporation has proven acceptable performances for the eventual use in the structural elements, however, the dunes sand only aggregate concrete modified may limit its use in certain structural applications such as pavements borders. Finally, Modified ordinary concrete and modified dunes sand are modeled by the finite element method and compared with the experimental results.

Keywords: rubber crumb; modified concrete; elasticity modulus; Materials mechanical behavior; finite elements.

Résumé

Le béton de poudrette de caoutchouc est devenu un nouveau matériau environnemental intéressant au cours des deux dernières décennies, ce qui nécessite des études de recherche sur la récupération de matériaux locaux et l'utilisation des déchets industriels. Le présent travail est consacré à l'étude du comportement d'un béton fabriqué uniquement à partir de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés par différents pourcentages pondéraux de poudrette de caoutchouc. Leurs propriétés mécaniques et physiques telles que la densité, la résistance à la compression, la compaction relative et la résistance à la traction par flexion sont étudiées avec différents pourcentages de caoutchouc, 1%, 2%, 3%, 4% et 5%. Les résultats obtenus montrent que le pourcentage optimal de la poudrette de caoutchouc est de 3%. En outre, les résultats indiquent que le béton fabriqué uniquement avec du sable de dunes a un module d'élasticité plus faible (-54% environ), et une résistance à la compression réduite de 63% par rapport au béton ordinaire modifié. Par conséquent, le mélange de béton ordinaire avec l'incorporation de poudrette de caoutchouc et d'adjuvants s'est avéré avoir des performances acceptables pour l'utilisation éventuelle dans les éléments structurels. Cependant, le béton de sable de dunes modifié peut limiter son utilisation dans certaines applications structurelles telles que les bordures de chaussées. Enfin, le béton ordinaire modifié et le sable des dunes modifiés sont modélisés par la méthode des éléments finis et comparés aux résultats expérimentaux.

Mots clés : poudrettes de caoutchouc ; béton modifié ; module d'élasticité ; comportement mécanique des matériaux ; éléments finis.

الإهداء

أحمد الله تعالى الذي لا رب لنا غيره ولا إله لنا سواه على جميع نعمه فهو صاحب المن والعطاء....

وهو أهل الشكر والثناء وهو الموفق لكل خير وير....

إلى من كانا يربطان على قلبي كلما وهنت عزائمهم وضعفت قواهم... ولم يدخرا حمدا في سبيل تعليمي وتوجيهي منذ الصغر،

والذي الكريمين حفظهما الباري وأطال أعمارهما في طاعته.....هذا بعض غراسها وعند الله بإذنه الجزاء الأوفى...

إلى الذي كان كثيرا ما يؤثرنا على نفسه... ويفرح أيما فرح بإنجازاتنا أخي - محمد - ... وإلى جميع أفراد عائلته.

إلى التي كانت تسهر معي الليالي... وتتداركني بتشجيعها وحديها حين يلحقتني من التعب ما يقعدني عن مواصلة السير...

وكانت نعم العون لي في كل ملمة، وخير سلوان في كل محنة...زوجتي الكريمة الوفية أم أحمد، حفظها المولى...

إلى فلذات كبدي ورياحين فؤادي أولادي الأعمام... أحمد، بثنية، رفيدة، مارية. الذين أتبهن إلى الله - سبحانه - أن يكلائهم بالعناية والرعاية، وأن يزيدهم علماً ونوراً وهداية...

إلى أشقائي وشقيقاتي الأعمام الذين حرصوا على رفع معنوياتي في كل الظروف والأحوال وقد كان لهم بالغ الأثر في كثير من العقبات والصعاب....

إلى الذين نهلت من ينابيعهم العذبة الصافية الكلمة الطيبة، فكان لهم الفضل عليّ في هذا المقام.

إلى الأحباب والأقارب والأصحاب...دون ذكر الأسماء...ودون استثناء....

إلى من شاركوني هذه الرحلة الطويلة..... منذ بدايتها، وسعدوا لاقتراب خاتمتها....

إلى كل من أسهم من قريب أو بعيد وسقط من قلبي سهوا...

إليكم جميعا.....أهديكم هذا الجهد المتواضع...

أبو أحمد عمر بن أحمد بن عمر مزديني.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu ALLAH le miséricordieux qui m'a donné le courage et la volonté avec lesquels cette thèse a été achevée.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma directrice de thèse à Mme R.KETTAB, Professeur à l'ENP, ici j'écris ce que je devais dire avant d'écrire, merci beaucoup Mme de m'avoir guidé et suivi. Je ne saurai oublier son aide efficace lors de la réalisation de cette thèse, sa grande disponibilité, ses encouragements et la confiance qu'elle m'a accordée.

Je suis également très reconnaissant à Monsieur BALI Abderrahim, Professeur de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour ses aides précieuses, ses conseils et sa disponibilité.

Mes remerciements vont à; Mr. OUDJIT Mohamed Nadjib Professeur à l'Université de Bab Ezzouar, Mr. CHAID Rabah Professeur à l'Université de Boumerdès ; Mr. HADDADI Smail Professeur à l'Université de Bab Ezzouar; Mr. BEN AZOUZ Brahim Maître de Conférence de l'Ecole Nationale Polytechnique, qui ont bien voulu faire partie du jury et d'apporter leur vive contribution à l'enrichissement de ce travail.

Je remercie le personnel du LCTP Hussein Dey, et LNHC sans oublier le directeur de la société d'adjuvants « GRANITEX » et la société algérienne d'élastomère «SAEL», ainsi que tous les personnels qui m'ont apporté leur aide.

Je remercie tous les enseignants de l'ENP pour le savoir qu'ils m'ont transmis

Je remercie tous mes collègues de travail, Benyamina Smain, Merabti Salem, Hamli ben Zahar Hamid, Touhari Mahfoudh, serikma ,boukratem, Boudina, Chadouli, ... pour leur aide et leur gentillesse spontanée et pour tous les moments que nous avons traversé ensemble.

Mes vifs remerciements de tout mon cœur à ma famille, à mes chers frères, mes sœurs et en particulier mes parents qui m'ont soutenu durant mes études et qui m'ont toujours encouragé. Leur générosité est inestimable.

Je terminerai en remerciant tous ceux et toutes celles qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX.....	
LISTE DES SYMBOLES.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	16

CHAPITRE 01

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS SPECIAUX

Partie I : Les Bétons Ordinaires

1.1	Introduction.....	21
1.2	Les différents constituants d'un béton.....	21
1.2.1	Le ciment portland	21
1.2.2	Les agrégats.....	23
1.2.2.1	Les sables.....	23
1.2.2.2	Les graviers.....	25
1.2.3	Les adjuvants.....	26
1.2.4	L'eau de gâchage.....	26
1.2.5	Les additions.....	27
1.3	Méthodes de formulation du béton	27
1.3.1	Méthodes de Bolomey.....	27
1.3.2	Méthodes d'Abrams.....	27
1.3.3	Méthodes de Faury.....	28
1.3.4	Méthodes de Vallette.....	28
1.4	Mode de préparation du béton.....	29
1.4.1	Malaxage.....	29
1.4.2	Coulage.....	29
1.4.3	Vibration.....	30
1.4.4	Durcissement.....	30
1.4.5	Décoffrage.....	30
1.5	Essais du béton.....	30
1.5.1	Essais sur béton frais.....	30
1.5.1.1	Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	31
1.5.1.2	Mesure de la masse volumique du béton frais.....	32
1.5.2	Essai sur béton durci	32
1.6	Déformation du béton.....	34
1.6.1	Déformations instantanées (le retrait).....	34
1.6.2	Déformations différées (Fluage).....	34

Partie II : Béton de Sable

1.1	Introduction.....	35
1.2	Définition.....	35

1.3	Méthodes de formulation d'un béton de sable.....	36
1.3.1	Approche théorique	36
1.3.1.1	Dosage en fines	37
1.3.1.2	Dosage en eau.....	38
1.3.1.3	Dosage en sable.....	39
1.3.1.4	Estimation de la résistance en compression.....	39
1.3.2	Méthode expérimentale de formulation.....	40
1.4	Propriétés spécifiques des bétons de sable.....	41
1.4.1	Caractéristiques physiques et mécaniques.....	41
1.4.2	Retrait et fluage.....	41
1.4.3	Durabilité des bétons de sable.....	42
1.4.4	Fissuration.....	42
1.5	Propriétés essentielles du béton de sable.....	42
1.5.1	Maniabilité du béton frais.....	42
1.5.2	La résistance.....	43
1.5.2.1	La finesse des fines d'addition.....	43
1.5.2.2	La nature de fines l'addition.....	44
1.5.2.3	La dimension du D_{max}	45
1.5.3	Résistance au gel et au dégel.....	45

Partie III : Béton à base de granulats recyclés

1	Introduction.....	46
1.1	Propriétés des bétons à base de granulats recyclés à l'état frais.....	46
1.1.1	Densité / Masse volumique.....	46
1.1.2	Ouvrabilité.....	47
1.1.3	Rhéologie.....	48
1.2	Propriétés des bétons à base de granulats recyclés à l'état durci.....	48
1.2.1	Résistance à la compression.....	48
1.2.2	Résistance à la traction.....	51
1.2.3	Module d'élasticité.....	52
1.2.4	Déformation.....	53
1.2.4.1	Retrait.....	53
1.2.4.2	Fluage.....	55
1.3	Conclusion.....	56

CHAPITRE 02

VALORISATION DE DECHETS DE CAOUTCHOUC

2.1	Introduction	58
2.2.	Le caoutchouc	58
2.2.1	Caoutchouc naturel.....	58
2.2.2	Caoutchouc synthétique	59
2.3	Production mondiale de caoutchouc.....	59
2.4	Les propriétés de caoutchouc.....	60
2.5	Déchet de caoutchouc.....	60
2.5.1	Les traitements des déchets de caoutchouc.....	61
2.5.2	Granulats et poudrettes du caoutchouc.....	62
2.6	Valorisation des déchets du caoutchouc.....	64
2.6.1	Traitement des particules du caoutchouc.....	65

2.6.2	Effet de déchets de caoutchouc sur les propriétés du béton à l'état frais.....	66
2.6.3	Effet de déchets de caoutchouc sur les propriétés mécaniques.....	68
2.6.4	Retrait des éléments en ciment contenant de particules de caoutchouc.....	73
2.6.5	Conductivité thermique des matériaux à base de particules de caoutchouc	75
2.6.6	Durabilité des matériaux à base de particules de caoutchouc.....	77
2.7	Conclusion	77

CHAPITRE 03

MODELISATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT D'UN BETON ORDINAIRE ET D'UN BETON DE SABLE MODIFIÉS PAR LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

3.1	Introduction.....	80
3.2	Présentation du logiciel «ABAQUS"	80
3.2	Modélisation des éprouvettes en béton à base de poudrette de caoutchouc.....	82
3.3.1	Propriétés du béton.....	82
3.3.2	La géométrie.....	85
3.3.3	Discretisation par élément finis.....	86
3.3.4	Chargement et conditions aux limites.....	87

CHAPITRE 04 : MATERIAUX ET ESSAIS

4.1	Introduction.....	90
4.1	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	90
4.1.1	Ciment portland.....	90
4.1.2	La poudrette de caoutchouc.....	91
4.1.3	Le sable.....	94
4.1.4	Le gravier.....	96
4.1.5	L'adjuvant.....	99
4.1.6	Eau de gâchage.....	99
4.2	Formulations adoptée.....	99
4.2.1	Béton Ordinaire.....	99
4.2.1.1	Méthodes de formulation.....	99
4.2.1.2	Mode opératoire et malaxage.....	100
4.2.2	Béton de sable.....	101
4.2.1	Formulation des bétons de sable de dunes.....	101
4.3	Essais effectués.....	104
4.3.1	Etat frais.....	104
4.3.1.1	Essai d'ouvrabilité.....	104
4.3.1.2	Essais de masse volumique réelle.....	104
4.3.1.3	Conservation des éprouvettes.....	105
4.3.2	Etat durci.....	105
4.3.2.1	Essais de la résistance à la compression.....	105
4.3.2.2	Essais de la résistance à la traction par flexion.....	106
4.3.2.3	Essais de mesure du module d'élasticité.....	107
4.4	Conclusion.....	108

CHAPITRE 05 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1	Introduction	110
5.2	Béton ordinaire.....	110
5.2.1	Essais sur béton frais.....	110
5.2.1.1	Affaissement au cône d’Abrams.....	110
5.2.1.2	La masse volumique	111
5.2.2	Essais sur béton durci.....	112
5.2.2.1	La résistance à la compression	112
5.2.2.2	La résistance à la traction par flexion.....	114
5.2.2.3	La compacité de béton ordinaire modifié.....	116
5.3	Béton de sable de dune.....	117
5.3.1	Essais sur le béton frais.....	117
5.3.1.1	La maniabilité.....	117
5.3.1.2	La masse volumique.....	118
5.3.2	Essais sur le béton durci.....	119
5.3.2.1	La résistance à la compression.....	119
5.3.2.2	La résistance à la traction.....	120
5.3.2.3	La compacité.....	122
5.4	Comparaison entre le béton ordinaire et le béton de sable.....	122
5.4.1	Affaissement.....	122
5.4.2	La masse volumique	123
5.4.3	La compacité.....	124
5.4.4	Résistance à la compression.....	125
5.4.5	Traction par flexion.....	126
5.5	Comportement du béton en compression.....	127
5.5.1	Courbes Contraintes déformations.....	127
5.5.2	Valeurs des modules d’élasticité tangents à l’origine.....	128
5.6	Modélisation numérique.....	130
5.7	Conclusion.....	134
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	136
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	140
	ANNEXE.....	154

LISTE DES FIGURES

Figure1.1 Chaleur d'hydratation de la pâte de ciment déterminée par conduction Calorimétrie.....	22
Figure1.2 Processus d'hydratation d'une pâte de ciment Portland hydraté.....	23
Figure1.3 Effet de volume du sable sur la demande en eau du mortier.....	24
Figure1.4 Effet du volume de sable sur l'ouvrabilité du mortier	25
Figure1.5 Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du rapport G/S.....	25
Figure1.6 Schéma de l'essai d'étalement au cône.....	31
Figure1.7 Essai à la compression du béton.....	33
Figure1.8 Schéma mécanique (statique) de l'essai de traction par flexion.....	33
Figure1.9 Chargement et déchargement.....	35
Figure1.10 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines.....	37
Figure1.11 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable.....	38
Figure1.12 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée.....	39
Figure1.13 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle).....	40
Figure1.14 Temps d'écoulement en fonction du module de finesse.....	42
Figure1.15 Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C).....	43
Figure1.16 Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance.....	44
Figure1.17 Influence de rapport (Eau /Ciment) et de la nature des fines sur le niveau de résistance.....	44
Figure1.18 Effets de la granularité sur la résistance.....	45
Figure1.19 Densité des bétons frais.....	46
Figure1.20 Influence du taux de substitution des granulats recyclés à l'état sec, prémouillés et saturés sur la maniabilité.....	47
Figure1.21 Variation des paramètres rhéologique du béton sans superplastifiant en fonction du taux de GR (E/C=0.6).....	48
Figure1.22 Résistance à la compression des éprouvettes contenant des granulats gros recyclés à 28 et 56 jours (E/C = 0.55).....	49
Figure1.23 Résistance à la compression des éprouvettes contenant des granulats gros recyclés à 28 et 56 jours (E/C = 0.35).....	50
Figure1.24 Evolution de la résistance à la compression du béton avec le taux de substitution des gros granulats de briques concassées.....	50
Figure1.25 Evolution de la résistance à la compression du béton avec le taux de substitution des fins granulats de briques concassées.....	51
Figure1.26 Variation du module d'élasticité en fonction du taux de remplacement des GBR secs.....	52
Figure1.27 Module d'élasticité des bétons multi-recyclés.....	53

Figure1.28 Retrait de dessiccation de bétons recyclés (0 / 20 / 50 / 100 % de gravillons recyclés) en fonction du temps.....	54
Figure1.29 Evolution du retrait du séchage avec le temps (E/C = 0.6).....	55
Figure1.30 Déformation totale due à l'effet de fluage.....	56
Figure1.31 Fluage relatif des bétons recyclés de différente résistance.....	56
Figure2.1 Impact environnemental de la combustion des pneus usagés sur l'environnement.....	62
Figure2.2 Produits dérivés de pneus.....	62
Figure2.3 Processus de broyage cryogénique.....	63
Figure2.4 Composite prétraité.....	66
Figure2.5 Variation de l'affaissement des bétons en fonction de la teneur en caoutchouc et en fumée de silice.....	67
Figure2.6 Variation de la résistance à la compression de différentes compositions de béton pour (a) 10%, et (b) 30% des granulats recyclés.....	68
Figure2.7 Résistance mécanique.....	70
Figure2. 8 Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la compression	70
Figure2.9 Changements de la résistance à la compression en fonction de la quantité de mélange de poudre caoutchouc.....	71
Figure2.10 Résistance à la compression vs le temps, pour différents (%) en la poudre caoutchouc.....	72
Figure2.11 Retrait libre en fonction du temps du mortier caoutchouté.....	74
Figure2.12 Comparaison entre (a) le retrait restreint et (b) le retrait libre.....	75
Figure2.13 Variation de la conductivité thermique du composite de ciment avec le rapport volumique des particules de caoutchouc.....	76
Figure3.1 Elément béton.....	82
Figure3.2 Comportement typique du béton sous un chargement uniaxial.....	83
Figure3.3 Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression uniaxial.....	85
Figure3.4 La discrétisation par ABAQUS.....	86
Figure3.5 Chargement et appuis.....	87
Figure4.1 Particules en caoutchouc utilisées dans le programme expérimental.....	92
Figure4.2 Résultats Infra Rouge de la poudre de caoutchouc.....	92
Figure4.3 Résultats du Microscope électronique à balayage.....	93
Figure4.4 Texture et forme des particules des deux sables.....	94
Figure4.5 Analyse granulométrique du sable de dunes de Boussâada.....	96
Figure4.6 Analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/15.....	98
Figure4.7 Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	104
Figure4.8 Conservation des éprouvettes.....	105
Figure4.9 procédure de l'écrasement	106
Figure4.10 Essai de traction par flexion.....	107
Figure4.11 Dispositif de mesure du module d'élasticité.....	108

Figure5.1 Courbe comparative des affaissements mesurés pour le béton ordinaire modifié.....	111
Figure 5.2 Courbe comparative de densité pour le béton ordinaire modifié.....	112
Figure5.3 Evolution de la résistance à la compression par rapport au témoin en fonction du pourcentage de caoutchouc pour béton ordinaire modifié par de la poudrette de caoutchouc (BOPC).....	113
Figure5.4 Evolution de la résistance à la traction par flexion par rapport au témoin modifié par de la poudrette de caoutchouc (BOPC).....	115
Figure5.5 Compacité en fonction de dosage de poudrette de caoutchouc (BOPC)...	116
Figure5.6 Maniabilité de BSDPC en fonction du pourcentage de la poudrette caoutchouc.....	118
Figure5.7 Courbe comparative de la masse volumique de BSDPC.....	119
Figure5.8 Evolution de la résistance à la compression par rapport au témoin en fonction du pourcentage de la poudrette caoutchouc pour BSDPC.....	120
Figure5.9 Evolution de la résistance à la traction par flexion.....	121
Figure5.10 Compacité en fonction de dosage de poudrette de caoutchouc (BSD PC).	122
Figure5.11 La masse volumique de béton BOPC et BSDPC.....	123
Figure5.12 Compacité relatif du BOPC et BSDPC en fonction de la poudrette caoutchouc.....	124
Figure5.13 Rapport de la résistance à la compression par rapport à la résistance à la compression du pilote en fonction de la teneur en caoutchouc.....	125
Figure5.14 Rapport entre la résistance de traction de l'BOPC et du BSDPC avec le béton témoin selon la teneur en poudrette caoutchouc.....	126
Figure5.15 Courbe contrainte-déformation du Béton Ordinaire modifié avec PC.....	128
Figure5.16 Courbe contrainte-déformation du Béton de sable de dunes modifié.....	128
Figure5.17 Modèle numérique d'une éprouvette cubique (150 x 150 x 150) mm ³ ...	131
Figure5.18 Déformation longitudinale distribuée.....	132
Figure5.19 Contrainte-déformation de la courbe BOPC 3%.....	134
Figure5.20 Courbe contrainte-déformation du BSDPC 3%.....	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Valeurs du module de finesse des compositions granulaires des bétons.....	28
Tableau 1.2 Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement.....	31
Tableau 2.1 Propriétés mécaniques du PU pur et des composites.....	69
Tableau 3.1 Données des cinq points.....	85
Tableau 4.1 Composition chimique et minéralogique du ciment.....	92
Tableau 4.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	92
Tableau 4.3 Propriétés physiques de la poudre de Caoutchouc.....	94
Tableau 4.4 Propriétés physiques du sable des dunes et du sable naturel.....	95
Tableau 4.5 Analyse chimique sommaire du sable de dunes et de sable naturel.....	95
Tableau 4.6 Analyse chimique de base du gravier 3/8 et 8/15.....	97
Tableau 4.7 Propriétés physiques des graviers 3/8 et 8/15.....	98
Tableau 4.8 Composition du béton ordinaire modifié avec poudre de caoutchouc.....	100
Tableau 4.9 Maniabilité en fonction du dosage en eau.....	103
Tableau 4.10 Composition et caractéristiques de la formulation de base de (BSD PC)....	103
Tableau 5.1 La résistance à la traction par flexion du béton à 28 jours.....	114
Tableau 5.2 Pourcentage de la résistance à la traction par rapport au béton témoin.....	114
Tableau 5.3 Comparaison des Maniabilités (s).....	117
Tableau 5.4 Caractéristiques des compositions BSDPC.....	118
Tableau 5.5 La résistance à la compression du béton de sable de dunes.....	119
Tableau 5.6 Pourcentage de la résistance à la compression par rapport au béton témoin pour BSDPC.....	120
Tableau 5.7 La résistance à la traction par flexion du béton de sable de dunes.....	121
Tableau 5.8 Pourcentage de la résistance à la traction par flexion par rapport au béton témoin pour BSDPC.....	121

Liste des symboles

BO : Béton Ordinaire

B.S : Béton de sable.

BO PC : Béton ordinaire modifié à la poudrette de caoutchouc.

BSD PC : Béton de sable de dunes modifié à la poudrette de caoutchouc.

Mf : Modules de finesse.

P : Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

D : Diamètre du plus gros grain.

E/C : Rapport pondérale (eau / ciment).

ρ : Masse volumique.

F : Charge de rupture.

S : Section de l'éprouvette.

σ_c : Résistance à la compression.

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 de plus gros grain de l'étendue granulaire.

E^{vj} : Module de déformation longitudinale instantanée du béton a j jours.

E_{ij} : Module de déformation instantanée.

E_{flu} : Fluage.

ES : Equivalent de sable.

C: quantité de ciment en (Kg/m³).

f : Le dosage en fillers.

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80 μ m .

V0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8.

f : Surface spécifique exprimée en cm²/g du constituant.

K1 : Coefficient pouzzolanique.

K2 : Coefficient d'activité du filler calcaire.

Vair: Volume d'air.

SN : Sable Naturel.

IR : Infra rouge.

NBR: Acrylonitrile butadiène rubber (poudrette de caoutchouc).

LA : Los Angeles.

SSB : Surface Spécifique de Blaine (cm²/g).

FMR : Les fibres métalliques recyclées.

**INTRODUCTION
GÉNÉRALE**

INTRODUCTION GENERALE

Une demande accrue de granulats naturels s'est accentuée ces dernières années pour approvisionner les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Le stock disponible de ces granulats ne satisfait plus cette demande et le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison d'une réglementation rigoureuse (préservation des paysages, interdiction d'extraction de granulats alluvionnaires,...).

En Algérie, le secteur du bâtiment consomme beaucoup d'énergie et utilise beaucoup de ressources naturelles ; des millions de tonnes de granulats et de ciment sont employés dans la réalisation du bâtiment et ouvrages de travaux publics.

En outre, l'augmentation de la population mondiale et accroissement du nombre d'individus qui conduisent des automobiles a induit une augmentation de la consommation de pneus dont environ 26000 tonnes de pneus usagés sont produits chaque année en Algérie.

Les études ont montré que plus de 270 millions de pneus usagés sont entreposés annuellement dans des décharges, des stocks ou des décharges illégales, ce qui représente un danger majeur pour l'environnement, cette quantité devrait atteindre 1200 millions de pneus par an d'ici 2030 [Jie Xu1 ,et all (2018)]. A cet effet, la valorisation des matériaux locaux et la production de matériaux de construction écologiques à partir de déchets recyclés s'avèrent actuellement une solution adéquate aux problèmes économiques des pays en voie de développement. Les matériaux composites grâce à leur faible poids propre, leurs performances mécaniques élevées (résistance à la traction, isolation thermique et acoustique, résistance à des produits faiblement radioactifs,...) sont des matériaux particulièrement intéressants. Par ailleurs, l'utilisation des déchets résultant des pneus usagés dans la construction peut résoudre un double problème : d'une part environnemental et d'autre part économique et technique. En effet, certains déchets possèdent des qualités très importantes et leur incorporation dans certains matériaux de construction amélioreraient leurs propriétés mécaniques, thermiques etc.

L'incinération des pneus usagés est l'un des moyens les moins chers et le plus simple d'élimination des déchets. Néanmoins, elle pose des problèmes majeurs d'incendie et de

pollution de l'environnement. Ils peuvent aussi être utilisés dans les fours pour ciment comme combustible.

En raison d'une nouvelle réglementation interdisant toute nouvelle décharge ou incinération de pneus en France, qui génère plus de 10 millions de pneus usagés par an, l'offre de décharges a commencé à diminuer en juillet 2002[Karakurt C (2015)].

Malheureusement, les études montrent qu'en Algérie, la proportion de déchets récupérés n'atteint pas 10% du total des déchets produits. Seule la moitié environ des déchets de pneus est valorisée et utilisée dans des projets de génie civil et géotechnique, comme le projet de stabilisation d'une route en remblai utilisant la technologie du pneu sol dans la ville de Bousmail (ouest d'Alger) ou pour la fabrication de tapis routiers. Des chercheurs du monde entier s'attellent à la tâche d'évaluer l'utilité de ces déchets industriels dans les matériaux cimentaires, mais leurs performances doivent d'abord être déterminées. Il convient de souligner les recherches récentes sur l'utilisation des granulats de caoutchouc issus du broyage des vieux pneus comme substitut partiel des granulats fins et grossiers.

Les études effectuées jusqu'à présent sur le béton caoutchouté ont montré que ces matériaux ont une résistance à la compression et une densité inférieures à celles du béton ordinaire. Par la suite, des tentatives ont été faites pour améliorer la résistance et la durabilité des matériaux cimentaires caoutchoutés.

D'autre part, un béton de sable est un béton ne comportant pas de gravillons ou ne comportant qu'une proportion telle que le rapport massique (Sable / Gravillon) soit supérieur à 1. Il présente beaucoup d'avantages tels que : la bonne résistance, le bel aspect de surface, l'absence de ségrégation, la facilité de la mise en œuvre, etc...Les études ont montré que les bétons de sable peuvent remplacer le béton ordinaire dans certains usages.

L'Algérie dispose d'un grand gisement de sable de dune sur des terres inexploitées. Malgré les caractéristiques potentielles de ce matériau, il est rarement utilisé. De plus, les études ont trouvé que l'utilisation de sable de dune comme ajout partiel de masse au ciment Portland pourrait donner lieu à un nouveau liant aux propriétés physiques et mécaniques distinctes.

La maîtrise des interactions matrice-liant-ajouts permet de prévoir le comportement des bétons modifiés à tous les âges et de recommander des formulations pour différentes utilisations (enfouissement, isolation, structure...).

L'objectif de notre travail consiste à comparer le comportement d'un béton ordinaire et d'un béton de sable de dunes modifiés par une poudre de caoutchouc des pneus usagés, avec des faibles pourcentages sur le comportement de béton de sable de dunes et de béton ordinaire, également on compare ces résultats avec un modèle numérique a été effectué.

Notre travail est divisé en deux volets principaux : revue bibliographique et étude expérimentale et numérique, dont le premier se compose de:

Chapitre 01 : revue bibliographique sur les bétons spéciaux

Partie I : Les Bétons Ordinaires : définition, constituants, préparation, caractéristiques, méthode de formulation, utilisations...;

Partie II: Béton de Sable : définition, constituants, préparation, caractéristiques, méthode de formulation, utilisations...

Partie III : Béton à base de granulats recyclés.

Chapitre 02 : Valorisation de déchets de caoutchouc (historiques, différents types de caoutchoucs, granulats de caoutchouc, propriété physique et chimique...etc.).

Chapitre 03 : modélisation numérique du comportement d'un béton ordinaire et un béton de sable modifiés par poudre de caoutchouc

Le deuxième volet comporte les chapitres suivants :

Chapitre 04 : Matériaux et essais

Chapitre 05 : Résultats et discussions.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion générale et des recommandations.

PREMIER VOLET :
REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LES BÉTONS SPÉCIAUX

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS

SPECIAUX

Partie 1 : Les Bétons Ordinaires

1.1. Introduction

Un bon béton est caractérisé par une résistance mécanique conforme aux besoins de la structure, une rhéologie suffisante qui assure une mise en œuvre facile, un squelette granulaire donnant une compacité maximale et également un comportement durable vis-à-vis d'un milieu agressif (sulfate, acide, etc.). Il est composé de plusieurs constituants élémentaires tels que : le ciment, les agrégats et l'eau. Pour répondre aux besoins de certains usages des ajouts peuvent être envisagés tels que : les fines, les additions....etc. Ces propriétés requises à l'état frais et durci dépendent du bon choix des matériaux de construction et de la maîtrise des différentes méthodes de formulation.

Dans cette partie, nous allons présenter un état des lieux sur les propriétés des bétons à l'état frais, état durci, les méthodes de formulation et la durabilité.

1.2. Les différents constituants d'un béton

La formulation d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents agrégats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités sont recherchées pour la construction d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. Toute méthode de composition de béton doit être guidée par la résistance, l'ouvrabilité (facilité de mise en œuvre) et la durabilité. La destination du béton à un usage déterminé fixe le dosage des différents constituants de celui-ci, caractérisés par leurs propriétés physiques, chimiques, et mécaniques.

1.2.1. Le ciment portland

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température (vers 1450°C) et le broyage d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion en moyenne de 80% et 20%. Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils forment une pâte susceptible de faire prise et de durcir grâce à ces réactions d'hydratation en général exothermique.

Les matériaux s'agglomèrent et fusionnent partiellement pour former des nodules durs et noirs de 5 à 30 mm de diamètre : le clinker. Ce dernier est constitué de quatre phases principales :

- Le silicate tricalcique ($\text{SiO}_2 - 3 \text{CaO}$), noté C_3S
- Le silicate bicalcique ($\text{SiO}_2 - 2 \text{CaO}$), noté C_2S
- L'aluminate tricalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 3 \text{CaO}$), noté C_3A
- Le Ferro-aluminate tétracalcique ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - 4 \text{CaO}$), noté C_4AF

Les compositions de ciment nécessitent des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc., pour améliorer certaines caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques du ciment. On obtient ainsi un liant de composition binaire voire tertiaire. Les fumées de silice sont des particules sphériques fines de très faible diamètre, de l'ordre du dixième de micron, utilisées dans la composition. Elles peuvent, par leur finesse, s'insérer entre les grains de ciment et développer la compacité du béton. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve, en général, à la surface des grains de ciment, des zones chargées négativement [Bombléd .1973]. Il y a trois fois plus de charges négatives que de charges positives. Les réactions chimiques des composants du ciment avec de l'eau, issues de l'hydratation du ciment Portland, sont exothermiques. La quantité de chaleur dégagée varie en fonction du temps. L'utilisation des méthodes usuelles de calorimétrie et de conductimétrie permettent de mesurer la quantité de chaleur dégagée en fonction du temps et de suivre et mettre en évidence les différentes étapes de l'hydratation du ciment (Figure. 1.1).L'hydratation du ciment Portland est plutôt plus importante.

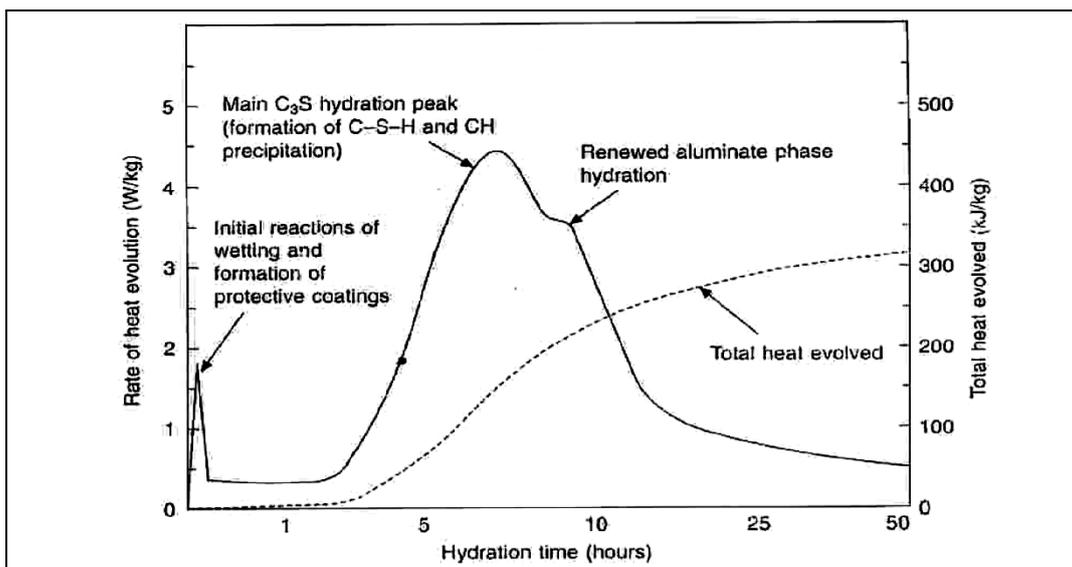


Figure 1.1. Chaleur d'hydratation de la pâte de ciment déterminée par conduction calorimétrie [Newman et al. 2004].

La figure 2.1 résume de façon simplifiée l'évolution de la réaction d'hydratation de la structure de la pâte de ciment [Locher .1976].

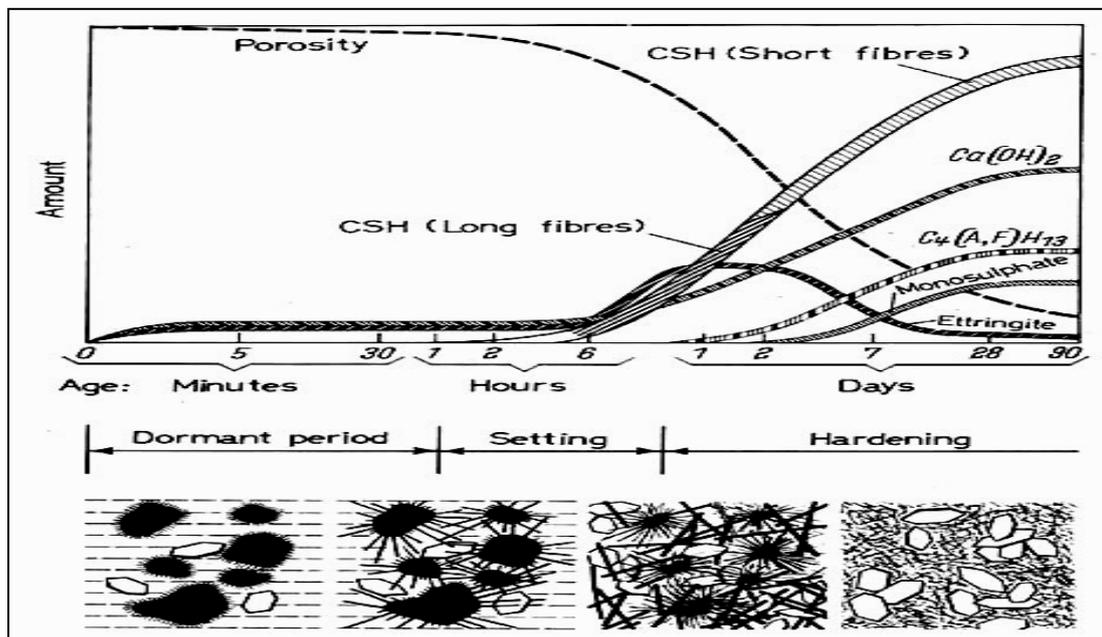


Figure 1.2. Processus d'hydratation d'une pâte de ciment Portland hydraté [Locher .1976].

1.2.2. Les granulats

Les granulats sont des petits morceaux de roches (entre 0 et 125 mm), l'utilisation des granulats dans la fabrication d'un béton est justifiée par le faible coût, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment - eau [Adam.1992]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influencent d'une manière considérable le comportement du béton à l'état frais.

La norme européenne EN 12620 ; traite des granulats utilisés dans le béton. Elle s'applique pour les granulats d'origine naturelle ou artificielle, les granulats recyclés et les mélanges de granulats fins et gros. La masse volumique des granulats doit être de 2000 kg/m³ au minimum. La norme s'applique également aux fillers inertes (aussi appelés granulats très fins) utilisés dans le béton.

1.2.2.1. Les sables

La formulation d'un béton de bonne qualité nécessite l'utilisation des sables ayant une bonne distribution granulométrique et un faible coefficient d'absorption d'eau. Les sables roulés sont préférables par rapport aux sables concassés. Le type de sable et son module de finesse jouent un rôle très important dans la détermination des propriétés des bétons. On définit les sables comme étant la fraction des agrégats pierreux dont les grains ont des

dimensions comprises entre 80 μm et 05 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsque l'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables.

En fait, la définition granulométrique du sable est complexe, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination. [Kettab. 2007]

Le rapport sable/granat total est un paramètre fondamental de la formulation des bétons. Il gouverne la compacité du squelette granulaire qui influence fortement les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci. Outre le module de finesse, le pourcentage de particules fines dans le squelette granulaire influence les propriétés du béton et constitue de ce fait un paramètre d'étude. L'augmentation de volume du sable dans le mortier [Naoki et al.1996], implique une demande en eau et en superplastifiant et, par conséquent une ouvrabilité plus importante (figures 1.3 et 1.4).

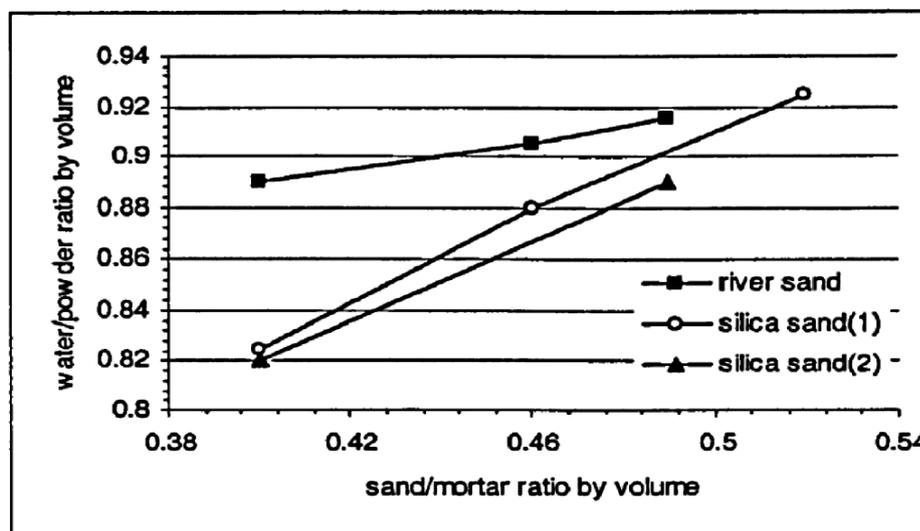


Figure 1.3. Effet de volume du sable sur la demande en eau du mortier [Naoki et al.1996]

L'angularité des granulats fins, caractérisée par la masse volumique apparente, influe sur la fluidité des mortiers. En effet, des auteurs ont constaté que plus la masse volumique apparente est élevée plus le mortier est fluide [Harini et al. 2012]. Bouziani et al.2012 ont trouvé qu'un remplacement massique de 10% du sable alluvionnaire par un sable de dunes contribue à l'amélioration de la fluidité et à la diminution de la viscosité du béton fluide étudié.

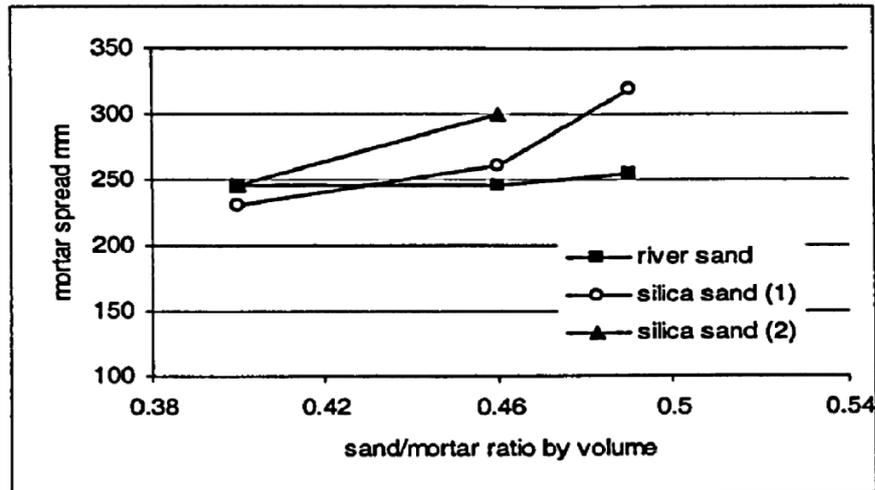


Figure 1.4. Effet du volume de sable sur l'ouvrabilité du mortier [Naoki et al.1996].

1.2.2.2. Les graviers

Les gros granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Le choix des granulats roulés ou concassés dépend de la disponibilité locale des matériaux.

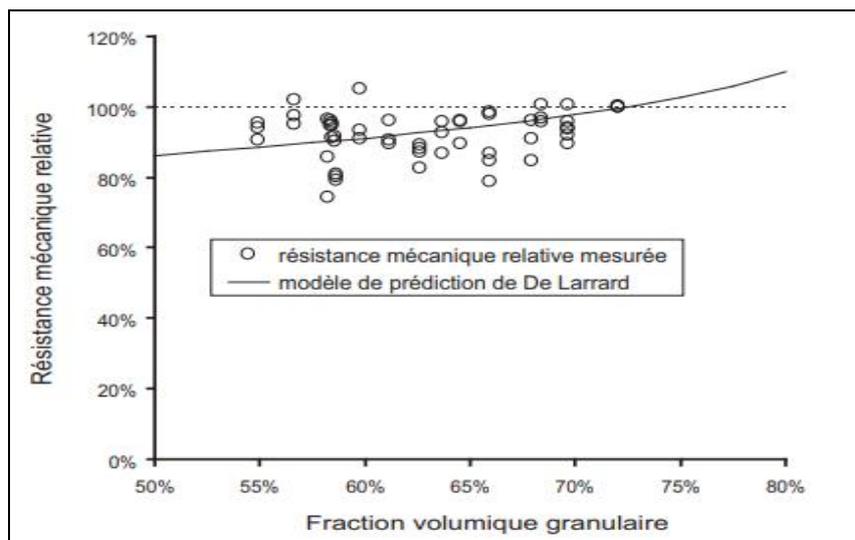


Figure 1.5. Variation de la résistance mécanique à la compression en fonction du rapport G/S [Yammine 2007].

L'influence du rapport G/S sur la résistance mécanique à la compression, représentée sur la figure 1.5, a montré que la diminution du rapport G/S affecte négativement la résistance mécanique du béton. [Yammine 2007]

Une étude parallèle montre, que la quantité des gros granulats peut être réduite sans grande influence sur la résistance à la compression dans la limite de 0,3 à 0,4 du rapport gros granulats sur la quantité totale des granulats [El-Ariss 2006].

1.2.3. Les adjuvants

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton, pour modifier les propriétés à l'état frais et/ou à l'état durci [Dreux 1998]. Ils sont destinés à agir sur la composition.

A l'état frais : L'exigence principale concerne la facilité de mise en œuvre, sans affecter le rapport eau / ciment. Sont classés dans cette catégorie :

- Les agents réducteurs d'eau et les agents hautement réducteurs d'eau (superplastifiants).

Durant la prise : Selon la situation du chantier, on peut demander d'accélérer ou de ralentir la prise du béton, du mortier ou du coulis :

- Accélérateur de prise et de durcissement et retardateur de prise.

Durant le durcissement : Ici, en général, l'intérêt est porté sur le raccourcissement du délai de décoffrage ou de mise en service.

Après durcissement : Il s'agit généralement de donner des performances concernant la durabilité du béton.

1.2.4. L'eau de gâchage

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences) et la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton). Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des agrégats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables.

L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère aux bétons frais les propriétés rhéologiques d'un pseudo liquide permettant l'écoulement et le moulage ; une fonction chimique d'hydratation du ciment qui apporte la résistance mécanique [NF-EN-1008].

1.2.5. Les additions

Ce sont les cendres volantes, les additions calcaires, les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau et les fumées de silice. Ces poudres sont utilisées comme constituants du ciment ou additions dans le béton.

1.3. Méthodes de formulation du béton

1.3.1. Méthode de Bolomey

A l'aide d'une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les Agrégats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) * \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (1.1)$$

Avec :

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d,

D : diamètre du plus gros grain,

d : diamètre du plus petit grain,

A : varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort. Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue.

1.3.2. Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange d'Agrégats à partir de la connaissance des modules de finesse des Agrégats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum. Les modules optimaux pour béton d'Agrégats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le tableau 1.1 en fonction du dosage en ciment et de la dimension D de l'Agrégat le plus gros. La règle du

mélange d'Abrams permet de calculer les pourcentages relatifs d'agrégats de modules de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f choisi pour le mélange. Tout réside donc, dans cette méthode, sur le choix judicieux du Module de finesse du mélange à réaliser (avec les Agrégats seuls). Ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que : forme, nature et dimension des agrégats, dosage en ciment, résistance et plasticité désirées, etc.

Tableau 1.1. Valeurs optimales du module de finesse des compositions granulaires des bétons
[Neville2000]

Dosage en ciment (kg/m ³)	Dimension maximale D des Agrégats (mm)						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,6	5,8	6
300	4,2	4,6	5	5,4	5,65	5,85	6,2
350	4,3	4,7	5,1	5,5	5,73	5,88	6,3
400	4,4	4,8	5,2	5,6	5,8	5,9	6,4

1.3.3. Méthode de Faury

En 1942, J. Faury proposa, suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu. Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un agrégat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$, c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $\sqrt[5]{D}$.

1.3.4. Méthode de Vallette

Vallette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par dosage des bétons à compacité maximale ou dosage des bétons à minimum de sable ou dosage des bétons à granularité discontinue. La méthode Vallette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes, elle se résume par son principe, où on partira, en général, de

deux Agrégats (bétons binaires) : un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable. On calcule le dosage de sable et de ciment devant donner, en principe, le mortier plein à minimum de ciment. Ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur en ce qui concerne la convenance du béton. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment. Les dosages en ciment auxquels on aboutit ainsi sont presque toujours très nettement au-dessous des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées. [Dreux 1998, Neville 2000]

1.4. Mode de préparation du béton

1.4.1. Malaxage

On mélange les composants à la main, à la pelle, ou au moyen d'engins mécaniques, tels qu'une bétonnière. Pour des grands travaux, le béton est fabriqué dans une centrale qui mélange automatiquement les constituants selon une composition programmée à l'avance. La production peut atteindre plus de 300 m³ /h. L'objectif est de mélanger suffisamment les composants pour obtenir une pâte homogène, au sein de laquelle les éléments les plus fins, sable et ciment, comblent les vides laissés par l'agglomération des Agrégats ; on doit également envelopper complètement les graviers pour obtenir, une fois sèche, un matériau constructif d'une roche.

1.4.2. Coulage

Le béton peut être transporté jusqu'au chantier par des toupies, bétonnières montées sur camion. Une pompe à béton achemine le matériau en hauteur ou sur des sites difficilement accessibles aux camions. Sur les gros chantiers, le pompage du béton permet des cadences beaucoup plus importantes que si l'on emploie des bennes amenées par grue sur le lieu de coulage. Le béton peut également être projeté au moyen de compresseurs pneumatiques. Ce matériau, qui ne nécessite pas de coffrage, est utilisé lors de la construction de piscines, ou pour reconforter des talus de terre instables risquant de s'écrouler.

1.4.3. Vibration

Une fois mis dans un coffrage, le béton est vibré à l'aide d'aiguilles ou par des vibreurs électriques montés sur le coffrage. L'air expulsé durant cette phase provient des cavités entre les graviers, qui se remplissent de la pâte fine de ciment et de sable. La vibration permet un mélange efficace et améliore le durcissement.

1.4.4. Durcissement

La température ambiante a une grande influence sur le durcissement ou prise du béton. Par temps de gel, il peut être nécessaire de chauffer l'eau, parfois même les agrégats, avant de malaxer et de couvrir le matériau pour retenir la chaleur dégagée par les réactions exothermiques lors de la prise du ciment. Par temps très chaud, au contraire, on doit arroser à la prise afin que l'eau ne s'évapore et provoque un retrait, c'est-à-dire une diminution de volume de la pièce. Ce phénomène engendre des fissures dans le béton. Plus le béton est maintenu humide sur une longue période, plus sa résistance sera importante. La prise a lieu en quelques heures.

1.4.5. Décoffrage

Pour les pièces préfabriquées et les éléments non porteurs, il est possible de décoffrer quelques heures seulement après le coulage. En général, par temps doux, on coule le béton le soir pour décoffrer le lendemain matin. Les éléments porteurs, comme les poutres ou les planchers, doivent rester plusieurs jours dans leur coffrage : le béton doit durcir suffisamment pour supporter leur propre poids, ainsi que les charges qui y seront appliquées. [Neville 2000]

1.5. Essais du béton

Il existe deux types d'essais sur béton :

- Essais sur béton frais ;
- Essais sur béton durci.

La plupart de ces essais sont normalisés ou font l'objet de recommandations ou de directivités.

1.5.1. Essais sur béton frais [Essai d'affaissement, AFNOR, Paris 1981]

Tous ces essais mesurent la consistance et la maniabilité de béton. Les trois principaux essais sont :

- L'essai d'affaissement au cône d'Abrams ;

- L'essai d'étalement à la table à secousse ;
- L'essai d'écoulement au maniabilimètre.

1.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

La consistance est une grandeur qui sert à caractériser l'aptitude à la mise en œuvre d'un béton. Sa mesure, s'effectue avec différents dispositifs dont le plus répandu est le cône d'Abrams qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassées avec une tige en acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- Soulever le cône avec précaution et mesurer l'affaissement ;

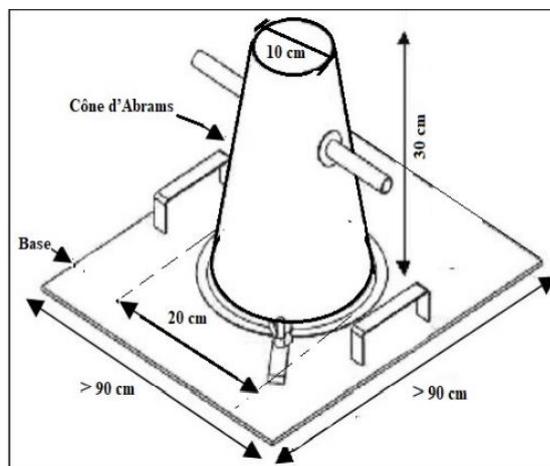


Figure. 1.6 Schéma de l'essai d'étalement au cône

Plus l'affaissement est important et plus le béton est mou ou fluide. Le tableau I.2 montre le type du béton et sa mise en œuvre en fonction de l'affaissement :

Tableau 1.2 Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement.

[Essai d'affaissement, AFNOR, Paris 1981]

Affaissement (cm)	Béton	Mise en œuvre
0 à 2	Très ferme	Vibration puissante
3 à 5	Ferme	Bonne vibration
6 à 9	Plastique	Vibration courante
10 à 13	Mou	Piquage
10 à 14	Très mou à liquide	Léger Piquage

1.5.1.2. Mesure de la masse volumique du béton frais

Cet essai consiste à :

- Prendre le poids de récipient à vide, soit M_0 ;
- Remplir un récipient d'un échantillon de volume V et de poids M_0 connu par un échantillon du béton frais, qui a subi vibration. ;
- Araser et lisser les surfaces et prendre le poids de ce récipient du béton, soit M_1 .

La masse volumique du béton frais est :

$$\rho = \frac{M_1 - M_0}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1.2)$$

1.5.2. Essai sur béton durci

1.5.2.1. Détermination de la masse de l'éprouvette et de sa masse volumique

Avant de procéder aux essais mécaniques, les éprouvettes sont pesées avec une erreur relative inférieure à 0,1 %. On mesure la masse des éprouvettes à 7, 28 et 90 jours et ceci pour connaître l'évolution de la masse volumique du béton durci.

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1.3)$$

1.5.2.2. Essais mécaniques

a)- Essai de compression

En général, la qualité du béton à l'état durci est jugée par le résultat de l'essai de la résistance à la compression. En principe, cette propriété dépend directement de la composition de la pâte de ciment. Ces essais sont effectués sur des éprouvettes cubiques ou cylindriques à l'aide d'une machine d'écrasement conformément à la norme NF P 18-406.

L'éprouvette doit être placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. Le résultat de la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai correspond à la résistance caractéristique à la compression du béton étudié.

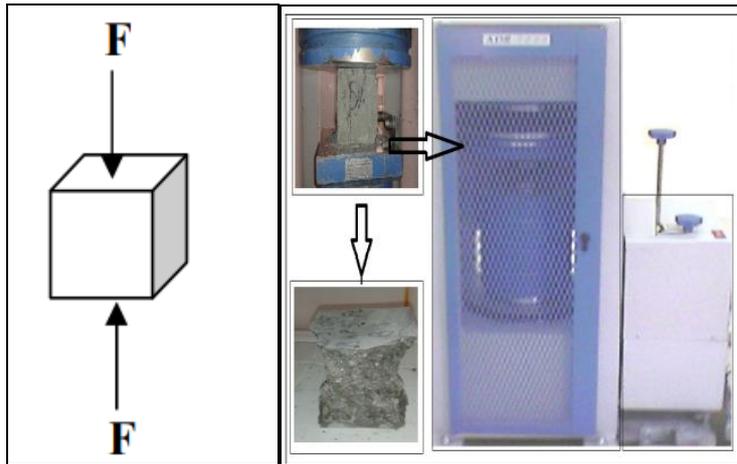


Figure 1.7. Essai à la compression du béton.

La résistance à la compression correspondant à la contrainte maximale est :

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \text{ (MPa)} \quad (1.4)$$

D'où :

σ_c : Résistance à la compression ; F : Charge de rupture ; A : Section de l'éprouvette,

b)- Essai de traction par flexion

C'est un essai destructif réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) et (4×4×16) cm³ conformément à la norme NF P 18-407, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une machine automatique de flexion. La résistance à la traction en MPa, est la moyenne des résultats de trois éprouvettes. La contrainte de traction par flexion est donnée par la relation ci-dessous. La figure 1.8, montre un schéma mécanique de cet essai.

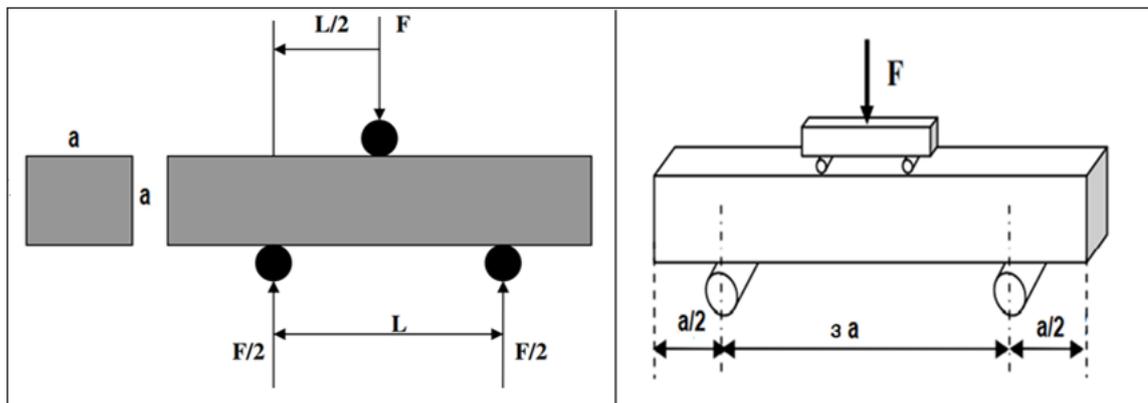


Figure 1.8. Schéma mécanique (statique) de l'essai de traction par flexion.

La résistance à la traction par flexion 3 et 4 points se calcule par les formules suivantes :

$$\sigma_t = 1.8 \frac{F}{a^2} \quad \sigma_f = \frac{3FL}{2a^3} \quad (1.5)$$

D'où :

σ_t : Résistance à la traction (contrainte à la flexion en MPa);

F: Charge de rupture (en KN);

a: Côté de la section carrée l'éprouvette prismatique (mm²).

L: distance entre appuis (en mm).

1.6. Déformation du béton

1.6.1. Déformations instantanées (le retrait)

Après sa mise en œuvre, le béton subit des déformations, même en absence de charges. En effet ses propriétés se changent avec le temps suivant l'état de l'atmosphère, la température et les charges appliquées.

Il sera le siège de transformations diverses. En l'absence de toute charge, les bétons en général subissent des déformations plus ou moins importantes quand leur contenu en eau ou l'humidité du milieu environnant varient. Pour les bétons exposés à l'air, on observe une diminution des dimensions initiales. Cette variation est due principalement à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton. Ce phénomène porte le nom de retrait.

1.6.2. Déformations différées (Fluage)

Sous l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau viscoélastique. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage.

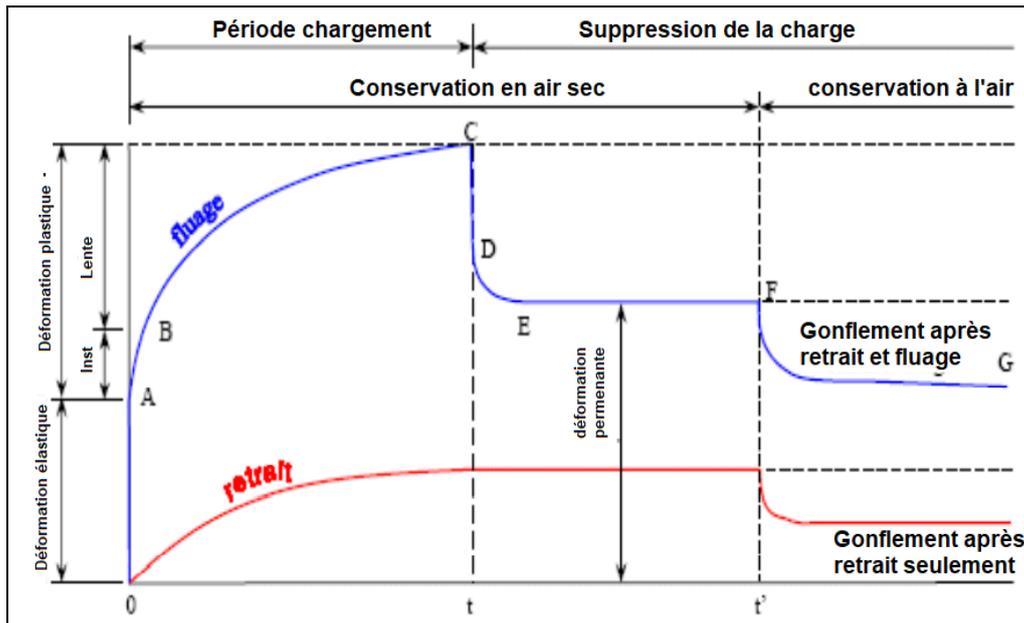


Figure 1.9.Chargement et déchargement. (Déformation réactive de retour)[KOLLER 2002]

Partie 02: Béton de Sable

1.1. Introduction

La forte consommation d'agrégats s'accroît d'une année à l'autre. En Algérie, Les gros agrégats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. En revanche, notre pays, et notamment le sud algérien est riche en grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturelles et artificielles. La réflexion sur l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire [Benaïssa 1992]. Le béton de sable a fait l'objet d'une norme expérimentale P18-500 AFNOR et se compose de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau. Il se distingue des bétons ordinaires par son faible dosage en gravillons et des mortiers par son moindre dosage en ciment. Le béton de sable possède des propriétés physiques et mécaniques qui lui permettent de remplacer le béton ordinaire dans certains usages et résoudre certains problèmes économiques et techniques posés par le béton traditionnel [Baderina 2007].

1.2. Définition

Les bétons de sables, sont des bétons composés juste de sable, de ciment, et d'eau. Pour des besoins de certains usages d'autres ajouts peuvent être envisagés tels que : des adjuvants, des fibres, des gravillons,...etc,

Ces bétons sont composés de sable comme élément majoritaire, au lieu des agrégats de gros calibres. Les bétons de sable se distinguent des bétons classiques par leur faible dosage ou non en gravillons tandis qu'un dosage en ciment est similaire aux bétons entre (300 et 400 kg/ m³) et leur destinations. On les distingue des mortiers destinés à la réalisation des joints et des enduits. Ce béton est destiné à réaliser des éléments structuraux, dans le domaine du bâtiment et du génie civil ; il doit avoir une résistance caractéristique suffisante ; qui est liée à la compacité des constituants mélangés [Guennoun 2003].

1.3. Méthodes de formulation d'un béton de sable

Pour réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques, plusieurs approches de formulation ont été envisagées. A cet effet, il y a lieu de citer deux types de formulations, dont l'une est théorique et l'autre expérimentale, en se basant sur la résistance mécanique et la maniabilité de ces bétons.

1.3.1. Approche théorique

Lors d'une formulation d'un béton, le premier souci qui se pose est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange. Cependant l'obtention de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. [Dreux 1998] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{max}). Cette relation s'écrit comme suit [Sablocrete 1994]:

$$V = V_0 \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{1/5} \quad (1.6)$$

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

Sur la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc, cette méthode trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations.

1.3.1.1. Dosage en fines

Afin d'optimiser la compacité du béton de sable une distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 μ m et l'étendue du sable comprise entre 80 μ m et le diamètre maximal a été effectuée, la porosité du sable peut se calculer selon la formule (1.7) :

$$P_s(V) = 0.75 \cdot \left(\frac{0.08}{D}\right)^{1/5} \quad (1.7)$$

- $P_s(V)$: Porosité du sable d'étendue 80 μ m ;
- D_{max} : 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).

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80 μ 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.

$$[Fines] = 0.38 \cdot \left(\frac{0.08}{D_{max}}\right)^{1/5} \quad (1.8)$$

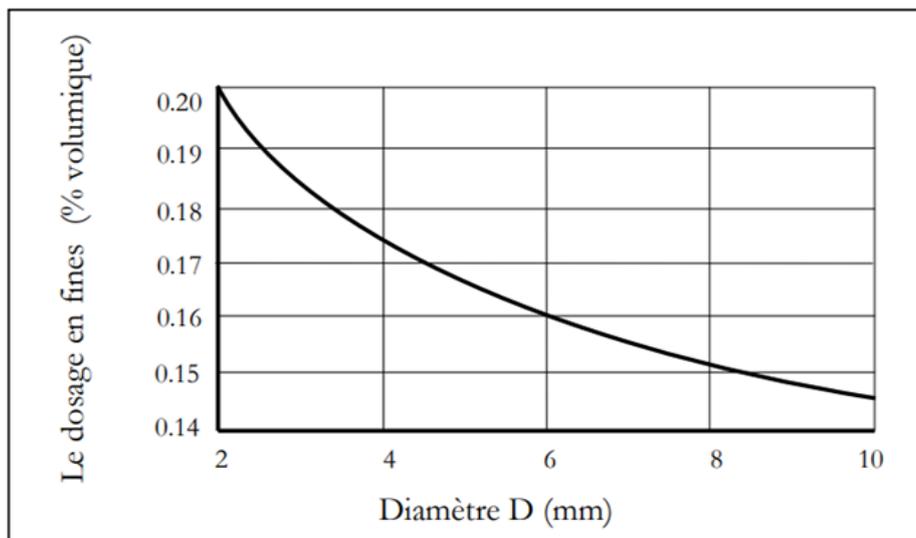


Figure.1.10 .Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [Sablocrete 1994]

1.3.1.2. Dosage en eau

Les travaux de Caquot sur la compacité ont conduit 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.

$$(E + V)_{min} = 0.8 \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{1/5} \quad (1.9)$$

Cette formule requiert 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 :

$$d = \left(\frac{60}{f} \right) \rho \quad [\text{mm}] \quad (1.10)$$

Avec :

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

ρ : La masse volumique du constituant exprimée en g/cm^3 .

Un ordre de grandeur peut être avancé de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme l'indique la figure (1.11).

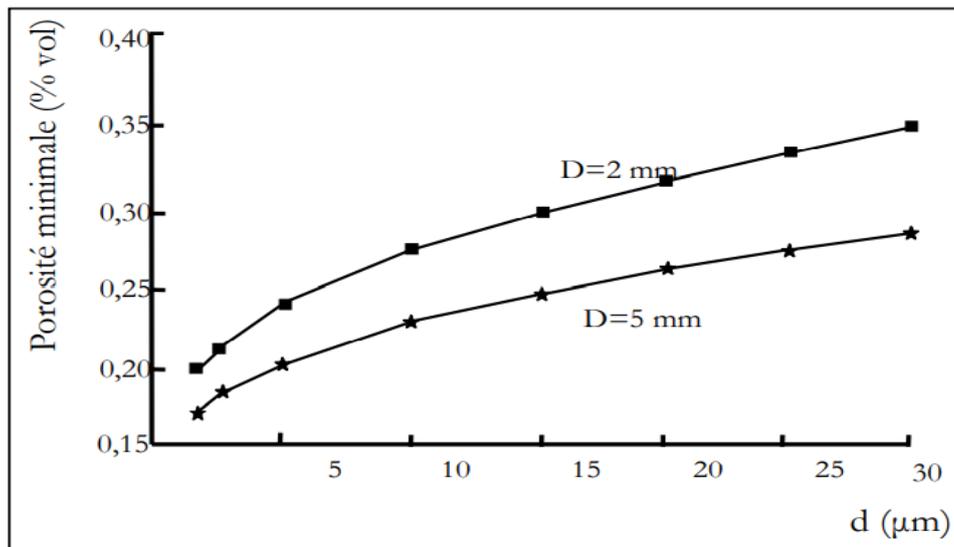


Figure.1. 11. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable. [Sablocrete 1994]

Pratiquement, la confection d'un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la figure 1.12 illustre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

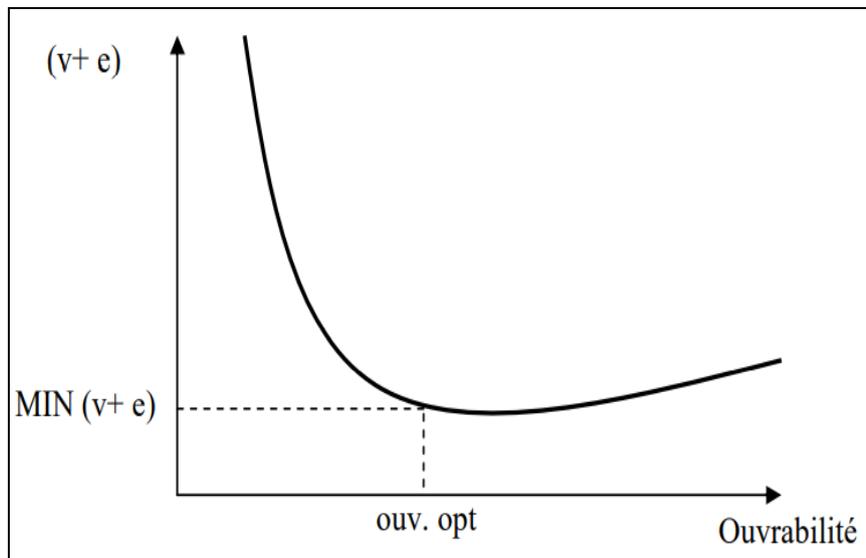


Figure.1.12. Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [Sablocrete 1994]

1.3.1.3. Dosage en sable

Le dosage en sable est déterminé 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). Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80µm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition [Sablocrete 1994].

1.3.1.4. Estimation de la résistance en compression

Après la détermination de la compacité et les différentes proportions des constituants, et dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [Dreux 1998] a été proposée :

$$R_b = \frac{k_f \cdot R_c}{\left(1 + \frac{3.1(1+v)}{c(1+k_1+k_2)}\right)^2} \quad (1.11)$$

Avec :

- K_f : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

- R_c : classe vraie du ciment (MPa) ;
- E : dosage en eau total (l/m^3) ;
- V : air piégé (l/m^3) ;
- C : dosage en ciment (kg/m^3) ;
- R_b : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Et :

- $K_1 = K_{cv} (CV/C) + K_{fs} (FS/C)$;
- $0.2 < K_{cv} < 0.4$; $2 < K_{fs} < 3.3$; $K_1 \leq 0.5$;
- $K_2 = K_{fil} (Fil/C)$;
- $0 < K_{fil} \leq 0.4$; $K_1 < 0.2$;
- K_1 : coefficient pouzzolanique ;
- K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire ;(Voir figure 1.13)
- K_{cv} , K_{fs} , K_{fil} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines ;
- CV , FS , FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

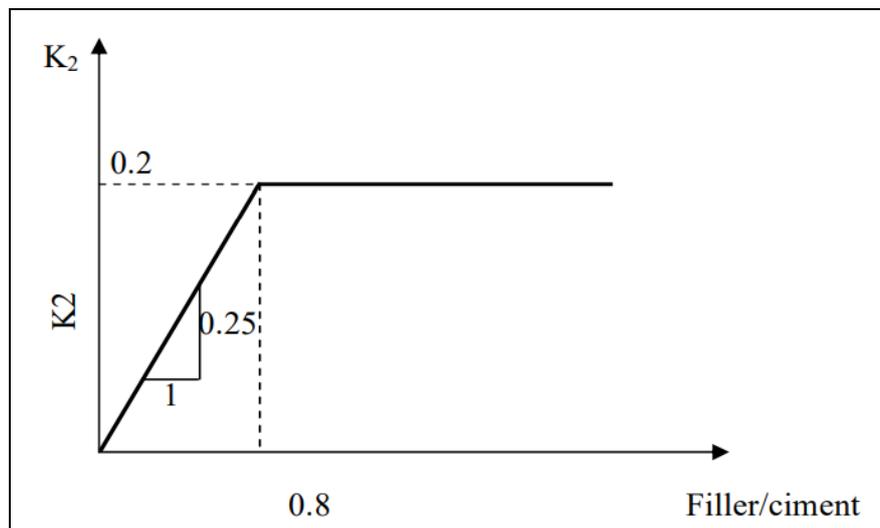


Figure.1.13. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [Dreux 1998]

1.3.2. Méthode expérimentale de formulation

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 [Sablocrete 1994].

1.4. Propriétés spécifiques des bétons de sable

1.4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques

L'analyse du comportement du béton de sable à l'état frais et l'observation de fragments durcis au microscope électronique à balayage permettent de décrire la microstructure du matériau comme homogène, d'aspect amorphe avec un bon enchevêtrement des inclusions de sable dans la matrice. Le caractère peu ou pas fissurant mis en évidence par le MEB s'explique par l'uniformité de séchage entre le cœur et la périphérie d'une éprouvette cylindrique. Cette uniformité de séchage entraîne de faibles gradients hydriques et donc de faibles contraintes de traction en surface d'où une faible densité de fissuration.

L'étude de porosimétrie à mercure montre une différence entre les porosimétries du béton de sable et celles du béton ordinaire. En effet, l'histogramme des pores du béton de sable présente un pic unique décalé vers les gros micropores (au voisinage de 250Å autour duquel se trouvent 80 à 90% des pores du complexe) alors que dans les bétons classiques, on trouve deux pics, l'un correspondant aux micropores (entre 50 et 100Å) et l'autre aux macropores (600 à 1300Å). La porosimétrie du béton de sable est donc de type monomodal alors qu'elle est bimodale dans les autres bétons [Benaïssa 1992].

1.4.2. Retrait et fluage

Les études [Domone 2006] montrent que le retrait dans un milieu ambiant des bétons de sable peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons. Ainsi que, la cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable, alors que le fluage de dessiccation du béton de sable a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importante même. En passant de 25 à 50MPa, le fluage du béton de sable était divisé par 5 et n'était supérieur à celui du béton ordinaire que de 20% [Sablocrete 1994].

1.4.3. Durabilité des bétons de sable

Différentes études [Kettab 2007] ont montré que la perméabilité à l'eau des bétons de sable est plus faible qu'un béton ordinaire ($2,5 \times 10^{-12}$ m/s contre 1×10^{-10} m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés, ainsi la profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores ($< 10 \mu\text{m}$) et de l'absorption initiale. Des résultats expérimentaux montrent une quasi proportionnalité entre profondeur carbonatée et absorption initiale. Ainsi que le comportement à la pénétration des ions chlorés est comparable à celui des bétons traditionnels.

1.4.4. Fissuration

La microstructure du béton de sable est une structure continue, la pâte de ciment est d'apparence amorphe et présente un aspect compact sans fissures notables. La porosité totale du béton de sable est de l'ordre de 11 à 13% ; elle est proche de celle d'un béton classique. La cinétique de séchage très rapide et uniforme explique l'absence de fissuration.

1.5. Propriétés essentielles du béton de sable

1.5.1. Maniabilité du béton frais

Les chercheurs [Ghrieb, Kettab 2003] ont trouvé que la granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange ; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore. Figure (1.14).

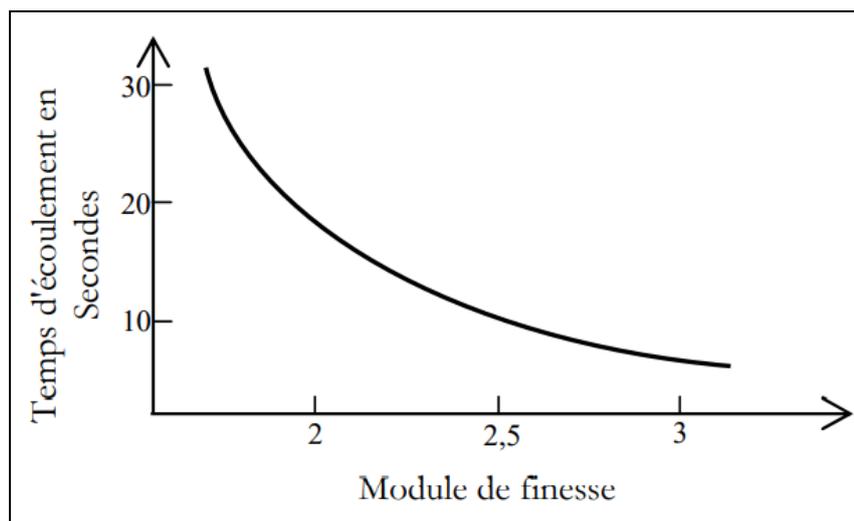


Figure. 1.14 Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [Ghrieb 2003]

La figure 1.15 montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport E/C augmente. Cependant pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend de qualité des fines d'ajout. La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.[Ghrieb 2003]

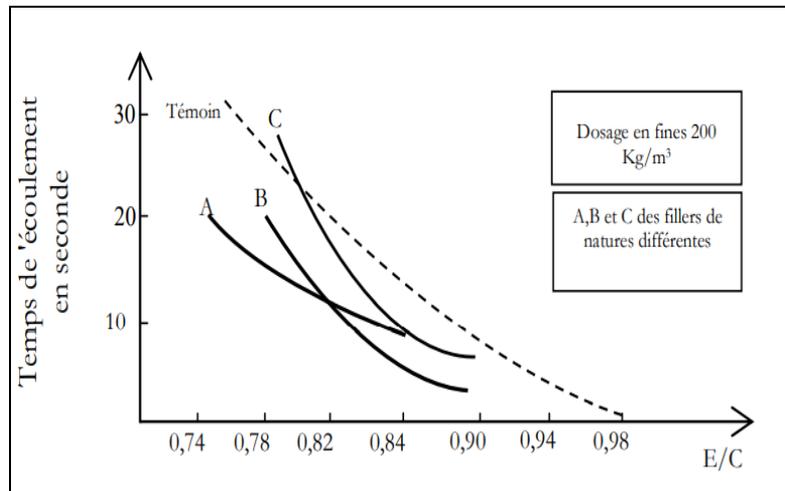


Figure.1.15.Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C) [Ghrieb 2003]

1.5.2. La résistance mécanique

C'est la propriété la plus importante pour l'usage de matériau. La résistance mécanique dépend d'un certain nombre de paramètres tels que : La finesse des fines d'addition, la nature de fines l'addition, la dimension du D_{max} .

1.5.2.1. La finesse des fines d'addition

Les études [Sablocrete 1994] ont montré que plus l'additif est fin plus la compacité est importante (et donc gain en résistance) ; ce résultat est valable quel que soit la granulométrie et la nature du sable (sable alluvionnaire, sable de dunes...etc.). Figure suivant (1.16).

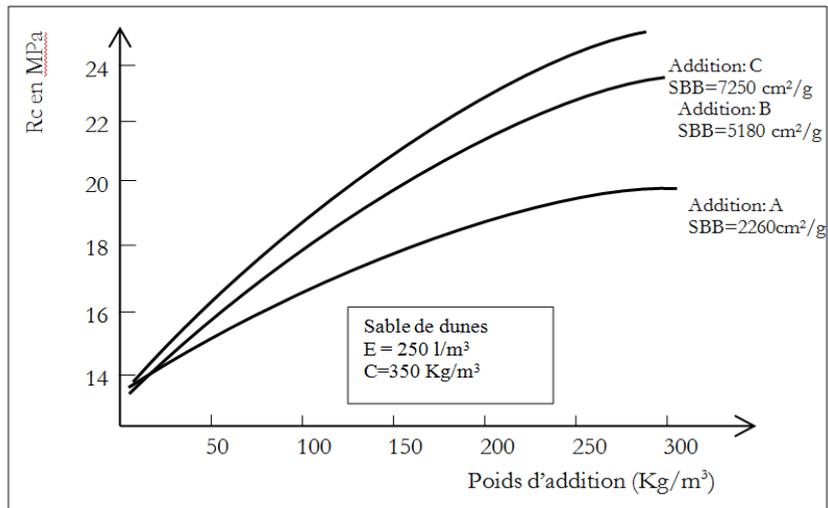


Figure.1.16. Effet du dosage et de la finesse de l’addition sur la résistance. [Sablocrete 1994]

1.5.2.2. La nature de fines d’addition

Les chercheurs ont montré que l’ajout de fines d’additions aux bétons de sable permet d’améliorer systématiquement la résistance, ce gain en résistance est très variable à même dosage en fines. La figure 1.17 permet de constater la diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler. [Mezidi ; Kettab 2008]

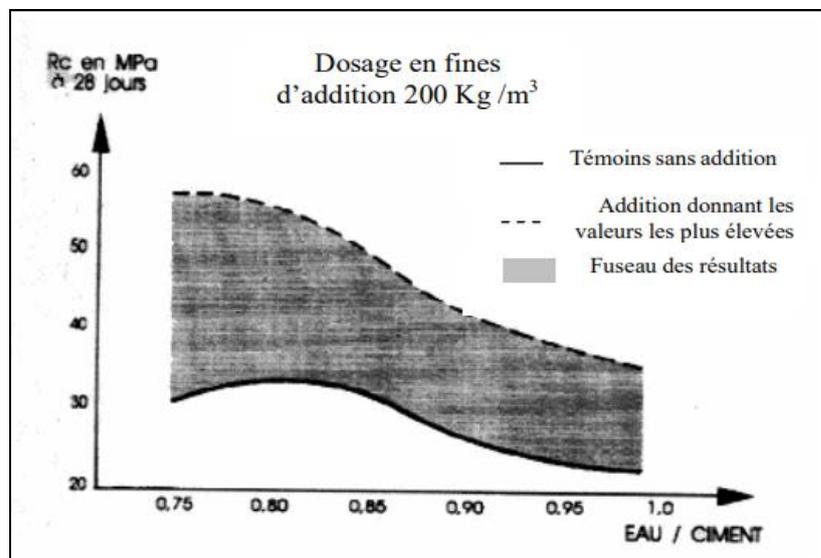


Figure.1.17. Influence de rapport (Eau /Ciment) et de la nature des fines sur le niveau de résistance.[Mezidi ; Kettab 2008]

1.5.2.3. La dimension du D_{max}

La figure 1.18 montre que pour une même valeur du rapport E/C, on constate que l'effet du diamètre du plus gros agrégat D_{max} est peu important, et pas défavorable aux sables pour la résistance à la compression. Concernant l'influence de D_{max} en fonction de dosage en ciment, on constate que la résistance de compression augmente en fonction de dosage de la plus grosse dimension.

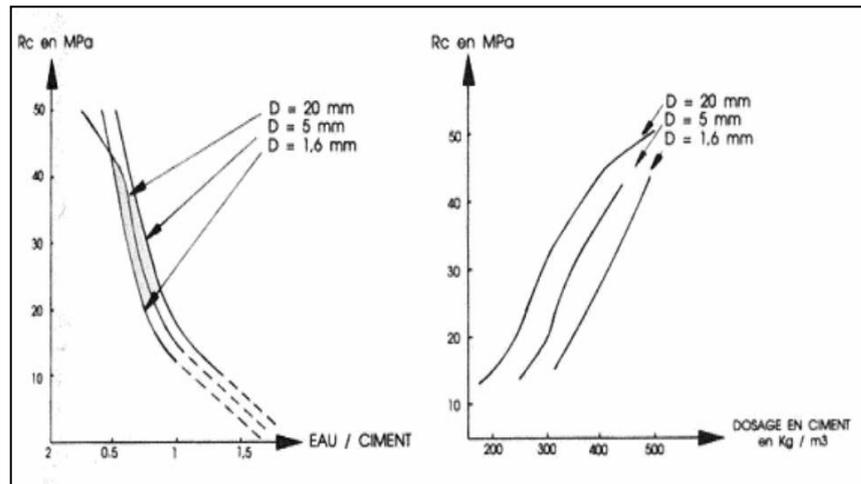


Figure .1.18 Effets de la granularité sur la résistance. [Sablocrete 1994]

Concernant la maniabilité, l'effet est très important. On trouve que pour un D_{max} égal à 20 mm le béton est très maniable ; alors que, ce n'est pas le cas pour un D_{max} égal à 1.6 mm. [Sablocrete 1994].

1.5.3. Résistance au gel et au dégel

Les études [Sablocrete 1994] ont montré que les bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalente aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition des micropores.

Partie 3 : Béton à base de granulats recyclés

1. Introduction

Le béton recyclé (BR) est un béton à base de granulats issus de la récupération des déchets. Jusqu'à présent les (GR) sont surtout utilisés dans le secteur du (BTP), en remblais dans les projets de drainage ou comme matériaux de base dans la construction routière, la réutilisation de (GR) pour produire de nouveaux béton n'a pas encore été largement adoptée, cela est lié aux caractéristiques présentées par le béton recyclé (GR).

1.1. Propriétés des bétons à base de granulats recyclés à l'état frais

En général, les bétons de granulats recyclés (GR) se distinguent les bétons de granulats naturels (GN) par plusieurs particularités de formulation dont, la masse volumique des granulats recyclés, est plus faible que celle des granulats naturels, du fait de leur teneur en mortier, leur rugosité de surface est importante, leur compacité est relativement faible ceci peut conduire à une demande en eau plus élevée.

1.1.1. Densité / Masse volumique

Des études [Kumar et al. 2017], ont montré qu'à l'état frais une réduction de 6 à 8 % de la densité des bétons à base des granulats recyclés par rapport aux bétons à base des granulats naturels est observée. Cette diminution est due principalement à la faible densité des GR par rapport aux GN. Duc-Tung2012, a trouvé que les bétons recyclés (B2) sont toujours plus légers que les bétons ordinaires (B1) et les bétons (B3) à base de granulats multi-recyclés qui sont encore plus légers que les bétons recyclés une fois (Figure 1.19).

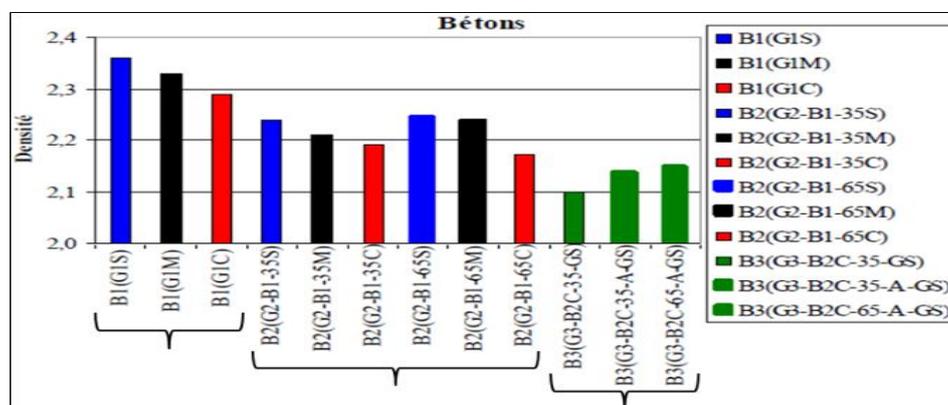


Figure 1.19. Densité des bétons frais. [Duc-Tung 2012]

Il est noté également, que plus les granulats sont lourds, plus la densité du béton est importante. D'autres recherches [Braymand 2010], ont abouti à des valeurs de masses volumiques comprises entre 2000 et 2200 kg/m³.

1.1.2. Ouvrabilité

Les recherches [Rao et al .2011], ont montrés que la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés conduit à une perte de maniabilité pour le même rapport E/C. Cette perte de maniabilité est expliquée par l'absorption élevée des granulats recyclés et leur angularité. Cependant, l'effet sur l'ouvrabilité est plus important pour les GR fins que pour les gros GR. D'autres études ont observé que pour un même rapport E/C l'utilisation des GR diminuent maniabilité du béton par rapport à un béton à base d'un GN.

Meftah et al.2013, ont confectionné des bétons avec des granulats naturels, des granulats recyclés secs, des granulats recyclés pré mouillés et des granulats recyclés à leur état saturé. Les graviers naturels ont été substitués progressivement par les graviers recyclés 0, 20, 40, 60, 80 et 100 % (figure 1.20).

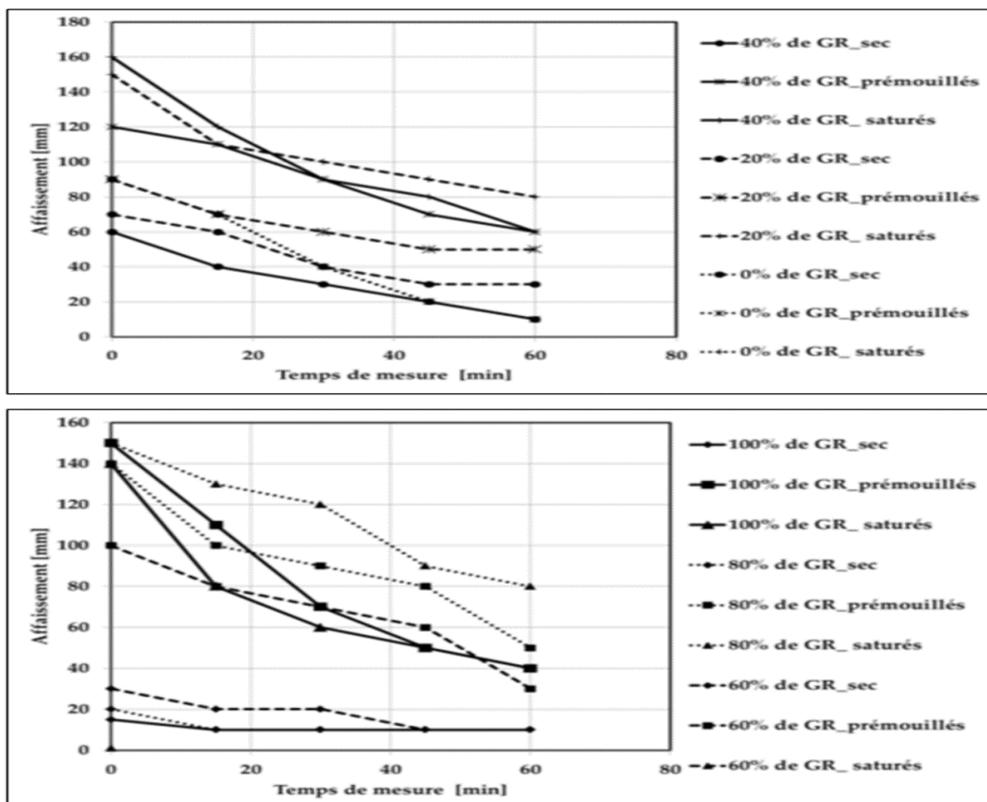


Figure. 1.20. Influence du taux de substitution des granulats recyclés à l'état sec, pré mouillés et saturés sur la maniabilité. [Meftah et al.2013]

1.1.3. Rhéologie

Une étude [Ait Mohamed 2017] portée sur les différents taux de GR et sans utilisation d'un superplastifiant, a montré que si les GR sont séchés avant le malaxage le seuil de cisaillement augmente de 30 % à 90 % dont le béton contient respectivement 20 % à 60 % de GR (figure 1.21). La viscosité atteint une augmentation de 50 % et 170 % pour les mêmes pourcentages utilisés. Au-delà de 60 % de GR, le béton devient plus ferme et les paramètres rhéologiques n'ont pas pu être mesurés par le rhéomètre. L'emploi des GR saturés affecte moins les paramètres rhéologiques, avec 60 % de GR pré-saturé, l'augmentation de la viscosité est diminuée de 170 % à 60 % et celle du seuil de cisaillement de 90 % à 35 % en les comparants à celles du béton contenant des granulats secs.

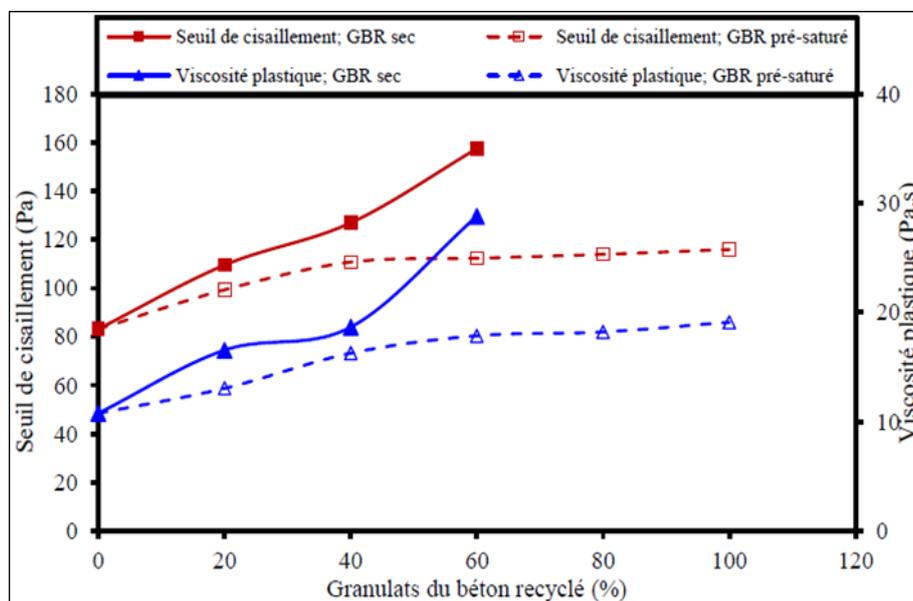


Figure. 1.21. Variation des paramètres rhéologique du béton sans superplastifiant en fonction du taux de GR (E/C=0.6). [Ait Mohamed 2017]

1.2. Propriétés des bétons à base de granulats recyclés à l'état durci

1.2.1. Résistance à la compression

Des recherches montrent que les bétons à base de granulats recyclés ont de résistances à la compression de 5 à 40 % plus faibles que celles des bétons formulés avec des granulats naturels de même origine [Boulay, 2014] ; Folino et al. 2014, ont enregistré une chute de la résistance à la compression à 28 jours de l'ordre 10 %, 17 % et 21 % lorsque le béton contient de 30 %, 60 % et 100 % de gros granulats recyclés. Une étude de remplacement des granulats

par des granulats recyclés de 0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 % pour deux types de béton (C25 avec un rapport E/C = 0.35 et C50 de rapport E/C = 0.55) a été testée par Zheng et al.2018. Les résultats trouvés montrent que la substitution des granulats recyclés dans le béton provoque une diminution de la résistance de l'ordre de 2 %, 4.4 %, 5.6 % et 7.2 % à 28 jours et 3.7 %, 6.8 % 9.6 % et 11 % à 56 jours lorsque les granulats naturels sont remplacés par les granulats recyclés de 25 %, 50 %, 75 % et 100 %, respectivement. Le taux de réduction est légèrement plus élevé dans la résistance à 56 jours que celle à 28 jours. (Figure 1.22)

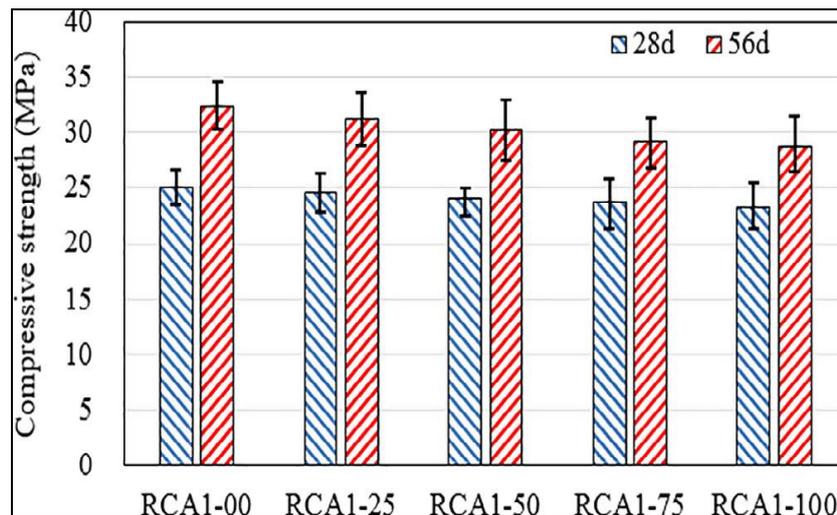


Figure.1.22.Résistance à la compression des éprouvettes contenant des granulats grossiers recyclés à 28 et 56 jours (E/C = 0.55) [Zheng et al.2018].

Cependant, pour un rapport E/C = 0.35, la résistance à la compression est réduite de 2.6 %, 5.9 %, 8.0 % et 9.6 % sur 28 jours et de 3.0 %, 9.4 %, 10 % et 12 % sur 56 jours lorsque les granulats naturels ont été remplacés par les granulats recyclés de 25 %, 50 %, 75 % et 100 %, respectivement. (Figure 1.23)

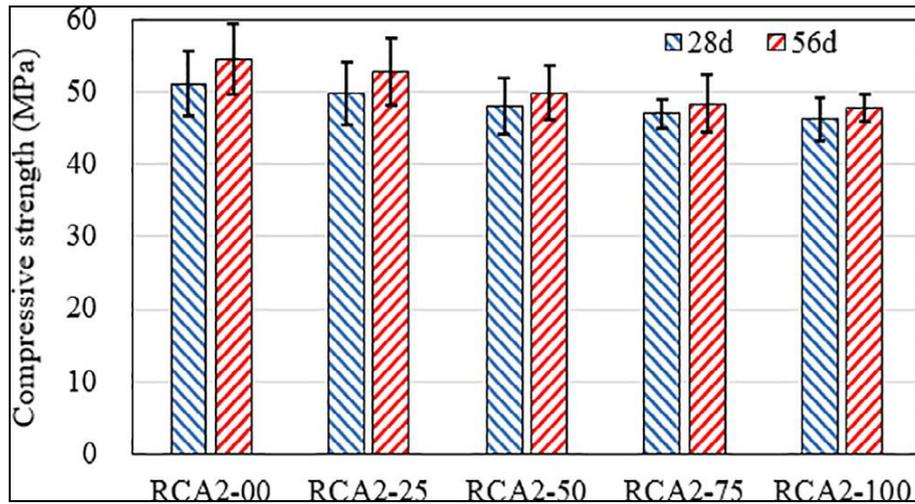


Figure. 1.23. Résistance à la compression des éprouvettes contenant des granulats grossiers recyclés à 28 et 56 jours (E/C = 0.35). [Zheng et al.2018]

Debieb et al.2008, ont traité la possibilité d'utiliser de la brique concassée en tant que granulats grossier et fin pour un nouveau béton, la figures 1.24, montre l'évolution de la résistance à la compression du béton avec des taux de substitution de granulats concassés gros de brique.

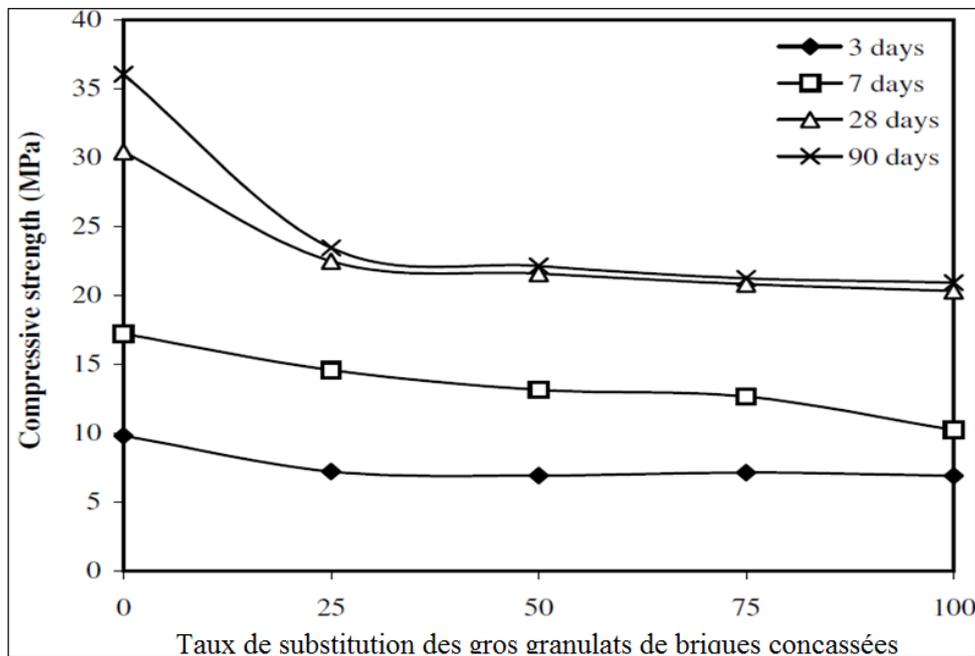


Figure.1.24.Evolution de la résistance à la compression du béton avec le taux de substitution des gros granulats de briques concassées. [Debieb et al.2008]

Et la figures 1.25 montrent l'évolution de la résistance à la compression du béton avec des taux de substitution de granulats concassés fins de brique.

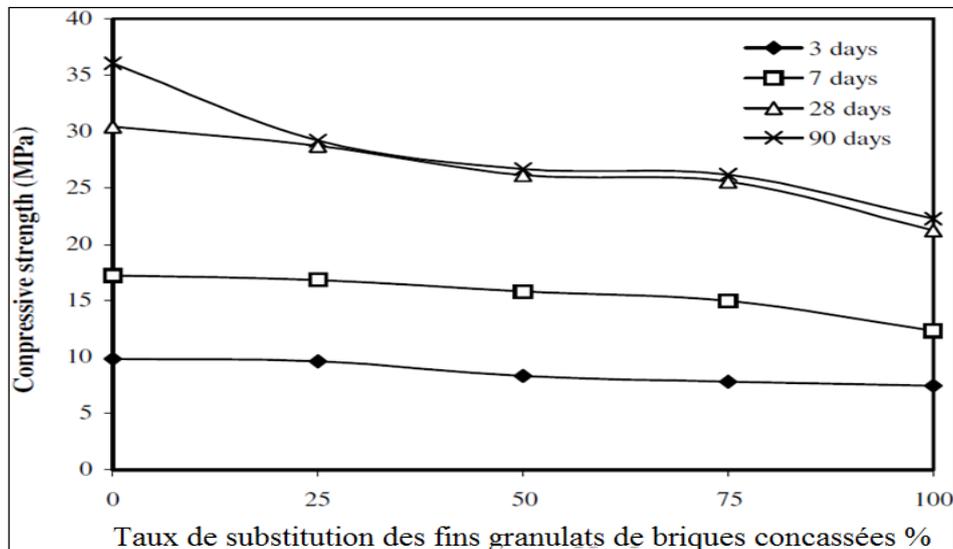


Figure.1.25. Evolution de la résistance à la compression du béton avec le taux de substitution des fins granulats de briques concassées [Debieb et al.2008].

1.2.2. Résistance à la traction

Plusieurs études ont montré que la résistance à la traction du béton diminue également en augmentant le taux de substitution de granulats recyclés.

Zaharieva et al. 2004, ont constaté une diminution de la résistance à la traction du béton à base des granulats recyclés de l'ordre 20 à 40 % par rapport au béton à base des granulats naturels. D'autres chercheurs [Kumar 2017] ont examiné l'influence du remplacement des granulats recyclés avec des tailles différentes sur la résistance à la traction. Les résultats montrent que le remplacement de la taille de 4.75 à 10 mm, a provoqué une incidence plus défavorable sur l'évolution de la résistance à la traction (réduction jusqu'à 20 %) par rapport à la taille la plus grande des granulats grossiers (10-20 mm) qui présente une réduction de 8 %.

En plus, Kenai et al.2002, ont trouvé une réduction de la résistance à la traction de 20 % à 28 jours et jusqu'à 70 % à l'âge de 90 jours. La chute de résistance à la traction liée également à la résistance à la compression de la qualité du béton d'origine, mais la diminution est plus signalée pour les bétons faibles que pour les bétons plus résistants et plus prononcée pour les niveaux de substitution plus élevés [Zaharieva et al. 2004].

Cependant, des recherches [Kenai et al.2002], ont constaté que la résistance à la traction peut être moins affectée que la résistance à la compression. Ceci est dû à la surface plus rugueuse des granulats recyclés et leur angularité affecte positivement la liaison entre les granulats et le mortier et donc améliore la résistance à la traction.

1.2.3. Module d'élasticité

En général, les bétons à base de granulats recyclés ont un module d'élasticité plus faible par rapport aux bétons à base de granulats naturels. Les études [Choi et al.2012], ont estimé une diminution du module d'élasticité des bétons à base de gros et fins granulats recyclés est d'environ 25 à 40 % par rapport aux bétons à base des granulats naturels, et est d'environ 10 % à 33 % lorsque la substitution des granulats est uniquement par les gros granulats recyclés.

D'autres recherches sur des bétons de rapport E/C de 0.4, 0.5 et 0.6 effectuées par Ait Mohamed Amer.2017, ont montré que le module d'élasticité des mélanges ayant un rapport E/C de 0.60 reste presque constant jusqu'à un taux de remplacement de 40 % ; au-delà de ce taux une nette diminution est remarquée.

Pour des rapports E/C de 0.5 et 0.4, le module d'élasticité diminue linéairement quand le taux de remplacement augmente. Figure (1.26)

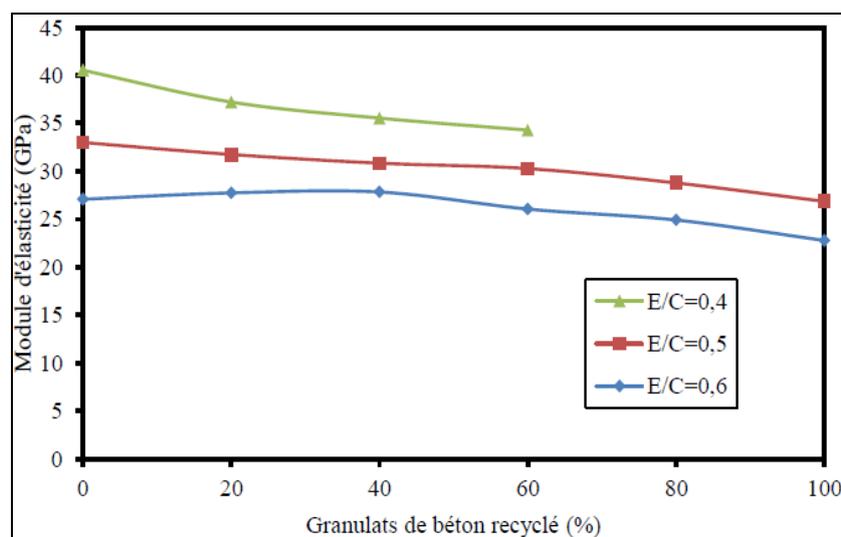


Figure.1.26. Variation du module d'élasticité en fonction du taux de remplacement des GBR secs. [Ait Mohamed Amer.2017]

Les résultats de De Larrard et al.2018, montrent une chute du module d'élasticité des bétons préparé à 100 % des granulats recyclés avec l'augmentation du cycle de recyclage, ceci est dû à l'augmentation du volume total de la pâte de ciment (pâte résiduelle adhérente aux GR et nouvelle pâte) avec les cycles de recyclages et donc une augmentation considérable de la porosité qui influence négativement sur le module d'élasticité. Cependant, les bétons recyclés à 30 % des gros granulats présentent une stabilité du module d'élasticité. (Figure 1.27)

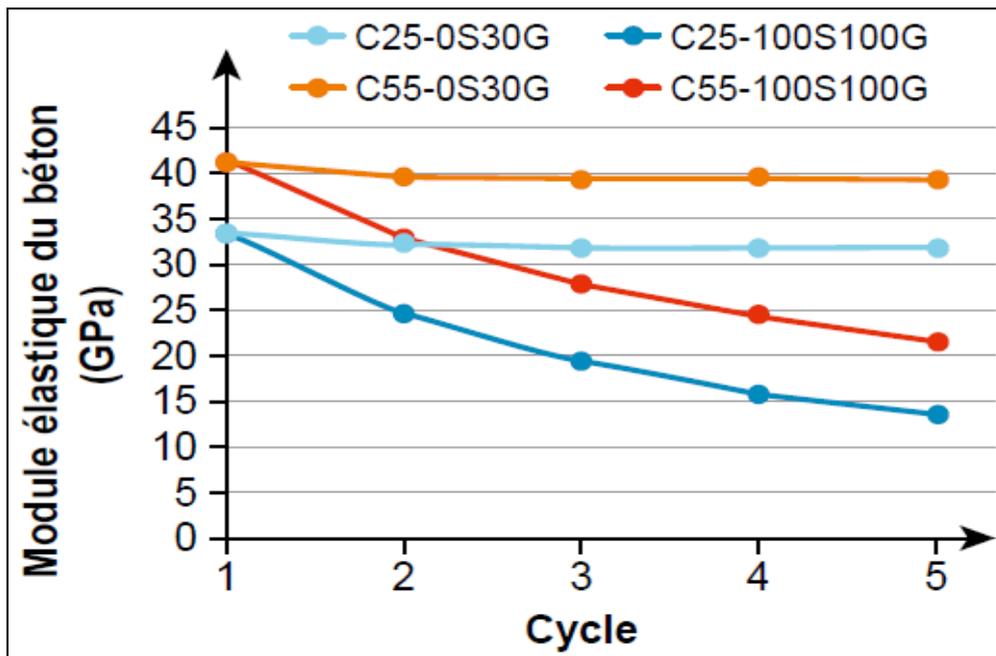


Figure.1.27. Module d'élasticité des bétons multi-recyclés [De Larrard et al.2018].

1.2.4. Déformation

1.2.4.1. Retrait

a)- Retrait thermique

Les études [Acker et al.2008],montrent que pour des structures massives ou des structures subissant un traitement thermique ou un refroidissement rapide dont la chaleur d'hydratation est importante, le retrait thermique est considéré comme un développement du gradient de température ($\Delta T/\Delta x$) entre l'intérieur de la structure plus chaude et la peau extérieure du béton plus froide qui génère des contraintes de traction pouvant induire des fissurations structurelles.

b)- Retrait de dessiccation

Ce type de retrait dépend directement du séchage progressif de la pâte de ciment où l'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (l'eau libre) s'évapore vers le milieu ambiant, il survient lorsqu'on diminue le taux d'humidité interne du béton. C'est la forme la plus courante et la plus visible du retrait. Il augmente avec l'augmentation de la teneur des granulats recyclés ; cette augmentation est due principalement à la forte porosité des granulats recyclés. Le retrait reste également comparable de celui du béton témoin pour des faibles pourcentages de substitution (< 20 %), (Figure 1.28).

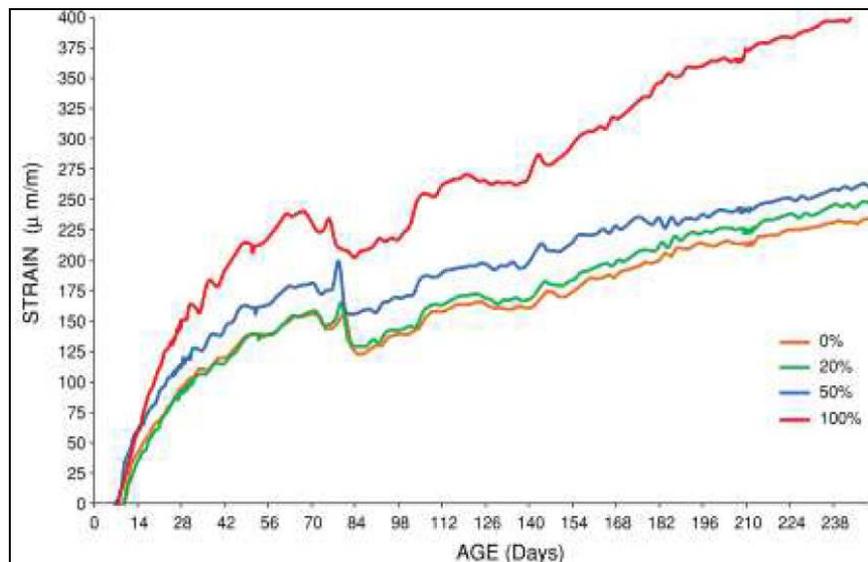


Figure 1.28. Retrait de dessiccation de bétons recyclés (0 / 20 / 50 / 100 % de gravillons recyclés) en fonction du temps. [Domingo et al. 2010]

D'autres recherches [Silva et al. 2015] ont montré que le retrait des bétons est lié également à la nature des granulats recyclés utilisés et leur rigidité. En outre, la diminution du rapport E/C, peut réduire la valeur du retrait du béton recyclé [Domingo et al. 2010]. Une étude récente [Ait Mohamed Amer. 2017] a montré que pour un E/C de 0.6, le retrait du béton à base de gros granulats recyclés est augmenté de 22 % que celui du béton témoin à 28 jours; au-delà, cette évolution reste fixe jusqu'à 140 jours. Ainsi une relation de proportionnalité entre le retrait de séchage et la teneur des granulats naturels remplacée par des granulats recyclés a été remarquée ; pour un taux de remplacement supérieur à 40 % le retrait augmente de manière significative. (Figure 1.29).

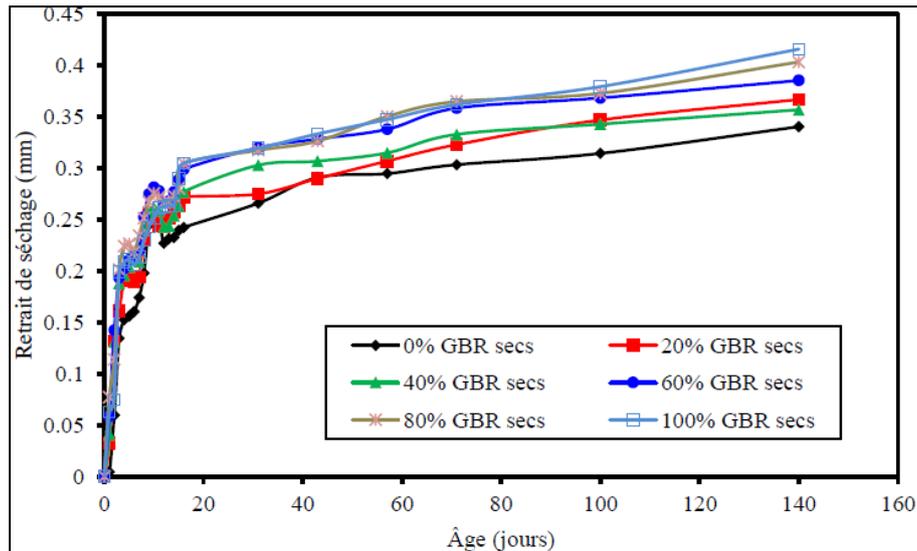


Figure 1.29. Evolution du retrait du séchage avec le temps. (E/C = 0.6) [Ait Mohamed 2017]

c)- Retrait endogène

La réaction de l'hydratation du ciment se poursuit après la prise et s'accompagne d'un abaissement de volume. Le retrait endogène ou d'auto dessiccation, est le résultat macroscopique de cette contraction d'origine chimique. L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène est liée à la quantité d'eau emmagasinée dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Les études [Lye et al.2016], ont enregistré une déformation de 0.050 mm/m pour un taux de remplacement des granulats recyclés supérieur à 60 % ; cependant une moyenne de 0.007 mm/m est signalée pour un taux de remplacement de 30 %. Cette évolution est due à la forte porosité et à la perméabilité des granulats recyclés issus du mortier lié aux granulats recyclés.

1.2.4.2. Fluage

Domingo et al.2010, ont remarqué que l'augmentation des granulats recyclés provoque une augmentation du fluage dans le béton. Ils ont montré que le fluage du béton recyclé avec un pourcentage de substitution de 20 % s'est avéré 35 % supérieur à celui du béton témoin. Pour une gamme de remplacement de 50 %, la valeur du fluage était supérieure de 42 %, également pour une substitution de 100 % des granulats recyclés l'augmentation du fluage était supérieure de 51 %.



Figure 1.30. Déformation totale due à l'effet de fluage [Domingo et al. 2010].

D'autres recherches dans ce sens [Lye et al.2016], ont constaté que l'augmentation de la teneur des granulats recyclés dans le béton induit des augmentations des valeurs de fluage pour les différentes classes de résistance et que cette valeur de fluage est inversement proportionnelle à la résistance.

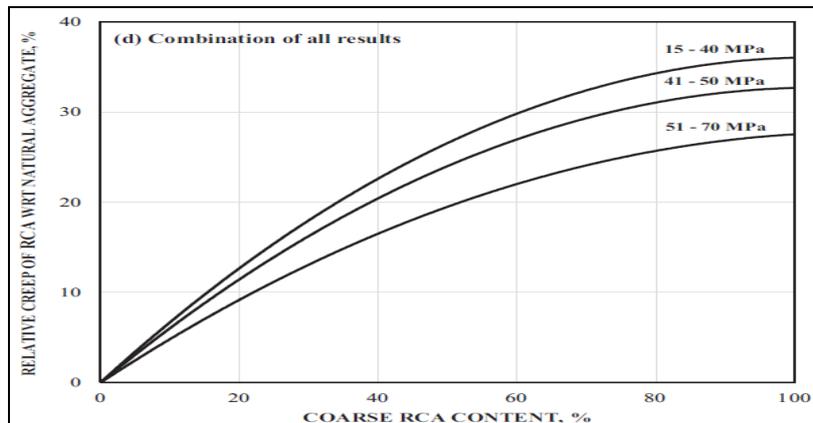


Figure 1.31. Fluage relatif des bétons recyclés de différente résistance [Lye et al.2016].

1.3 Conclusion

Le béton est un matériau hétérogène constitué d'une matrice cimentaire, fabriquée à partir d'eau et de ciment, et de granulats. Cette synthèse bibliographique a permis d'une part de situer l'état actuel de la recherche dans le domaine des bétons et la mise en évidence ensuite du recours aux produits issus de la récupération des déchets ; d'autre part situer notre travail de recherche. Au terme de cette étude bibliographique susceptible d'être enrichie, nous confirmons l'originalité de notre travail.

CHAPITRE II :
VALORISATION DE
DÉCHETS DE CAOUTCHOUC

CHAPITRE II

VALORISATION DE DECHETS DE CAOUTCHOUC

2.1. Introduction

De nos jours, avec la croissance rapide de l'industrie automobile, le problème des pneus usagés des automobiles a attiré une attention croissante. Des enquêtes ont montré que les pneus en caoutchouc contiennent des matériaux qui ne se décomposent pas dans conditions environnementales et causent de graves problèmes qui tenu. L'une des options de décomposition est le brûlage, mais cela entraînerait également des pollutions nocives. Compte tenu de ces problèmes, les pneus pourraient être utilisés comme granulats dans le béton. Ce chapitre présente un état de l'art sur les caoutchoucs et le recyclage de caoutchouc dans les matériaux cimentaires.

2.2. Le caoutchouc

Le caoutchouc peut être fabriqué à partir d'un produit naturel ou synthétique. Le caoutchouc naturel est fourni par de nombreuses plantes dont on peut récolter un liquide blanc appelé latex. Par contre, le caoutchouc synthétique est un élastomère préparé à partir du pétrole. Ce matériau possède des propriétés intéressantes telles l'élasticité, l'imperméabilité et sa résistance électrique. Il peut être classé en deux catégories : le caoutchouc synthétique et le caoutchouc naturel (NR).

2.2.1. Caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel (NR) est obtenu de la matière première des hévéas et généralement réticulé par soufre ou des peroxydes pour devenir un élastomère. En effet, l'addition de soufre à la gomme de caoutchouc réduisait ou même éliminait la nature collante des produits finis. En plus, la cuisson du caoutchouc en présence du soufre élimine les propriétés indésirables de la gomme ce qui permet de découvrir le caoutchouc vulcanisé. Ce matériau est caractérisé par une solidité et par une élasticité accrue, ainsi qu'une plus grande résistance aux changements de température. De plus, il n'est pas perméable aux gaz et résiste à l'abrasion, aux réactions chimiques, à la chaleur et à l'électricité. En ce qui concerne la résistance, ce matériau présente une résistance exceptionnelle à la traction [Dominiket al. 2002].

La résistance à la traction est de 27,6MPa et l'allongement à la rupture est de 750%. Selon [Nie et al. 2017, Priyadarshan et al. 2012], ce matériau possède une résistance à la propagation des fissures et une faible accumulation de chaleur et sa capacité de la disperser.

Actuellement, le Caoutchouc naturel (NR) de l'hévéa (Hévéabasiens) est le seul NR disponible dans le commerce, avec 14 millions de tonnes produites en 2018, et la demande a augmenté de 5,2 % par rapport à 2017 [Xianjie et al, 2020]. Bien qu'il soit produit à partir d'une source renouvelable, il est peu probable que la demande accrue soit satisfaite par l'hévéa seul. La culture de l'hévéa est limitée aux zones tropicales, et la plupart des plantations d'hévéas se trouvent en Asie du Sud-Est [Priyadarshan et al. 2020 ; Salvucci et al, 2006]. L'offre de NR en 2018 a été inférieure à la demande de 57 000 tonnes métriques, et une perte de production de 800 000 tonnes a été annoncée en décembre 2019 en raison de la maladie du Pestalotiopsis (genre de champignons) [Xianjie et al, 2020].

2.2.2. Caoutchouc synthétique

Le caoutchouc synthétique est semblable au caoutchouc naturel par ses propriétés chimiques et physiques essentielles. Aujourd'hui le terme utilisé pour désigner les caoutchoucs est les « élastomères » c'est-à-dire les substances macromoléculaires, naturelles ou synthétiques, possédant l'élasticité caoutchouteuse. Les élastomères font partie de la famille des polymères. Après la fabrication du caoutchouc synthétique, il est traité par vulcanisation. Ce produit artificiel est fabriqué à partir de réserves d'hydrocarbures fossiles [Xianjie et al. 2020].

Le manque aigu de caoutchouc naturel a accéléré la progression technologique du caoutchouc synthétique. En effet, les pays industrialisés ont connu des transformations politiques et économiques avec l'ampleur exceptionnelle du caoutchouc synthétique. Aux États-Unis, par exemple, le caoutchouc syntactique est utilisé dans des différentes applications [Soratana et al. 2017], en raison de sa bonne résistance à l'abrasion [Zubov et al. 2012], de sa résistance à l'huile et aux solvants [Xianjie et al. 2020].

2.3. Production mondiale de caoutchouc

La production mondiale de caoutchouc augmente chaque année et le taux de production de caoutchouc est différent d'un pays à l'autre. Plus de 20 milliards de pneus de voitures sont usés chaque année [Gupta et al. 2019], Les États-Unis par exemple, produisent 3,6 millions de tonnes de caoutchouc par an [Reza et al 2011]. La Malaisie produit 200 000 tonnes de

caoutchouc par an [Al bakri et al. 2007]; de même, l'Iran produit 100 000 tonnes de caoutchouc par an [Abdollah zadeh et al.2011].Ces chiffres augmentent avec l'accroissement de la production de véhicules.

2.4. Les propriétés de caoutchouc

Le caoutchouc brut (latex coagulé) est le matériau clé de la formule du caoutchouc. C'est un polymère naturel dont la formule est (C_5H_8) . Du point de vue physique, le caoutchouc naturel est blanc ou incolore. Lorsqu'il ne contient pas un agent vulcanisation, le caoutchouc se casse en hiver et colle en été. Cependant, il est plus résistant, élastique et possédant des propriétés physiques plus élevées avec un agent de soufre. En effet, des réticulations entre les macromolécules de caoutchouc sont formées en forme de réseau.

Le caoutchouc naturel ou synthétique peut être utilisé essentiellement pour de nombreux produits tels que les pneus [Dominiket al, 2002]. En effet, c'est le principal matériau utilisé depuis des années dans les industries d'automobile. Ils sont constitués principalement de caoutchouc qui représente 48% de son poids (naturel et artificiel) et de câbles textiles qui est de 5% de leur poids et des armatures métalliques qui constituent 15%. Chaque pneu se compose de latex, matière de base du caoutchouc naturel ou synthétique [Meddah, A 2015].Ces déchets possèdent des propriétés de dureté et d'élasticité supérieures à celles du caoutchouc, une bonne résistance aux intempéries et une faible densité [Yang, H.S et al. 2004].

2.5. Déchet de caoutchouc

Ce qui concerne le déchet de caoutchouc, l'industrie du caoutchouc et du pneu dégagent des déchets très difficiles à gérer.

Ces déchets sont appelés déchets spéciaux suivant le décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006. Selon Guneyisi et al, les déchets de caoutchouc ne sont pas facilement biodégradables, même passé après un long traitement en décharge. En construction, l'utilisation de ces déchets dans le mélange de béton peut aider les êtres humains à préserver l'environnement [Mostafa A et al. 2021].En Algérie, une loi a été mise en place afin de fixer les modalités de gestion, de contrôle et à l'élimination des déchets [Journal officiel de la république Algérienne.2001].

Le volume de déchets du caoutchouc issus des pneus usagés est toujours en croissance ce qui pose de sérieux problèmes écologiques à l'environnement. En Algérie, les déchets du caoutchouc sont estimés à 46000 tonnes par année d'après l'Agence Nationale de Promotion

du Commerce Extérieur (A.N.P.C.E) [Trouzine, et al. 2011]. A noter que le recyclage de ces résidus en Algérie est un concept nouveau, il doit encore faire l'objet d'étude dans lequel les professionnels doivent intervenir davantage.

Les quantités de déchets sont alarmantes et les préoccupations de ces déchets sont de plus en plus grandes dans des diverses industries, y compris le génie civil, le génie automobile, la fabrication d'équipements sportifs et d'autres produits recyclés ont cherché à réutiliser les pneus usagés comme matériaux recyclés pour faire face à ces chiffres inquiétants [Amiria et al. 2021]. L'existence d'un volume très élevé des pneus rend leur élimination impossible et peu rentable. Cela entraîne une accumulation non autorisée de ces pneus à l'air libre et des risques environnementaux qui peuvent conduire à des incendies généralisés et à l'accumulation d'organismes tels que les souris et les moustiques [Mohajerani et al. 2020 ; Yung et al. 2021]. De plus, le processus de recyclage et la réutilisation des pneus usagés comme nouveaux pneus sont coûteux, ce qui fait que les pneus en fin de vie sont utilisés dans d'autres industries, y compris celle du béton. Sachant environ 1,2 milliard de pneus inutilisables sont générés chaque année et seulement 40 % sont recyclés en produits à faible valeur ajoutée, 11 % sont destinés à la mise en décharge, 26 % sont broyés en asphalte et d'isolation, 7% sont mélangés à des couches d'autoroute, des murs de soutènement et d'autres usages de génie civil et les 7% restants sont recyclés dans des structures pour les aires de jeux et les balançoires à pneus. Le nombre de pneus usagés dans les décharges et au bord des routes est alarmant. Par conséquent, le recyclage et la valorisation énergétique de ces résidus ont été adoptés [Thai, et al.2019].

2.5.1. Les traitements des déchets de caoutchouc

Les traitements des déchets de caoutchouc sont des enjeux essentiels de la politique de l'environnement. En général, il existe deux procédés principaux pour traiter les déchets dans l'industrie, à savoir leur élimination dans l'environnement et leur recyclage. Toutefois, ce premier procédé pollue dangereusement l'environnement, ce qui augmente l'utilisation de matières premières pour la fabrication de nouveaux produits (figure 2.1) [Siddique et al. 2004]. En revanche, le second procédé est parfaitement compatible avec la notion de l'environnement [Tavakoli et al.2018, Ameli et al. 2020, Shukla et al. 2020].Toutefois, compte tenu de la difficulté de recyclages de tous les déchets occasionnés par l'industrie, certains pays développés ont réussi à placer certaines quantités dans des décharges après traitement ou incinérés dans des centrales thermiques ou cimentaires [Aliapure.2010].

Il faut cependant rester prudent car cela pourrait avoir une incidence sur l'économie et sur l'environnement par des émissions de gaz à effet de serre. Les lois environnementales et les politiques publiques ont contribué à ce processus en proposant des solutions pour la valorisation de ces déchets et une destination plus appropriée [Nycolle et al.2020].



Figure.2.1 Impact environnemental de la combustion des pneus usagés
Sur l'environnement [Mohajerani et al. 2020].

2.5.2. Granulats et poudrettes du caoutchouc

Les déchets de caoutchouc représentent un gisement valorisable important tant en volume qu'en poids. La réticulation thermiquement irréversible et la grande résistance mécanique et chimique rendent le recyclage de ces déchets difficile. Selon Hoyer et al. La dimension des particules de caoutchouc varie entre 1-10 mm et est inférieure à 1 mm pour la poudre (figure 2.2). Pour réduire la taille de particules inférieure à 1 mm, deux principes de base sont utilisés ; broyage cryogénique et broyage ambiant en fonction de la température de traitement [Hoyer et al.2020].



Figure.2.2. Produits dérivés de pneus [Mohajerani et al.2020].

Diverses approches de broyage ont été développées pour réduire la taille des particules du caoutchouc. Certains auteurs classent le processus de broyage du caoutchouc de pneus usagés selon les différences de conditions de broyage : broyage ambiant, broyage humide et broyage cryogénique [Liang et al. 2000, Myhre et al. 2000, Wang et al. 2017]. Cependant, le broyage cryogénique est avantageux pour obtenir une poudre ayant une taille plus petite [Weber et al. 2008]. Sachant que le broyage cryogénique consiste à congeler le caoutchouc afin qu'il soit dans un état de fragilité. Toutefois, ce processus de congélation consomme une grande quantité de réfrigérant, tel que l'azote liquide, et entraîne un coût élevé pour la production de poudre de caoutchouc. C'est pourquoi, certains auteurs ont cherché à traiter le caoutchouc avant broyage [Lee et al. 1977], ce qui devrait permettre de réduire la consommation de réfrigérants. Liu et al. [Liu. 2003] ont trempé le caoutchouc vulcanisé avec des solvants polaires, tels que le benzène, la cyclohexanone, le cyclohexane, le toluène, etc, de sorte que la taille des particules du produit broyé puisse atteindre un niveau très fin. La figure 2.3, décrit le processus de broyage cryogénique.

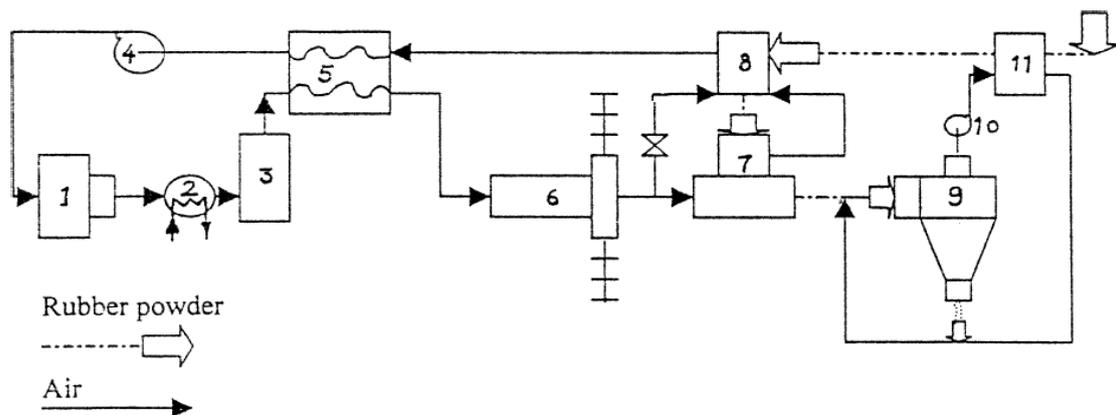


Figure 2.3. Processus de broyage cryogénique. 1, compresseur d'air ; 2, refroidisseur d'eau ; 3, sécheur ; 4, ventilateur(1); 5, échangeur de chaleur; 6, séparateur thermique; 7, moulin vortex; 8, chambre de refroidissement cryogénique; 9, cyclone; 10, ventilateur (2) ; 11, pré refroidisseur cryogénique [Liu. 2003].

D'autres auteurs ont cherché à réaliser le processus inverse de la vulcanisation du caoutchouc (dévulcanisation). Les travaux rapportés dans la littérature sont très nombreux sur la dévulcanisation sur les propriétés cryogéniques du caoutchouc. Rajan et al. 2005, et Li et al. 1968, proposent la dévulcanisation par les méthodes chimiques, physiques et biologiques. Récemment le dioxyde de carbone supercritique (ScCO_2) a été utilisé pour dévulcaniser les déchets de caoutchouc de pneu par le broyage cryogénique. D'après cette recherche, le ScCO_2 provoque quelques changements caractéristiques, telles que la densité de réticulation. En

effet, le ScCO_2 à la capacité de gonfler le caoutchouc vulcanisé et d'amener l'agent de dévulcanisation dans le réseau réticulé, ce qui permet de réaliser simultanément la dévulcanisation et la modification des propriétés mécaniques des couches externe et interne simultanément [Xiang Li et al. 2020].

2.6. Valorisation des déchets du caoutchouc

Les granulés de caoutchouc sont largement utilisés pour des applications secondaires de niveau de propriété modeste, comme les tapis d'aire de jeux ou les matériaux de remplissage pour le gazon artificiel. Toutefois, ce marché est déjà bien saturé et les bénéfices sont faibles. Cette situation s'accompagne d'un déclin général de l'utilisation comme combustible de substitution pour les cimenteries [Hoyer et al. 2020]. Par conséquent, les déchets de caoutchouc constituent un vrai potentiel de réutilisation pour les matériaux de construction. En effet, l'utilisation de ce matériau dans le béton est une alternative suggérée pour beaucoup d'auteurs. Dans ce cas, il est possible d'avoir des matériaux de faible densité qui sont inférieures à celles de la plupart des matériaux de construction. En outre, il est possible d'utiliser les pneus dans presque toutes les conditions environnementales et n'importe quel climat, en raison de leur capacité à supporter différentes températures et de leurs propriétés anti-caustiques et anti-pourriture [Yang et al. 2004]. Cependant, les pneus sont facilement modifiables, peu coûteux et peuvent avoir des objectifs plus nobles, comme l'isolation thermo-acoustique, qui sont recherchés dans la grande pollution sonore [Hong et al. 2004, Zhang et al. 2012, Soto et al. 2017, Abu-Jdayil et al. 2019].

Les pneus sont mis également en avant comme renfort dans la composition de nouveaux matériaux pour de nombreux secteurs industriels. [Mohajerani et al. 2020] ont axé leurs travaux sur des applications d'ingénierie géotechnique, telles que les travaux de terrassement et la construction d'infrastructures par le recyclage du caoutchouc de pneus usagés dans les matériaux de construction.

Fazli et Rodrigue. 2020, ont présenté une revue des caoutchoucs recyclés dans les élastomères thermoplastiques (TPE), ainsi que les différentes méthodes de comptabilisations utilisées pour améliorer l'adhésion entre les déchets de caoutchoucs et les résines thermoplastiques. Hejna et al. 2020, ont également décrit une étude sur les déchets de caoutchouc de pneu comme modificateur peu coûteux et écologique dans un polymère thermodurcissable, tel que le polyuréthane, l'époxy et d'autres résines. Selon Topçu. 1965, les bétons caoutchoutés, contrairement aux bétons normaux, ont des capacités d'énergie plastique plus élevées. Avec

l'ajout de caoutchouc, qui est un matériau élastique, le béton devient comparativement ductile et commence à montrer le comportement d'une structure élastique.

La poudre de caoutchouc dispose d'une large source et à faible coût de production, et peut atténuer le problème de la "pollution noire" causé par les pneus usagés [Xiao et al.2021]. La poudre de caoutchouc a été utilisée comme renforcement à la mousse du polyuréthane(PU) [Nycolle et al.2020]. Les auteurs sont motivés pour développer de nouveaux produits tels que les panneaux modulaires ou sandwichs pour l'habitat, systèmes de toiture et géo-composites [Bertolini et al. 2014]. En général, les mousses de PU sont commercialisées sous forme de pièces pré-moulées de différentes épaisseurs, dimensions et densités, mais cette application peut se faire par pulvérisation (sous forme de spray) et par injection [Garrido et al. 2015, Swinton et al. 2006, Somarathna et al.2018]. Des granulats de caoutchouc recyclé ont également été ajoutés aux mousses de PU pour fabriquer des absorbeurs, des amortisseurs, des bouées flottantes [Cachaço et al. 2013], des panneaux d'insonorisation [Zhang et al. 2012] et des plaques de caoutchouc à base de PU [Gao et al. 2019].

2.6.1. Traitement des particules du caoutchouc

L'ajout de particules de caoutchouc au béton présente de problèmes d'adhésion des particules de caoutchouc et du ciment. En effet, certains chercheurs ont proposé d'améliorer l'interface entre la pâte de ciment et le caoutchouc par le traitement préalable [Segre et al. 2000]. Parmi eux, Soto et al.2017, ont constaté que la surface des déchets de caoutchouc est hydrophobe en raison de ses caractéristiques hydrophobes des additifs, tels que le stéarate de zinc qui se diffuse facilement sur la surface du caoutchouc qui forme une faible couche. De leur côté, Nuzaimahet al.2020, ont traité le béton au H_2SO_4 . Les résultats de ces études ont indiqué une augmentation de l'angle de contact, car les attaques acides radicales provoquent le durcissement de la surface du caoutchouc, réduisant sa hydrophilie et mouillabilité qui provoque à la goutte d'eau moins d'étalement sur le caoutchouc. Colom et al.2006, ont observé un effet similaire en traitant le composite avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4). De plus, une amélioration du module d'élasticité du béton caoutchouté a été observée. Les résultats montrent une amélioration considérable de l'adhésion entre le caoutchouc traité et la matrice du ciment ; en effet, une surface rugueuse convient mieux à l'adhésion mécanique. Les surfaces de fracture indiquent qu'il existe une adhésion de l'interface des particules de caoutchouc à la matrice, principalement en raison d'une modification physique des particules.

Les résultats obtenus pour les propriétés mécaniques sont justifiés à la lumière de ces observations (figure 2.4).

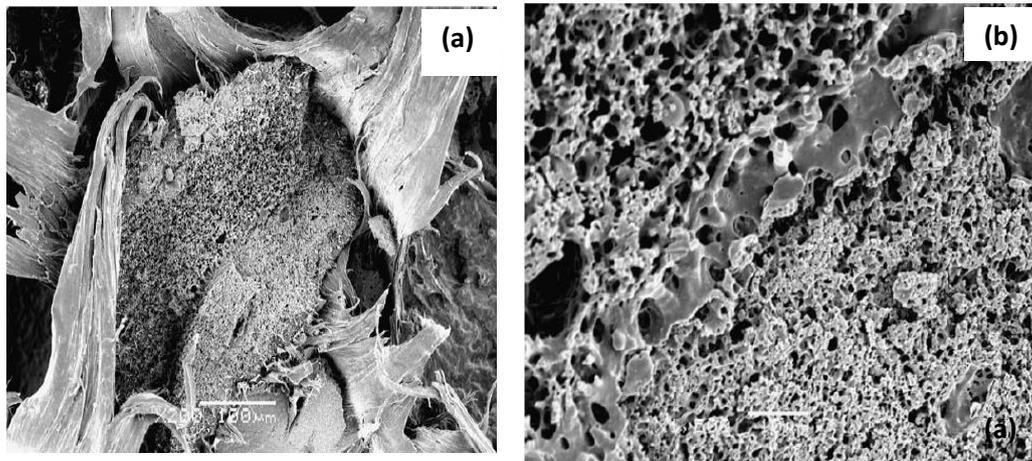


Figure.2.4 Composite prétraité : (a) Grossissement x 2000, (b) Grossissement x 2000 [Colom et al.2006].

Un autre traitement a été proposé par une solution d'hydroxyde de sodium NaOH pour augmenter une adhérence à la pâte de ciment et la surface du caoutchouc. Les premiers résultats ont montré que plus la concentration de NaOH était élevée, meilleure était l'adhésion [Smith et al. 2006, Bandyopadhyay et al. 1996]. Lee et al. 1998, ont étudié les propriétés de l'adhérence des adjuvants SBR (caoutchouc butadiène styrène) en utilisant des acides carboxyliques sur un béton contenant des particules de caoutchouc comme remplaçant des granulats fins. Les images microscopiques prises à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) ont semblé confirmer l'hypothèse selon laquelle il y a une meilleure liaison entre les caoutchoucs et la pâte de ciment portland.

2.6.2 Effet de déchets de caoutchouc sur les propriétés du béton à l'état frais

L'un des principaux problèmes liés à l'ajout de granulats de caoutchouc est la tendance accrue à la ségrégation et au ressuage. Cela a conduit à plusieurs adaptations inhabituelles de la procédure de mélange conventionnelle pour tenter d'éviter ce problème. Plusieurs chercheurs soutiennent que tous les composants du mélange doivent d'abord être mélangés sec pendant 1 à 5 minutes avant d'ajouter progressivement l'eau, ainsi que le superplastifiant et les adjuvants SBR (caoutchouc styrène-butadiène) [Al-Mashhadani. 2001]. Le mélange doit ensuite se poursuivre pendant 3 à 5 minutes ou jusqu'à ce que le mélange soit homogène [Al-Sakini.1998].

La maniabilité du béton de caoutchouc peut être similaire à celle d'un béton normal en utilisant des adjuvants sans augmentation de la quantité d'eau [Moustafa et al. 2015]. Dans le même contexte, Youssf et al.2014, ont indiqué que l'on peut contrôler la maniabilité du béton caoutchouté par l'utilisation d'une part de superplastifiant dans la fourchette recommandée par la norme ASTM 494 (1-3% du poids de ciment). Concernant le béton sans les adjuvants, la plupart des chercheurs ont constaté que l'introduction des particules de caoutchouc comme remplacement des granulats permet de réduire l'affaissement. De plus, Ils ont signalé que plus la particule est fine plus l'ouvrabilité est meilleure [Khatib et al.1999, Albano et al. 2005, Khaloo et al.2008].D'autre part, ajouté une quantité suffisante d'une combinaison de poudre et de granulats de caoutchouc au béton donne une bonne maniabilité [Elchalakani et al 2015]. Dans une autre étude, un béton est confectionné par la substitution partielle de granulats naturels par le caoutchouc et la fumée de silice. La figure 2.5 montre que les bétons avec de la fumée de silice avaient un affaissement plus faible que le béton ordinaire. Les résultats montrent qu'avec 51% de caoutchouc, l'affaissement est quasi nul avec un rapport E/C= 0.40 [Guneyisi et al.2005].

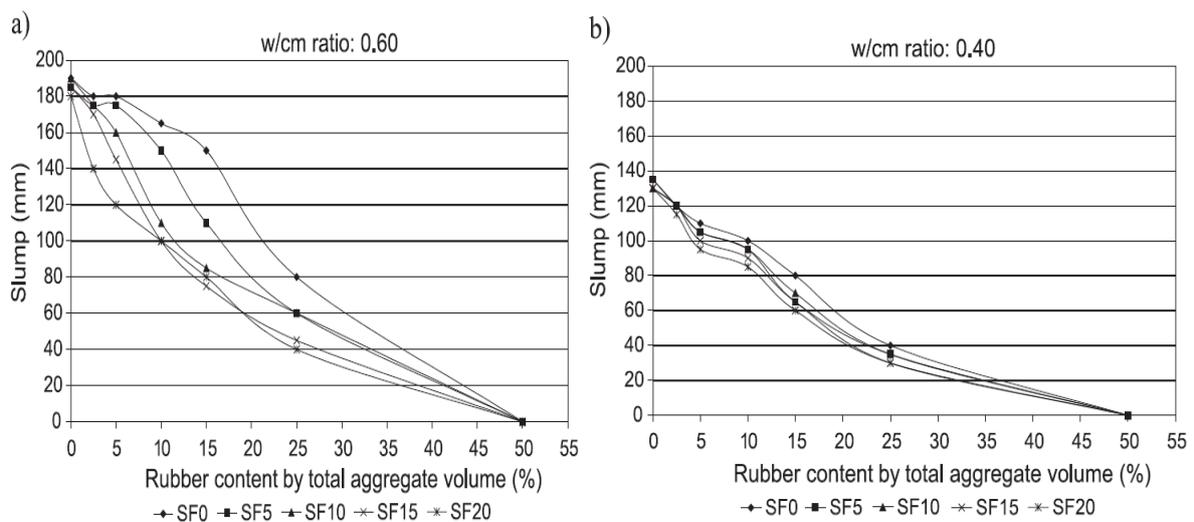


Figure 2.5. Variation de l'affaissement des bétons en fonction de la teneur en caoutchouc et en fumée de silice. (a) rapport E/C : 0,60 et (b) rapport E/C : 0,40 [Guneyisi et al.2005].

Aiello et al.2010, ont rapporté que les ajouts de particules de caoutchouc par substitution de gros granulats ou fins ont un comportement fluide. Cela signifie que le béton caoutchouté peut être mélangé, coulé et vibré à l'aide des équipements et procédures adoptés pour le béton conventionnel. De plus, ces résultats sont en accord avec les mesures d'ouvrabilité rapportées par Raghavan et al.1998, où le composite cimentaire contenant du caoutchouc de pneu recyclé

a atteint une maniabilité comparable ou supérieure à celle du mortier témoin. Pour Holmes et al.2014, la méthode de broyage des pneus a un effet sur l'affaissement.

Ces auteurs estiment que le broyage mécanique des caoutchoucs présente un béton dont un affaissement inférieur à celui conçu avec des caoutchoucs broyés cryogéniquement. Toujours d'après les auteurs, ceci est dû à la grande rugosité de la surface des particules obtenues mécaniquement.

2.6.3 Effet de déchets de caoutchouc sur les propriétés mécaniques

Comme rapporté dans la littérature, l'ensemble des essais mécaniques ont permis de mettre en évidence le comportement des béton contenant les particules de caoutchoucs. En effet, le remplacement des granulats naturels par les granulats de caoutchouc affecte la résistance à la compression. On constate que les propriétés physiques ainsi que mécaniques du caoutchouc diffèrent de celles des granulats naturels. Hossain et al.2019, ont réalisé de nombreux essais de compression, de résistance à la traction par fendage et de résistance à la flexion sur des bétons. Ces résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc, mais augmentent avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ils mettent ainsi en évidence le fait que la ténacité et la ductilité ont été plus importantes en utilisant la fibre que des granulats recyclés et de poudre de caoutchouc, chacun d'eux augmentant avec l'ajout progressif de fibres. Les résultats de différentes combinaisons de bétons à la compression sont présentés dans la figure 2.6.

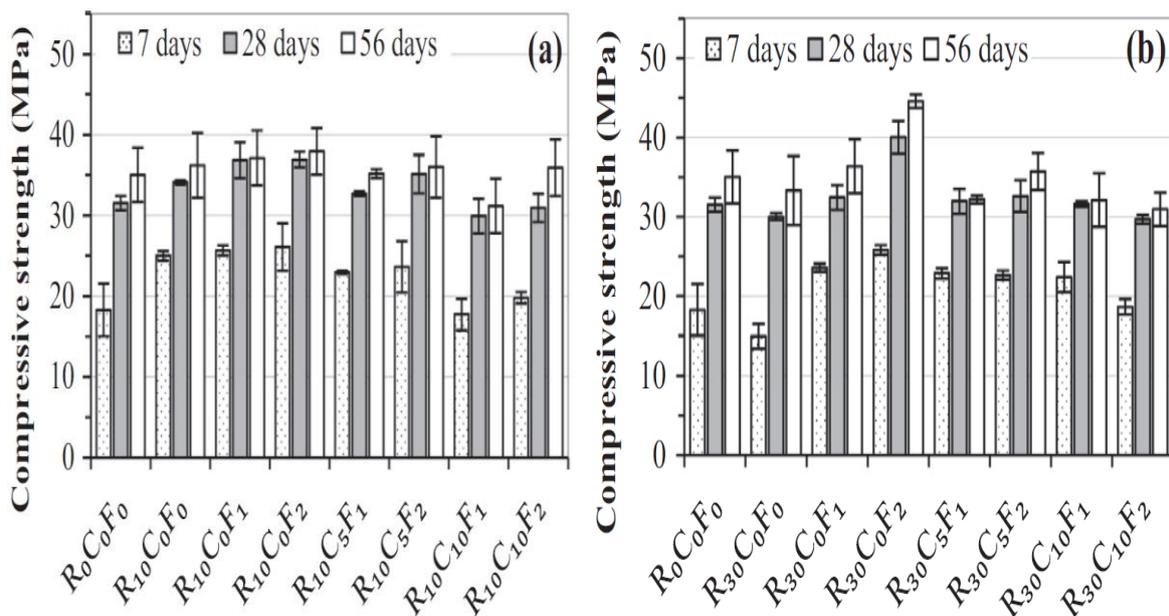


Figure.2.6. Variation de la résistance à la compression de différentes compositions de béton pour (a) 10%, et (b) 30% des granulats recyclés [Hossain et al. 2019].

Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente initialement à 10% de remplacement de granulats recyclés mais diminue pour 30%. L'incorporation de particules de caoutchouc dans les mélanges de béton entraîne la réduction de la résistance à la compression par rapport au béton de référence, alors que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. La formulation avec 30% de granulats recyclés et 2% de fibres sans les particules de caoutchouc présente la résistance à la compression la plus élevée, soit 26% par rapport au béton de référence (28 jours). A l'âge de 56 jours, la contrainte maximale la plus élevée a été trouvée pour 30% de granulats recyclés et 2% de fibres sans les particules de caoutchouc (44,56MPa).

Le coefficient de Poisson augmente avec l'augmentation du niveau de particules de caoutchouc, mais diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres.

Par contre, la résistance à la traction par fendage diminue avec l'augmentation des granulats recyclés et de particules de caoutchouc dans les mélanges de béton. Cependant, la résistance à la traction par fendage augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres dans les mélanges de béton.

La résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés et de particule de caoutchouc, mais augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres dans les mélanges de béton. La formulation donnant la valeur la plus élevée qui est de 8.6% par rapport au béton témoin [Hossain et al. 2019].

L'ajout de la poudre de caoutchouc à la mousse du polyuréthane(PU) provoque une diminution de la taille des pores, de la résistance à la compression, et la résistance à la flexion. L'absorption d'eau a également diminué en raison de l'insertion de la poudre de caoutchouc. Une bonne interaction chimique et physique a été confirmé et aussi une amélioration de la résistance thermique et de la résistance à l'abrasion (Tableau 2.1) [Nycolle et al. 2020].

Tableau 2.1. Propriétés mécaniques du PU pur et des composites [Nycolle et al. 2020].

Échantillons	Résistance à la compression (MPa)	Résistance au choc (J.m ⁻²)	Résistance à la flexion ((MPa)	Module d'Young (MPa)
PU	0.25860 ± 32.77	31.10 ± 0.22	1.96 ± 0.48	117.54 ± 32.97
PU/WTR5%	0.24873 ± 26.72	37.82 ± 0.31	1.87 ± 0.28	94.92 ± 18.26
PU/WTR10%	0.22792 ± 28.30	41.50 ± 0.35	1.48 ± 0.33	96.74 ± 11.68
PU/WTR20%	0.18137 ± 15.52	41.25 ± 0.41	0.91 ± 0.16	72.33 ± 14.20

D'après les travaux de recherche d'Eldin et Senouci [Eldin et al.1993], l'ajout de granulats de caoutchouc donne un béton de faible résistance que celle du béton de référence. En effet, ils ont constaté que la résistance du béton diminue de 85% et de 65% lorsque la totalité des granulats grossiers et fins ont été respectivement remplacés par le caoutchouc (figure 2.7). Par contre, selon les travaux de Khatib et al.1999, l'introduction plus de 61% de caoutchouc réduit la résistance à la compression de 90% (Figure 2.8).

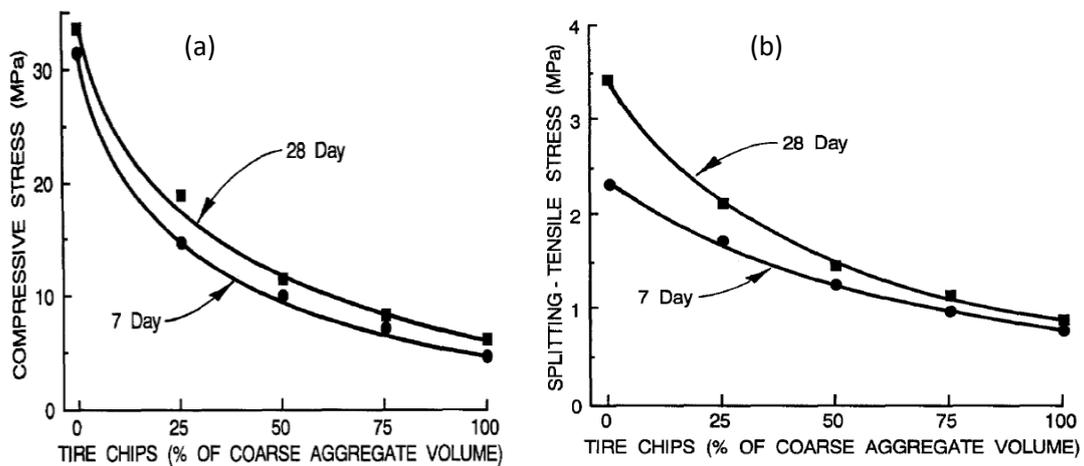


Figure 2.7 Résistance mécanique : (a) résistance à la compression, (b) résistance à la flexion [Eldin et al.1993].

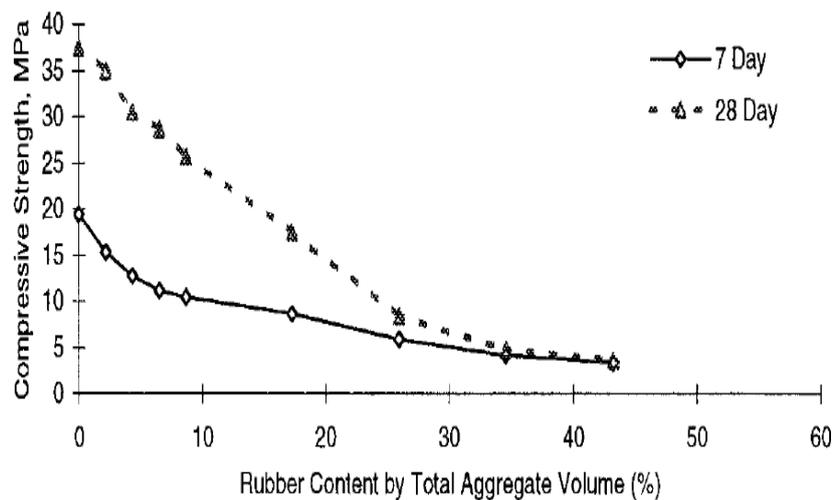


Figure 2. 8 Effet de la teneur en caoutchouc sur la résistance à la compression [Khatib et al.1999].

Pour éviter une forte chute de la résistance à la compression, Thomas et al.2015, ont suggéré que le taux de substitution ne doit pas dépasser les 20%. D'après les résultats obtenus, la réduction de la résistance à la compression peut être évitée si le remplacement du caoutchouc

ne dépasse pas 20% de la teneur totale en granulats. La poudre de caoutchouc réduit la résistance à la flexion. Néanmoins, l'absorption d'eau et la pénétration de l'eau augmentent avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc dans le béton toujours d'après les auteurs, l'utilisation d'un agent de couplage permet d'éviter une perte importante de la résistance à la compression. La plupart des chercheurs ont mentionné que la résistance à l'abrasion était améliorée avec l'ajout de caoutchouc dans le ciment. Seuls quelques chercheurs ont trouvé que le béton caoutchouté réduit l'abrasion du béton.

D'autres travaux publiés indiquent que les propriétés mécaniques du béton sont en fonction du taux et de la taille des particules du caoutchouc. Une diminution d'environ 50 % de la résistance à la compression et 64 % de diminution des résistances à la traction ont été observées dans les bétons mélangés avec de fines particules de caoutchouc (0/1 mm).

D'autre part, l'utilisation de particules de caoutchouc grossières a entraîné des diminutions allant jusqu'à 60% des résistances à la compression des cylindres, jusqu'à 80% des résistances des cubes et jusqu'à 74% des résistances à la traction. Ces résultats indiquent que les grosses particules de caoutchouc (1/4 mm) affectent les propriétés plus négativement que les poudres de caoutchouc [Topçu et al. 1995].

Certains auteurs ont avancé que les particules de caoutchouc, en raison de leur faible densité, ont tendance à se déplacer vers le haut ce qui donne un béton non homogène et par conséquent une diminution de la résistance à la compression [Ganjian et al. 2009].

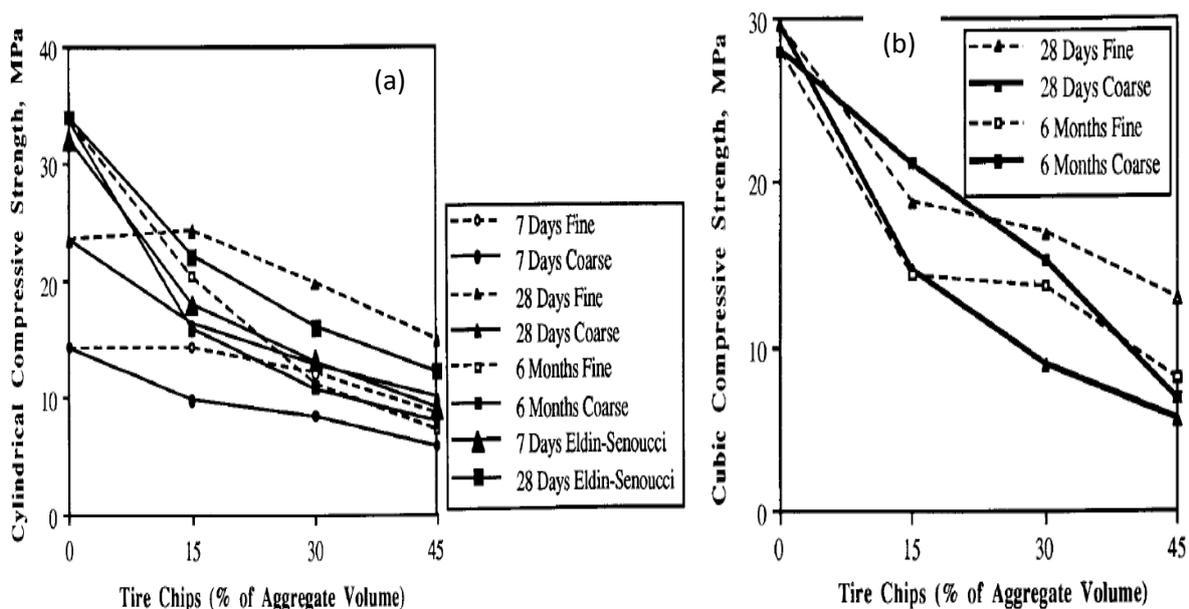


Figure 2.9. Changements de la résistance à la compression en fonction de la quantité de mélange de caoutchouc : (a)cylindres, (b) cubiques [Topçu et al. 1995].

Selon les travaux de Patel et al.2020, une plus petite réduction de la résistance à la compression (2% à 10%) a été observée lorsque le sable a été remplacé par la poudre de caoutchouc. La résistance à la compression du béton de caoutchouc avec 5 % et 10 % de substitution de sable par la poudre de caoutchouc est presque égale à celle du béton normal. La résistance à la compression pour 15% de sable remplacé par poudre de caoutchouc est légèrement diminuée.

Benazzouk et al. 2008, ont quant à eux développé des composites renforcés par particules de caoutchouc de 10%, 20%, 30%, 40% et 50% en remplacement du ciment. L'étude expérimentale a révélé que l'ajout de particules de caoutchouc réduit le poids unitaire du composite. La résistance à la compression de 10.50 MPa, la résistance à la flexion de 3,25 MPa et la masse volumique sèche de 1150 kg/m³ ont été obtenues.

Des essais en compression réalisés par Fedroff et al.1996, sur des bétons caoutchoutés ont également mis en évidence que l'ajout du caoutchouc réduit les propriétés mécaniques. En effet, les auteurs ont constaté une réduction de la moitié pour les mélanges du béton de 10% et de près de 75% pour les mélanges de béton de 30% du caoutchouc à l'âge de 28 jours. Cependant, la réduction est significative pour les mélanges avec 30% du caoutchouc, elle a été de 42 et 58% pour la résistance à la flexion et à la compression après 28 jours, respectivement. Les résultats montrent que le béton avec 10% peut être utilisé pour les autoroutes car la résistance à la flexion a été supérieure à 3.8 MPa à 14 jours, mais pas les mélanges à 20 et 30%. La figure 2.10, représente l'évolution de la compression en fonction du pourcentage de caoutchouc.

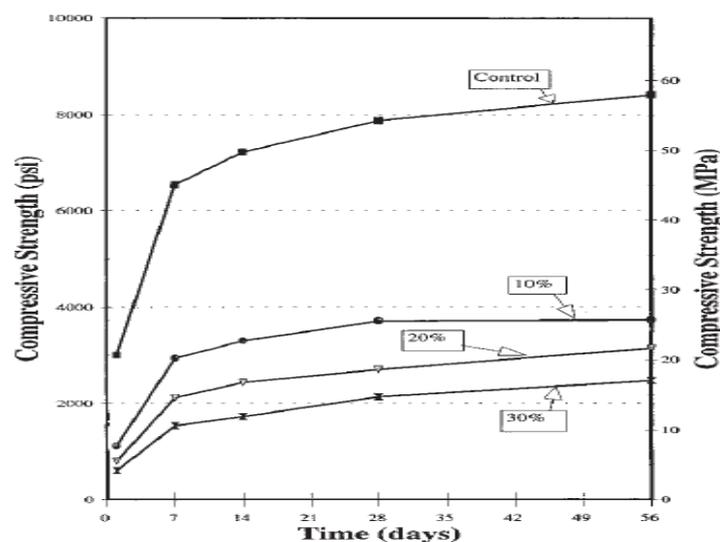


Figure 2.10 Résistance à la compression vs le temps, pour différents (%) en caoutchouc [Fedroff et al.1996].

Pour les mortiers caoutchoutés, Raghvan et al. 1998, ont étudié deux formes différentes de particules de caoutchouc comme constituants du mortier : (1) des granulés d'environ 2 mm de diamètre, et (2) des déchiquetés ayant deux tailles qui étaient, nominalement, 5,5mm x 1,2mm et 10,8mm x 1,8mm (longueur x diamètre). Comme prévu, la géométrie des particules de caoutchouc a influencé le comportement mécanique du mortier contenant du caoutchouc. En effet, l'ajout de caoutchouc a entraîné une diminution de la résistance à la flexion. Cette diminution de la résistance dépendait de la teneur de granulés et de la forme du caoutchouc. Cependant, le caoutchouc déchiqueté contribue à maintenir l'intégrité structurelle du matériau. Pour les échantillons du mortier contenant des granulés de caoutchouc, les particules de caoutchouc se sont détachées de la matrice, entraînant une séparation complète des spécimens. Pour améliorer la résistance à la flexion, Jianwen Shao et al. 2021, ont ajouté un agent expansif uni (UEA). En effet, l'application combinée de (UEA) ,4% en poids du ciment, et les particules de caoutchouc a augmenté de manière significative la résistance à la flexion du mortier de ciment. Néanmoins, cette étude confirme que la taille des particules du caoutchouc réduit la résistance mécanique.

Les particules de caoutchouc ont été également utilisées dans les couches de chaussées d'autoroute pour augmenter la résistance à la déformation plastique [Iran Transportation Research Institute.2006]. Leurs résultats ont montré que les couches bitumineuses caoutchoutées présentaient une meilleure adhérence, une réduction des fissures et une durée de vie plus longue que les mélanges bitumineux conventionnels [Fedroff et al.1996]. Cependant, le coût initial du bitume caoutchouté est de 40 à 100% plus élevé que celui de l'asphalte conventionnel.

2.6.4. Retrait des éléments en ciment contenant de particules de caoutchouc

Le retrait est une variation dimensionnelle d'un élément en ciment ou en béton qui se trouve dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre. Ce phénomène physique et chimique se produit avant, pendant et après la prise du ciment. Ces variations dimensionnelles peuvent causer des fissures préjudiciables à la continuité et la durabilité du matériau. Il y a deux types de retrait qui diminuent généralement la résistance à la fissuration des matériaux à base de ciment qui sont le retrait libre et le retrait limité [Jianwen Shao et al. 2019].

Depuis que le concept du béton de caoutchouc a été connu, de nombreux travaux de recherche ont montré que l'ajout de caoutchouc dans une matrice de béton permet d'obtenir des

propriétés nouvelles et très intéressantes telles que la fragilité et la rigidité, l'absorption d'énergie, la déformabilité et la durabilité du béton [Jiang et al. 2021]. Néanmoins, l'influence des granulats de caoutchouc sur le retrait du béton ou du mortier reste restreinte. Dans le cas d'un mortier caoutchouté, certains auteurs avancent que le retrait du mortier caoutchouté est plus important que le mortier de référence. Ceci peut être justifié par les études qui ont été menées par Turatsinze et al.2005. Les résultats montrent clairement que des fissurations multiples dans le cas du mortier incorporant 30% (M30) de granulats de caoutchouc et des fissurations discontinues en cas du mortier avec 20% (M20) (figure 1.4). Récemment Jiang Shao et al. 2019, ont évalué le comportement du retrait d'un mortier de ciment contenant de particules de caoutchouc. Les résultats montraient que les tailles des particules de caoutchouc à une grande influence sur le retrait. En effet, plus les tailles de particules contenues dans les formulations sont grandes, plus elles contribuent à la réduction du rétrécissement ainsi qu'à l'arrêt la propagation des fissures.

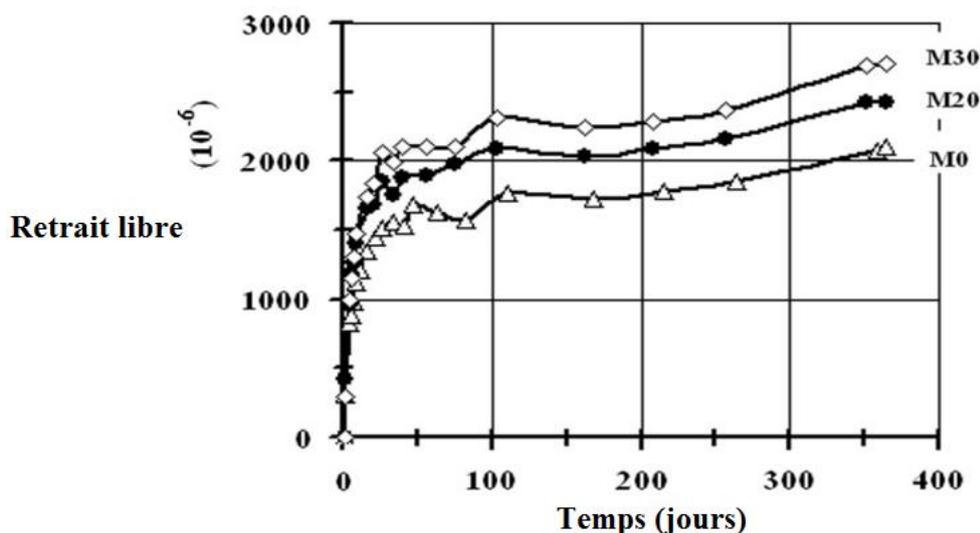


Figure. 2.11. Retrait libre en fonction du temps du mortier caoutchouté [Jiang Shao et al. 2019].

Choi et al.2015, ont confirmé la réduction de la probabilité de fissuration due au retrait du mortier par l'ajout de 5% d'agent expansif (d'ettringite-gypsum).

Des conclusions similaires ont été confirmées dans l'essai de mortier par Sahamitmongkol et al.2011.

Concernant le béton caoutchouté, les chercheurs [Garros et al.2007, Hobbs et al.1971]ont publié des articles qui expliquent essentiellement l'augmentation du retrait par la présence des granulats de caoutchouc. Dans une autre étude, un nouveau matériau composite léger à faible

retrait a été développé. En effet, l'ajout de la céramique et de la poudre de caoutchouc réduit considérablement les contraintes dans le béton polymère en raison du retrait de durcissement. Ils ont constaté de faibles valeurs de contrainte de retrait restreint qui peut principalement être attribuée au fait que la poudre de caoutchouc ralentit le processus de durcissement de la matrice de résine dans le composite [Yinong et al. 2020].

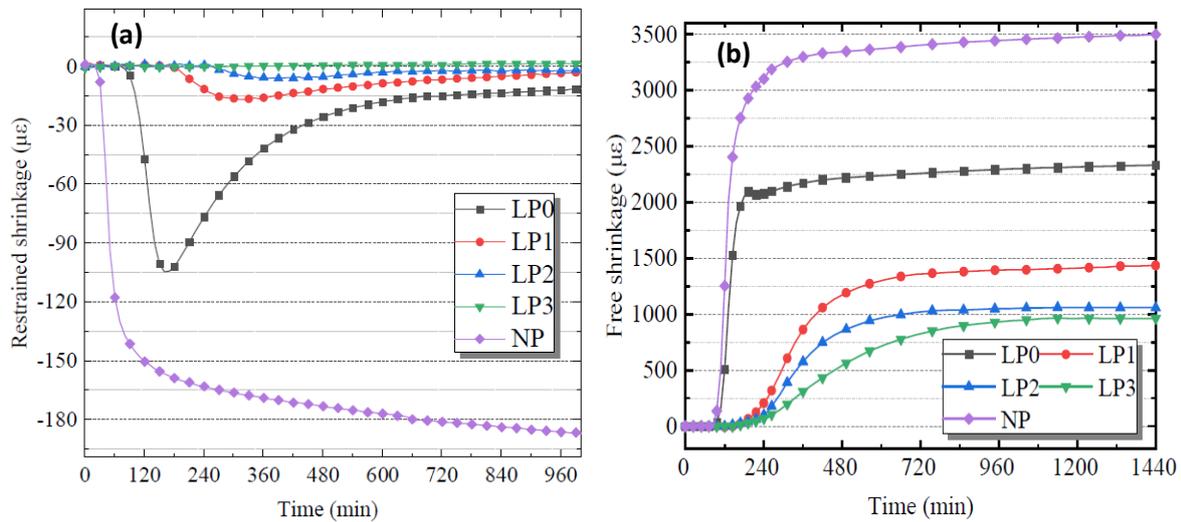


Figure 2.12. Comparaison entre (a) le retrait restreint et (b) le retrait libre [Yinong et al. 2020].

Jung et al.2015, ont démontré que l'inclusion de caoutchouc de silicone réduisait le retrait du béton polymère.

Wang. 1997, a constaté également que l'inclusion de déchets de poudre de caoutchouc réduit considérablement le retrait pendant le durcissement. Il a attribué cette réduction au coefficient de dilatation thermique élevé des poudres de caoutchouc.

2.6.5. Conductivité thermique des matériaux à base de particules de caoutchouc

Dans de telles conditions environnementales, de nombreux travaux portent sur la production de matériaux isolants en recyclant des déchets industriels, agricoles et ménagers. Cette solution est commencée déjà depuis des décennies pour réduire la consommation d'énergie dans la construction. Il existe de nombreux composites légers qui ont été développés et appliqués avec succès dans leur confection. Citons à titre d'exemple les copeaux de bois [Ledhem et al. 200], des cendres volantes [Borges et al.2018], fibres de sisal [Gloria et al. 2021], les déchets de briques [Sharma et al. 2020], agrégats légers d'argile expansée [Kayali et al. 2002], par conséquent, le développement de matériaux de construction composites à

faible conductivité thermique, en utilisant ces déchets, sera une alternative intéressante qui permettrait de résoudre simultanément les problèmes d'énergie et d'environnement. Ce qui nous intéresse dans cette partie est le comportement des matériaux caoutchoutés d'isolation thermique. Les travaux de Benazzoug et al.2008, portent sur des composites de ciment contenant des particules de caoutchouc pour mesurer la conductivité thermique. L'étude expérimentale a révélé que l'ajout de particules de caoutchouc réduit la conductivité thermique du composite. L'effet d'isolation thermique des particules de caoutchouc est très intéressant. Les propriétés du composite avec 50% de particules de caoutchouc donnent un coefficient de conductivité thermique de 0,47 W/mK (figure 2.13).

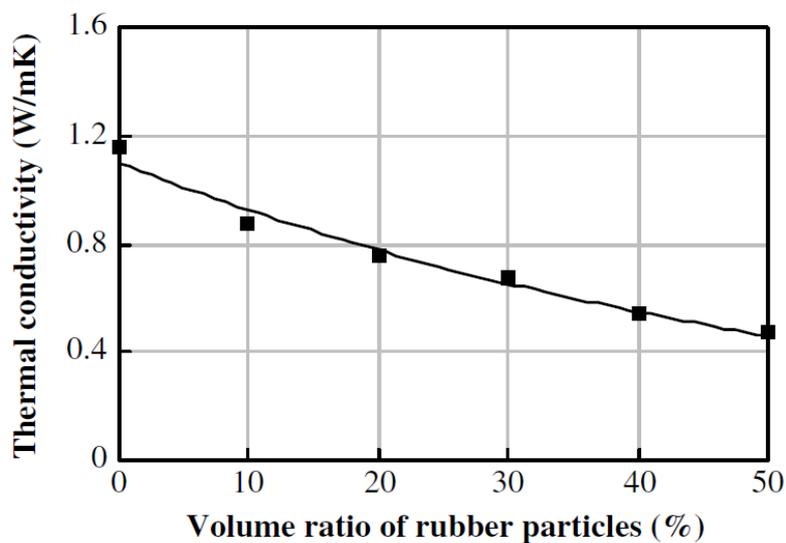


Figure.2.13. Variation de la conductivité thermique du composite de ciment avec le rapport volumique des particules de caoutchouc [Benazzoug et al.2008].

Jusqu'à présent, la plupart des travaux scientifiques menés sur le caoutchouc et du sable recyclé sont concentrées sur la résistance à la compression et le comportement des matériaux au cisaillement [Zornberg et al. 2004], la capacité de déformation axiale [Neaz Sheikh et al. 2012], les propriétés dynamiques [Feng-chi et al.2014, Senetakis et al.2012], etc. Cependant, peu d'études se sont penchées sur les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des mélanges caoutchouc-sable.

Liu et al.2020, ont examiné les effets de la fraction des particules du caoutchouc et du diamètre de sable recyclé sur la conductivité thermique. Les particules de caoutchouc utilisées dans cette étude provenaient de copeaux de pneus. Ces auteurs ont pu montrer que la conductivité thermique des mélanges caoutchouc-sable augmente progressivement pour les fractions de sable inférieures à 20%, mais on observe un taux d'augmentation plus élevé de la conductivité thermique immédiatement après que la fraction du sable dépasse 80%, ce qui

reflète les propriétés thermiques des particules de sable. Pour les différentes tailles de particules de sable, plus le diamètre des particules de sable est grand, plus la conductivité thermique est élevée.

2.6.6. Durabilité des matériaux à base de particules de caoutchouc

Le recyclage des particules de caoutchouc dans l'industrie du béton peut être une bonne solution pour préserver l'environnement. Cependant, l'étude de la durabilité des bétons contenant des particules de caoutchouc est très peu investie. Gesoglu et al.2007, constaté une augmentation de la profondeur de pénétration du chlorure avec augmentation de la teneur en caoutchouc pour le béton contenant des matériaux pouzzolaniques. Les résultats montrent que le remplacement du caoutchouc de 0 à 25 % augmenter la perméabilité au chlorure du béton de 27 à 59 %.

À propos de l'influence de la poudre de caoutchouc sur la perméabilité du béton, Gupta et al. dans une série d'évaluations expérimentales ont constaté que l'utilisation de fibres de caoutchouc et de poudre de caoutchouc augmentait la perméabilité dans le béton [Gupta et al.2014].

Amiria et al.2021, ont quant à eux développé un béton contenant la poudre de caoutchouc usagé avec les taux de remplacement de 0 %, 2,5% et 5% en poids de ciment. Les résultats montrent que des pores capillaires plus grands et une porosité plus élevée de la pâte sont formés en raison des caractéristiques hydrophobes de la poudre de caoutchouc usagé. Les essais de durabilité par migration rapide des chlorures ont été réalisés à différents âges. Les spécimens ont des taux de migration des ions chlorure faibles en raison de la meilleure capacité de blocage de la poudre de caoutchouc. Na et al.2017, ont constaté également que le taux de migration des ions chlorure du mortier de caoutchouc était faible par rapport à celui du mortier de ciment ordinaire. Cette recherche a permis de conclure que la perméabilité des échantillons était inférieure à celle des mélanges de référence, car la poudre de caoutchouc de taille microscopique était capable de bloquer la structure des pores connectés des spécimens.

2.7. Conclusion

La conclusion tirée de ce chapitre est que l'utilisation des déchets dans la fabrication du béton est bénéfique à la fois économiquement en remplaçant certains des composants par des déchets de caoutchouc et environnemental par une élimination propre de ces déchets. Les pneus sont les plus problématiques ; ils peuvent constituer une menace pour l'environnement.

Nous avons passé en revue les granulats de caoutchouc et la poudre de caoutchouc en particulier utilisés dans la fabrication des matériaux composites en général et le béton caoutchouté en particulier.

L'incorporation des particules de caoutchouc dans le mortier ou dans le béton à l'état frais, entraîne un effet négatif sur la maniabilité qui se traduit, en général, par une mauvaise mise en œuvre.

Cependant, à l'état durci, la présence des particules de caoutchouc dans un matériau à matrice cimentaire est jugée positive pour la ductilité, la conductivité thermique et la résistance au développement des fissures.

CHAPITRE III :

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT
D'UN BÉTON ORDINAIRE ET UN BÉTON DE SABLE
MODIFIÉS PAR LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC**

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT D'UN BETON ORDINAIRE ET D'UN BETON DE SABLE MODIFIÉS PAR LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

3.1. Introduction

Avec l'avènement des méthodes de calculs non linéaires, il est devenu possible de modéliser fidèlement le comportement d'une structure en béton armé.

De par son comportement très hétérogène, le béton est un matériau très difficile à modéliser, spécialement son comportement en traction. Il existe deux façons ; la méthode discrète qui tente de reproduire la propagation des fissures individuelles les unes des autres, et la méthode "étalée" qui simule un comportement global du béton en traction, sans prendre en compte l'ouverture des fissures. On nomme également cette dernière "modèle d'endommagement du béton". La grande complexité de la méthode discrète amène la plupart des logiciels de calculs à utiliser le deuxième procédé [Arockiasamy. 2000] ; Mis à part le problème du béton, d'autres difficultés entrent en ligne de compte lorsque l'on modélise un élément de structure en béton armé, de surcroît s'il est renforcé par des matériaux composites collés. Les différents paramètres de liaison, d'adhérences et d'interfaces entre les matériaux sont en effet complexes à modéliser ou sont encore mal connus. La plupart des études déjà réalisées font des simplifications. Les armatures sont représentées par une ligne sans prendre en compte l'adhérence au béton (considérée comme parfaitement liée) et la couche d'adhésion entre le béton et le FRP est ainsi négligée [Mpan et al. 2004].

Notre étude est divisée en deux parties, la première concerne la modélisation numérique du comportement des éprouvettes en béton de sable et un béton ordinaire dont la quantité de sable était remplacée pondéralement par un taux de trois pour cent (03%) de poudrette de caoutchouc et la deuxième présente une comparaison des résultats obtenus par des données expérimentales. La modélisation s'est basée sur le logiciel "ABAQUS".

3.2. Présentation du logiciel «ABAQUS»

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) devenu ABAQUS, Inc depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005. ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en

particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. ABAQUS est donc un logiciel de calcul les éléments finis qui se compose de trois produits :

- ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.
- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- ABAQUS/Explicit est un solveur qui emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.
- ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les para métrisations.

La gestion de l'interface graphique est assurée par fox-toolkit. ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues. En 2005, ABAQUS, Inc a été acquise par Dassault Systèmes et est devenu SIMULIA le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier (*.odb).

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier (*.odb) (ou post traitement).

La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions, les maillages, les matériaux, les chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le prétraitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- Génération du fichier de données,
- Lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats.

3.3. Modélisation des éprouvettes en béton à base de poudre de caoutchouc

Le béton est un élément solide, utilisé pour modéliser les pièces massives dans une structure renforcées par ferrailage, l'élément de béton modélisé a huit nœuds, chaque nœud contient trois degrés de liberté, des translations dans les trois directions nodales ; l'élément est capable d'une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions, comme le montre dans la figure 3.1. [Ansys Basic].

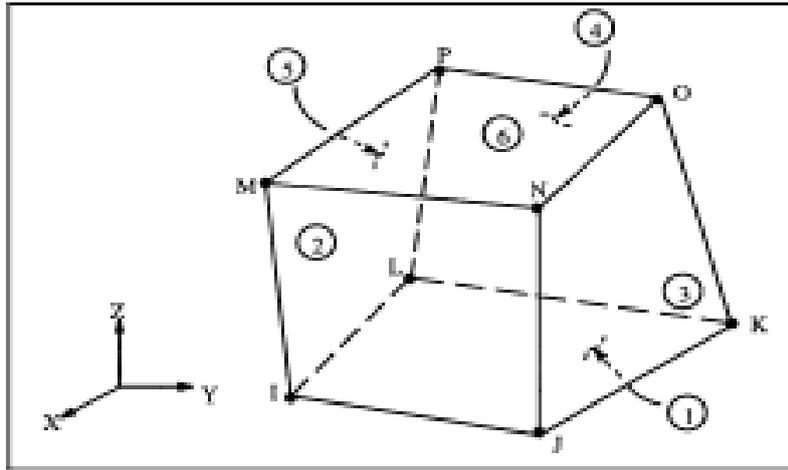


Figure 3.1. Élément béton [Ansys Basic].

3.3.1. Propriétés du béton

Le béton est un matériau composite aggloméré quasi fragile après déformation, ayant un comportement très différent en compression et en traction. La résistance à la traction est en général 8 à 15% de la résistance à la compression [Kachlakev 2000]. La courbe contrainte - déformation du béton est présentée dans la figure 3.2. En compression, cette courbe est linéairement élastique jusqu'à environ 30% de la contrainte maximale à la compression. Au-delà de ce point, la contrainte augmente graduellement jusqu'à la contrainte maximale à la compression (σ_{cu}). Après ce point la courbe descend, et se produisant l'écrasement et la rupture à une déformation ultime ϵ_{cu} . En traction, la courbe contrainte-déformation est approximativement linéaire et élastique jusqu'à la contrainte maximale à la traction, puis la résistance diminue graduellement à zéro.

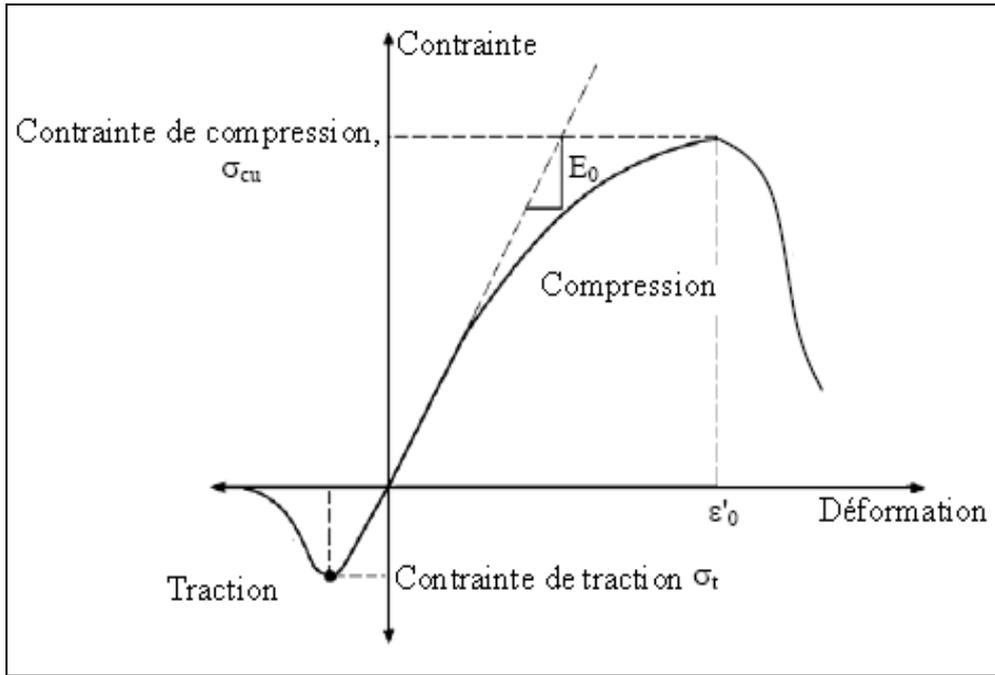


Figure 3.2. Comportement typique du béton sous un chargement uniaxial [Kachlakev 2000].

Les propriétés linéaires isotropes et multilinéaires isotropes pour le béton, sont données comme suit :

- Module d'élasticité (E_c).
- Résistance à la compression ultime (f'_c).
- Résistance à la traction ultime (f'_t).
- Coefficient de poisson (ν).
- Coefficient de transfert de cisaillement (β_t).
- La relation contrainte-déformation en compression uni axiale.

Les résistances ultimes du béton à la compression et à la traction, ont été calculées par les équations (3.1), et (3.2) respectivement.

$$f'_c = \left(\frac{E_c}{4730} \right)^2 \quad 3.1$$

Et pour f'_t

$$\hat{f}'_t = 0.623 \sqrt{f'_c} \rightarrow \hat{f}_t = 0.623 \frac{E_c}{4730} \quad 3.2$$

Où: E_c , f'_c et f'_t en MPa.

Le coefficient de poisson pour le béton est assumé égal à 0.2. Le coefficient transfert de cisaillement β_t , varie entre 0.05 et 0.25 [Kachlakev 2000], et dans cette étude il est assumé égal à 0.2.

Le programme d'ABAQUS, utilise la relation contrainte-déformation pour le béton dans la compression uniaxial. Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer la courbe multilinéaire isotopique du béton.

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad 3.3$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad 3.4$$

Avec:

f : Contrainte du béton en MPa.

ε : Déformation pour la contrainte f .

ε_0 : Déformation à la résistance ultime de compression f_{uc} .

La courbe contrainte-déformation multilinéaire isotrope mise en application exige que le premier point de la courbe soit défini par l'utilisateur. Elle doit satisfaire la loi de Hooke.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad 3.5$$

La figure 3.3, illustre la courbe contrainte –déformation simplifiée du béton sous un chargement uniaxial.

Cette courbe contient six points reliés par des lignes droites. Le premier point, défini par $0.3 f'_c$ est calculé par l'équation (3.5), les points intermédiaires sont obtenus à partir l'équation (3.3), et ε_0 est calculé par l'équation (3.4), le dernier point est défini par f'_c et ε_0 , après ce point un comportement parfaitement plastique est supposé.

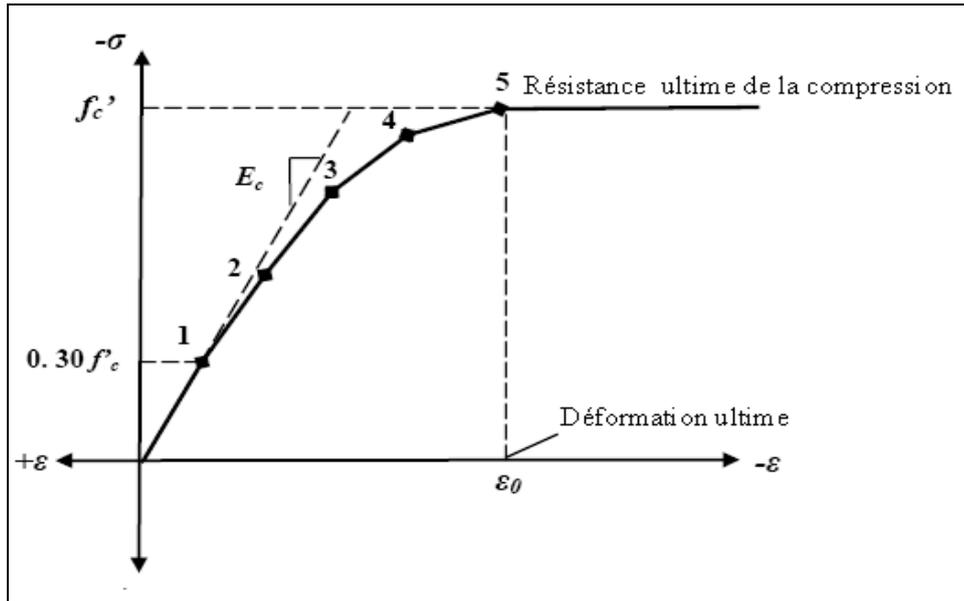


Figure 3.3. Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression uniaxial [Kachlakev 2000].

Les propriétés utilisées dans cette étude, du béton ordinaire et du béton de sable sont, les modules d'élasticité : $E_1 = 23342$ MPa, et $E_2 = 12748$ MPa, respectivement, et le coefficient de Poisson $\nu = 0.2$.

Pendant ces propriétés du béton utilisées sont celles pour l'étude expérimentale.

Tableau 3.1: Données des cinq points

	Déformation (ε) en ‰	Contrainte (σ) en MPa
Point 1	0.336	8.4
Point 2	0.672	15.4
Point 3	0.1	20.9
Point 4	0.13	24.7
Point 5	0.22	28

3.3.2. La géométrie

La figure 3.4, représente la géométrie de la poutre, le béton et l'acier et le matériau composite, et le chargement. La géométrie du béton est construite par un élément volume (bloc).

Ces éléments sont connectés avec le béton nœud par nœud, pour établir la bonne distribution de la charge, et pour garantir la meilleure connectivité entre les différents éléments discrétisés.

3.3.3. Discrétisation par élément finis

Modéliser un ouvrage consiste à sélectionner les éléments finis en fonction de paramètres géométriques, mécaniques et cinématiques (globaux ou locaux) et en fonction de degrés de liberté définis en des points remarquables (nœuds). Les éléments sont d'abord choisis pour traduire au mieux le fonctionnement élémentaire d'une structure de forme déterminée soumise à certaines conditions aux limites. Ce choix dépend principalement des modèles et méthodes mises en œuvre. Il faut ensuite assembler les éléments. Or la manière d'assembler ne peut être quelconque. Parce que les degrés de libertés des nœuds appartenant à des éléments juxtaposés doivent être de même nature, aux nœuds des éléments, les composantes inconnues ou supposées, si elles sont incompatibles, ne sont pas superposables. L'assemblage des éléments est donc régi par des principes portant sur la construction géométrique des maillages en termes de distribution et de numérotation des nœuds et en termes de connexion des éléments ou de continuité entre les composantes des variables nodales. Mais les éléments finis matérialisent aussi des corps physiques. L'assemblage de corps comme la poutre, la plaque ou la coque, fait alors intervenir des caractéristiques mécaniques et parfois rhéologiques spécifiques qui peuvent prendre le pas sur les caractéristiques géométriques [Prat. et al. 2000].

Donc l'analyse par éléments finis est basée sur le maillage du modèle, qui est divisé en petits éléments. Ensuite le chargement est appliqué, et le calcul des contraintes et des déformations aux points d'intégrations est réalisé [Kachlakev 2000] (Figure 3.4). Nous avons choisi un maillage à base de rectangles à quatre nœuds. Dans toute modélisation par éléments finis, le résultat est fortement influencé par la finesse du maillage.

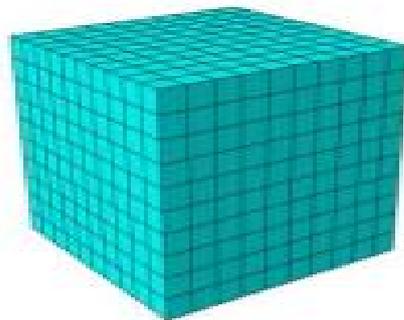


Figure 3.4. La discrétisation par ABAQUS

La convergence des résultats est obtenue lorsque le maillage est dense et le nombre d'éléments est adéquat.

3.3.4. Chargement et conditions aux limites

Une structure ne peut être justifiée qu'à condition d'être correctement chargée. Généralement, les ouvrages sont construits pour supporter ou transmettre des charges. L'objet d'un calcul par élément finis est donc de montrer que, moyennant certaines hypothèses et certains coefficients de sécurité, le modèle résistant reste compatible avec un niveau de charge autorisé.

Or, la réponse résistante d'un ouvrage est étroitement liée à la modélisation de la charge agissante. Les charges réelles ne sont pas directement applicables aux structures (considérées comme modèles d'élément finis). Il faut convertir ces charges (dans des directions choisies), en forces et en couples équivalents et les appliquer aux nœuds (associés à des degrés de libertés) d'un maillage. La précision des calculs est donc non seulement fonction de la façon dont les charges sont traduites numériquement mais également fonction de la façon dont les modalités d'application des charges (délimitation des voies de circulation sur une chaussée, par exemple) sont interprétées [Jean 2001].

Les éprouvettes testées par essais de compression et essais de traction, la géométrie de ces deux modèles est donnée dans la figure 3.5. Le modèle est chargé avec les mêmes conditions que l'essai expérimental. Les conditions aux limites ont été fidèles au modèle expérimental, le pas d'application de la charge est identique à l'expérimentation en mode statique.

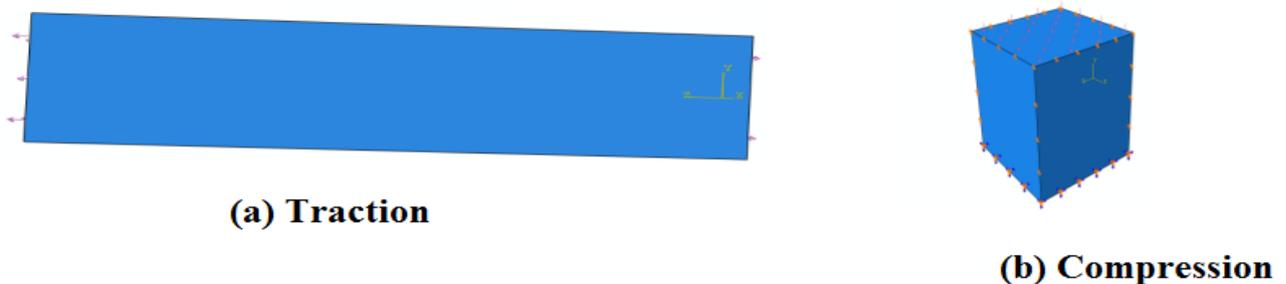


Figure 3.5. Chargement et appuis de modèle

3.4. Conclusion

Le logiciel Abaqus est bien adapté pour ce type de travail. Cette partie détaille les différentes étapes à suivre dans le logiciel ABAQUS pour faire la simulation numérique des éprouvettes testées par essais de compression et essais de traction.

Même si la thématique est à caractère numérique, il est important de souligner que la simulation numérique se fait en amont des travaux expérimentaux pour donner le ton et l'idée générale sur les séances expérimentales.

**LE DEUXIÈME VOLET :
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
ET NUMÉRIQUE**

CHAPITRE IV :
MATÉRIAUX ET ESSAIS

CHAPITRE IV : MATERIAUX ET ESSAIS

4.1. Introduction

Dans cette partie, on va présenter les différents matériaux utilisés et les essais effectués. On commencera par la caractérisation des matériaux utilisés dans la confection des bétons, ensuite on exposera la méthode de formulation adoptée pour les différents mélanges ;

Enfin, on terminera par la définition des procédures des essais expérimentaux effectués pendant l'examen et l'investigation des différents échantillons de bétons à l'état frais et à l'état durci.

Les essais effectués ont été réalisés au laboratoire Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique, le Laboratoire des Travaux Publics de centre (LTPC) à Hussein Dey (Alger) et le laboratoire national de l'habitat et de la construction (LNHC) de la société de gestion des participations Etudes et engineering « GENEST » unité Oued Smar.

4.1. Caractéristiques des matériaux utilisés

La qualité et la durabilité d'un béton sont liées directement aux propriétés de ses divers constituants. La maîtrise du comportement des matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges et les proportions avec lesquelles ils entrent dans les compositions permettent une bonne interprétation des résultats trouvés.

4.1.1. Ciment portland

Un seul type de ciment a été utilisé dans notre étude. Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 N issu de l'usine de Lafarge à M'sila en Algérie. Le choix de ce ciment est justifié par l'étude des performances des bétons avec les matériaux les plus disponibles sur le marché. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5 MPa et une classe vrai à 28 jours de 45,55 MPa.

La composition chimique et minéralogique du ciment est présentée dans le tableau 4.1 et ses caractéristiques physiques et mécaniques dans le tableau 4.2.

Tableau 4.1 Composition chimique et minéralogique du ciment.

Composition chimique (%)										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF	P ₂ O ₅	TiO ₂
61,59	18,66	4.51	2.15	1.58	2.0	0.15	0.61	7,8	0.15	0.22
Composition minéralogique (%)										
C ₃ S		C ₂ S			C ₃ A			C ₄ AF		
67.85		12.29			7.33			11.67		

Tableau 4.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

	ρ_{app} (kg/m ³)	ρ_{abs} (kg/m ³)	SSB (cm ² /g)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
CEM II/42,5	1052	3145	4642	90	285

4.1.2. La poudrette de caoutchouc

Dans ce présent travail, nous avons étudié le polymère qui est un déchet industriel des pneus de couleur noirâtre provenant du broyage de chutes de caoutchouc ; il présente une granularité assez fine (taille de 1.25 mm maximum et 31% < 0.08 mm). Sa pureté est de l'ordre de 45 %. C'est un matériau élastique à température ambiante compatible avec le ciment et les agrégats. Elle présente une faible viscosité aux températures supérieures; sa température de fusion est de 200 à 220°C.

Elle nous a été fournie par la société d'application d'élastomère (SAEL) qui a été utilisée dans notre travail sous forme de poudrette comme ajout avec des pourcentages pondéraux différents dans le béton de sable de dunes et le béton ordinaire. Nous présentons son aspect dans la figure 4.1.

Les nouvelles technologies de broyage des pneus permettent de séparer le caoutchouc d'autres composantes (fils métalliques, fibres textiles), générant ainsi des particules en caoutchouc pratiquement pures (avec un taux résiduel inférieur à 0,05%).

La densité des granulats de caoutchouc est de 0.79 (avec l'utilisation de l'éthanol), donc très inférieure à celle des granulats naturels et leur coefficient d'absorption d'eau est presque négligeable (1,04). Leur distribution granulométrique est représentée dans la figure 4.1.



Figure.4.1 Particules en caoutchouc utilisées dans le programme expérimental.

➤ **Caractéristiques physiques**

Analyse par Infrarouge à l'aide du spectroscope FTIR

Une analyse en infrarouge a été réalisée sur la poudre de caoutchouc. Nous avons noté quelques observations [Haddadi ,2007], dont l'aspect visuel est celui d'une poudre fine de couleur noire et l'odeur est celle d'une matière caoutchouteuse. Le spectre obtenu à l'Infrarouge est représenté dans la Figure 4.2.

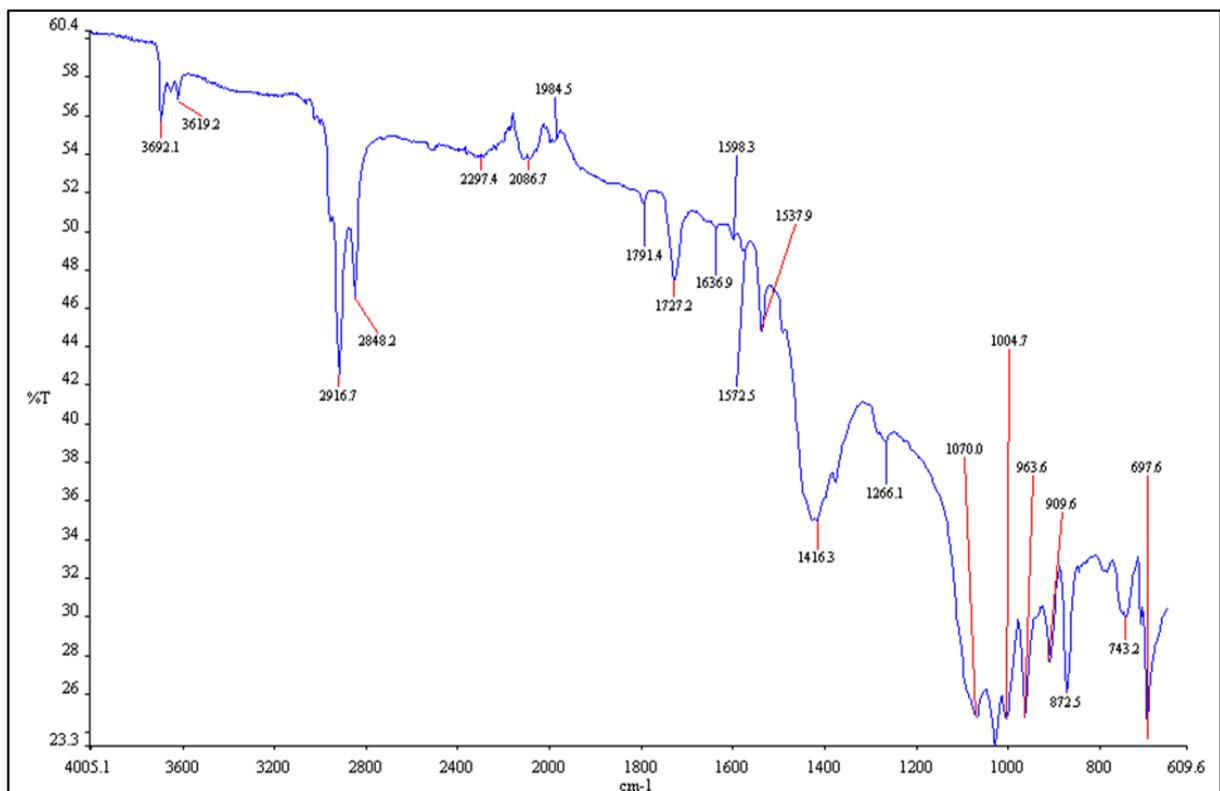


Figure. 4.2 Résultats Infra Rouge de la poudre de caoutchouc. [Haddadi_2007]

Son analyse a permis de conclure que le polymère est une matière caoutchoutique de type NBR (Acrylonitrile Butadiène Rubber) et ses groupements sont apparus dans le spectre infrarouge de l'échantillon analysé.

Dans la figure 4.2, le spectre FT IR de l'échantillon normal non traité contenant du caoutchouc montre des bandes d'absorption typiques des unités de poly-butadiène (étirement C-H à 2919 et 2852 cm^{-1} , torsion -CH₂ à 1384 cm^{-1} et déformation hors plan de C-H à 867 cm^{-1}) et de polystyrène (étirement C-H aromatique à 3014 cm^{-1} , étirement C=C aromatique à 1631 cm^{-1}).

On observe également une absorption par flexion C-O-C à 1122 cm^{-1} . Enfin, la bande détectée à 539 cm^{-1} correspond au mode d'étirement de la liaison simple Zn-O. Ces résultats confirment que l'échantillon analysé par FT IR est probablement constitué de caoutchouc styrène-butadiène-styrène compacté avec de l'oxyde de zinc.

Afin d'identifier la composition chimique des déchets, une microanalyse a été réalisée. En effet, l'analyse ponctuelle par EDS permet de mesurer la composition relative de la matière organique et des minéraux.

La microstructure des déchets a été observée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) de type Jeol, JSM-6360 LV. Les résultats sont présentés dans la figure 4.3.

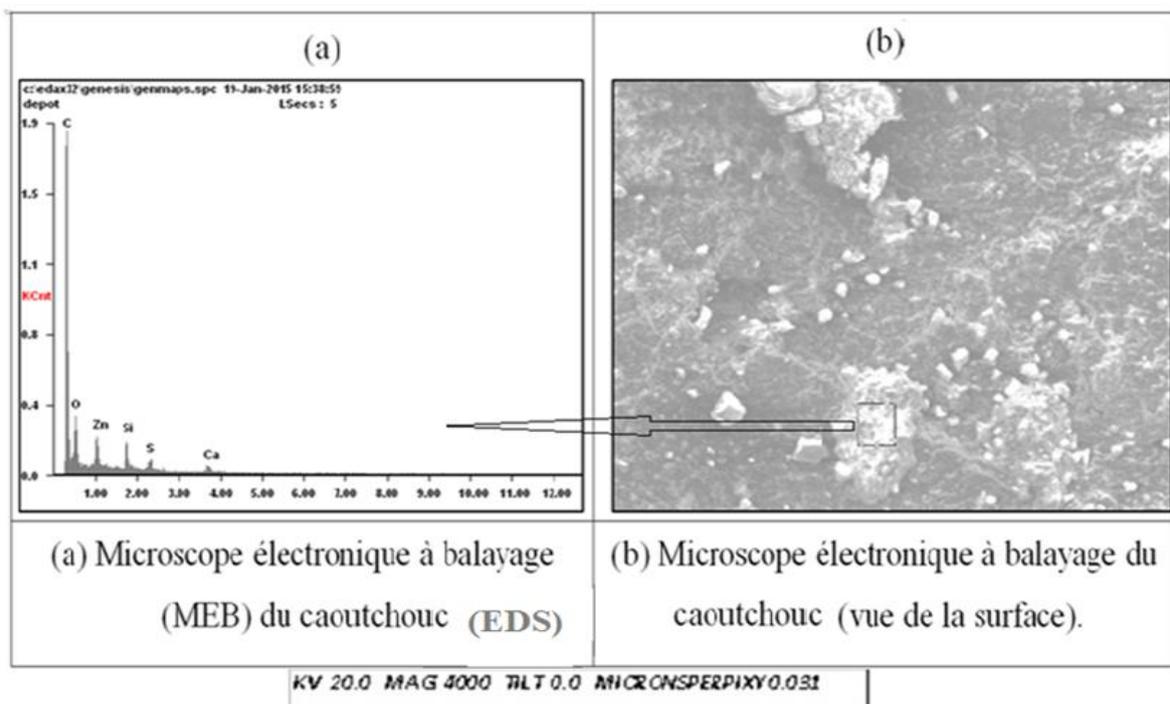


Figure. 4.3 Résultats du Microscope électronique à balayage [Lyacia et al .2019].

La morphologie du caoutchouc (Figure 4.3(b) : vue de la surface) montre que ce matériau

présente une structure dense hétérogène ; la distribution des différents composants n'est pas uniforme. On note également qu'une couleur grise est reconnue aux chaînes polymériques du caoutchouc et la couleur blanche est attribuée aux grains de zinc [Lyacia et al .2019].

Les propriétés physiques de cette poudre de caoutchouc sont résumées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Propriétés physiques de la poudre de Caoutchouc

Les essais	Résultat
Valeur au bleu de méthylène (VB) (g/l)	0.67
Masse volumique apparente (g/cm^3)	0.367
Masse volumique absolue (g/cm^3)	0.533
Compacité (%)	68.81
Porosité (%)	31.19

4.1.3. Le sable

Deux types de sable ont été utilisés pour la préparation de tous les mélanges. Un sable de Alluvionnaire (SA) grossier de Oued utilisé pour la formulation du béton ordinaire, et un sable de dune fin pour la préparation du béton de sable. La texture de la surface et la forme des particules de ces sables sont illustrées sur la Figure 4.4.

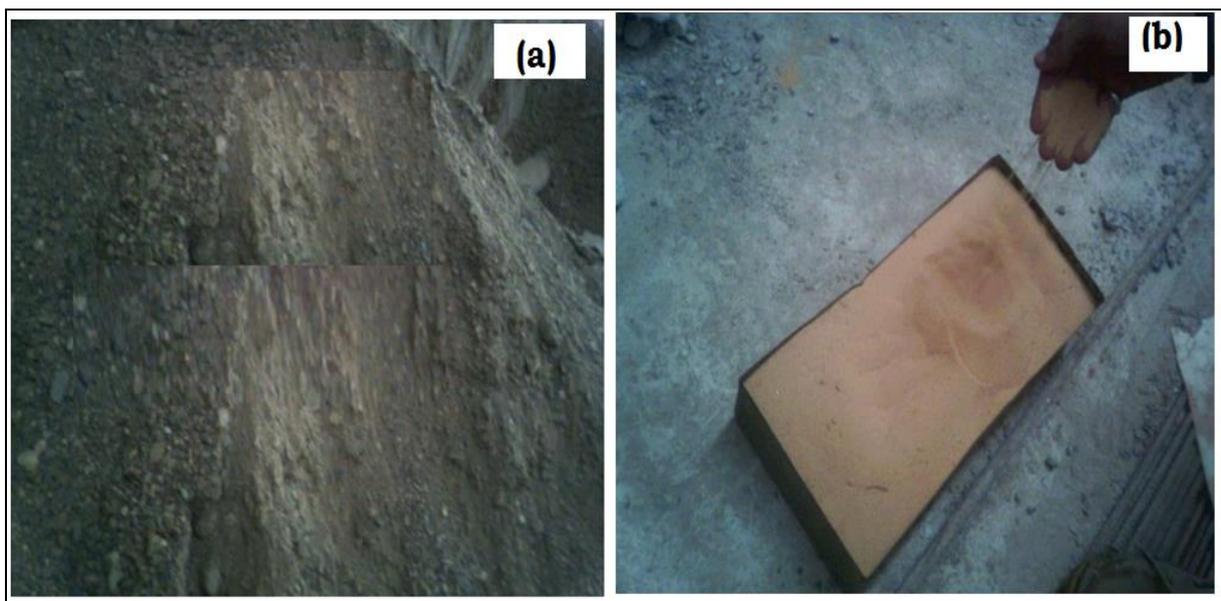


Figure .4.4 Texture et forme des particules des deux sables. (a) sable alluvionnaire, (b) sable de dune.

Le tableau 4.4 et le tableau 4.5 résument, les principales propriétés physiques et l'analyse chimique sommaire et des sables de dunes et des sables Alluvionnaires.

Les valeurs importantes du rapport des matériaux insolubles (silice SiO_2 + silicates) dans l'analyse sont respectivement de 94,86% pour le sable de dunes et de 86,07% pour le sable Alluvionnaire, indiquant que ces deux matériaux ont un caractère siliceux. La courbe granulométrique des sables utilisés est présentée dans la figure 4.5.

Tableau 4.4 Propriétés physiques du sable des dunes et du sable Alluvionnaire

Les essais	Sable des dunes	Sable Alluvionnaire
Module de finesse (Mf)	1.04	3.08
Équivalent en sable (ES) (%)	91.52	89.49
Friabilité (%)	21	39.2
Masse volumique apparente (ρ_{app}) (g/cm^3)	1.870	1.452
Masse volumique absolue (ρ_{abs}) (g/cm^3)	2.564	2.564
Compacité (%)	72.93	56.63
Porosité (%)	27.07	43.37
Valeur au bleu de méthylène (VB) (g/l)	0.5	0.63

Tableau 4.5 Analyse chimique sommaire du sable de dunes et de sable Alluvionnaire

Éléments	Sable de dunes (%)	Sable Alluvionnaire (%)
Insolubles (silice SiO_2 +silicates)	94.86	86.07
Oxyde de fer (FeO_3) et oxyde d'alumine (Al_2O_3)	0.81	5.38
Chlorure (Na Cl)	0.23	0.58
Sulfates ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$)	Traces	Traces
Carbonates (CaCO_3)	4.98	8.55
Dioxyde de carbone (CO_2)	2.28	3.76
Perte au feu à 1050 °C	2.19	4.43
Teneur en eau (H_2O)	0.6	0.67
Poids de bilan chimique	101.48	101.25

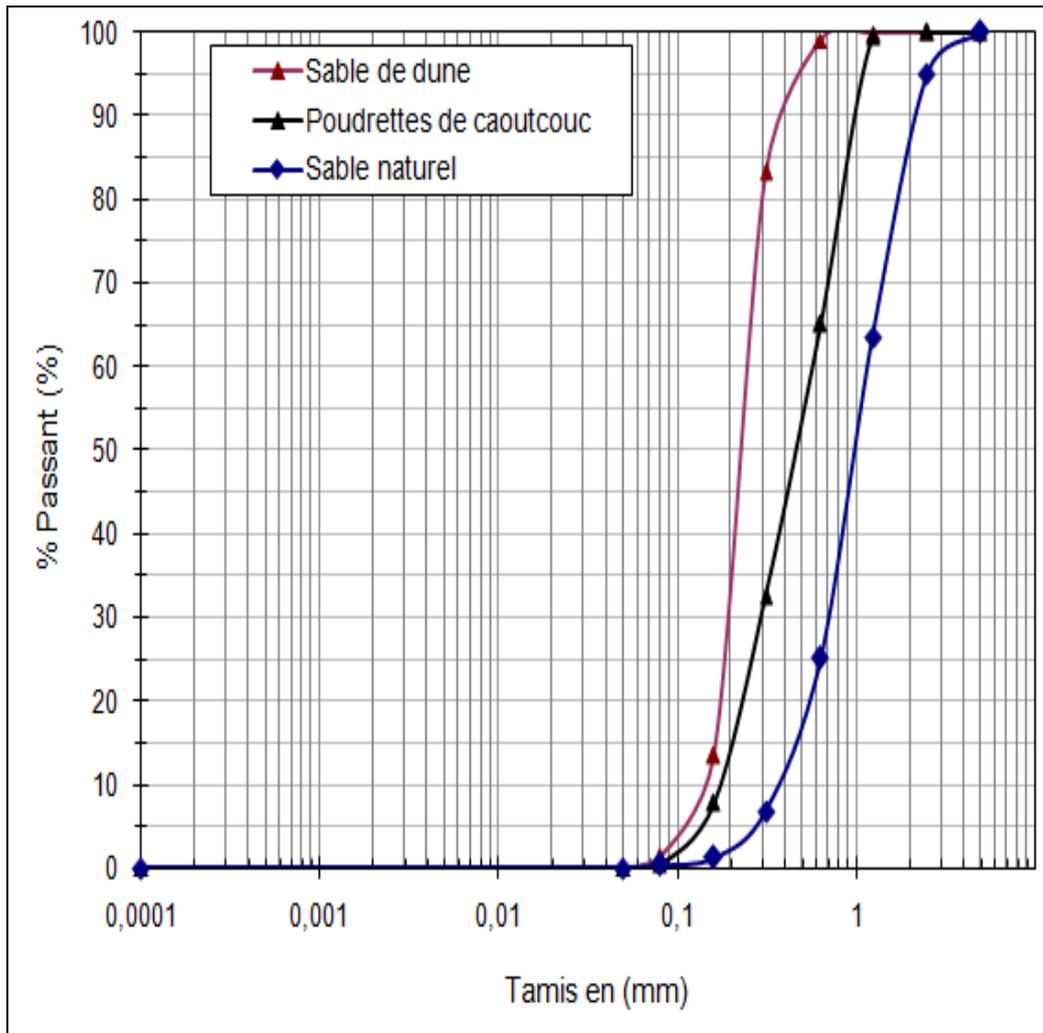


Figure 4.5 Analyse granulométrique des sables

4.1.4. Le gravier

Nous avons utilisé des granulats composés de deux classes granulaires ; 3/8 provient de la carrière JOBERT (Alger) et 8/15 de la carrière de KEDDARA (semi- concassé).

Les tableaux 4.6 et 4.7 résument, respectivement, l'analyse chimique sommaire et les principales propriétés physiques des agrégats.

Tableau 4.6 Analyse chimique sommaire du gravier 3/8 et 8/15

Eléments	Gravier 3/8 (%) J	Gravier 8/15 (%) K
Matériaux insolubles (silice SiO ₂ +silicates)	8.2	8.61
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃) et oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	3.08	2.98
Chlorure (NaCl)	0.41	0.29
Sulfates (CaSO ₄ -2 H ₂ O)	Traces	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	85.47	89.74
Dioxyde de carbone (CO ₂)	37.61	39.49
Perte au feu à 1050 °C	41.13	40.43
Teneur en eau (H ₂ O)	3.52	0.94
Poids du bilan chimique	100.68	102.56

Les valeurs importantes du rapport (carbonates-CaCO₃) dans les échantillons de gravier analysés avec respectivement 85,47% et 89,74% indiquent que ces deux graviers ont un caractère calcaire.

Tableau 4.7 Propriétés physiques des graviers 3/8 et 8/15

Test	Gravier 3/8 J	Gravier 8/15 K
Coefficient de planéité (%)	26	8.58
Micro-Deval (%)	38.40	18.20
Los-Angeles (%)	34.89	21.73
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.310	1.416
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.50	2.50
Compacité (%)	52.40	56.64
Porosité (%)	47.60	43.36

La figure 4.6 représente les courbes granulométriques des graviers.

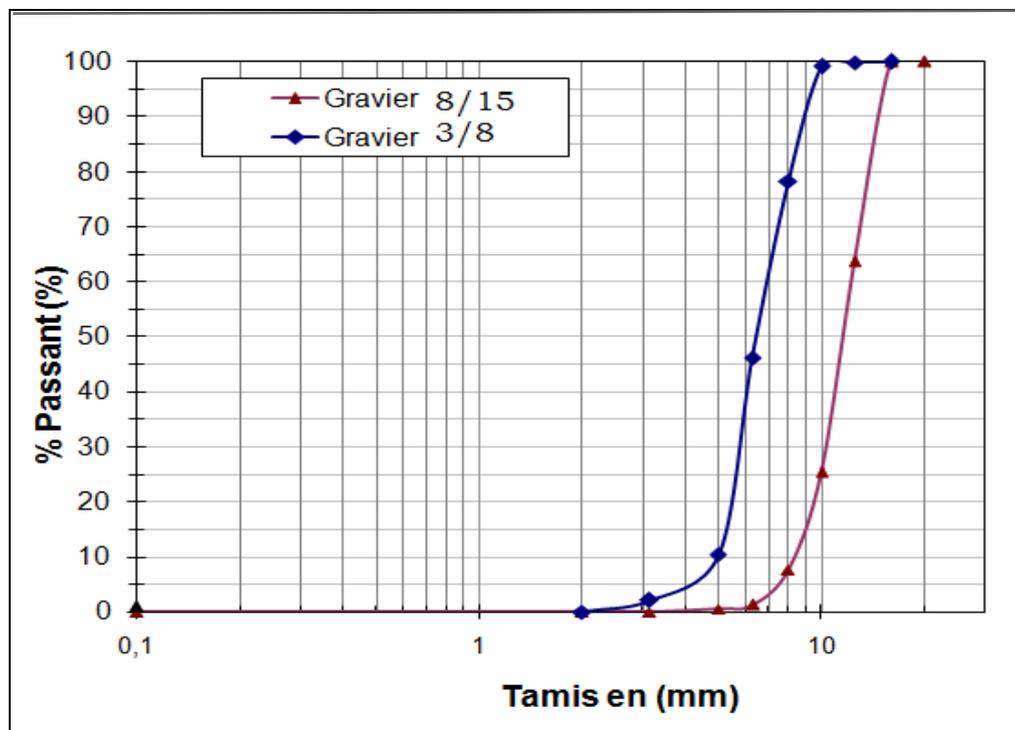


Figure 4.6 Analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/15

4.1.5. L'adjuvant

Fourni par la société GRANITEX de Oued Smar, l'adjuvant utilisé est le Superplastifiant Medaflow SR145, un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération.

Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable grâce à ses propriétés fluidifiantes.

La plage de dosage recommandée est de 0.3 à 2,5 % du poids de ciment, Voir la fiche technique, identifiant cet adjuvant, présentée en (Annexe 01).

4.1.6. Eau de gâchage

Dans cette étude, l'eau utilisée pour les mélanges des mortiers et des bétons est une eau de robinet, potable.

4.2. Formulations adoptées

4.2.1. Béton Ordinaire

La formulation a pour but de déterminer les proportions nécessaires de chaque composant de la gâchée, et ce, pour obtenir un béton aux propriétés souhaitées.

4.2.1.1. Méthodes de formulation

Il y a lieu de souligner que quelle que soit la méthode utilisée, celle-ci ne relève pas d'une science exacte et ne peut, à ce titre déterminer à elle seule les différents dosages de manière absolue ; c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème.

La solution définitive n'est obtenue qu'après avoir réalisé quelques essais (mesure et contrôle sur béton frais et béton durci).

Toute méthode de composition du béton doit être guidée par deux critères essentiels à savoir : la résistance et l'ouvrabilité ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais varient en sens inverse.

Plusieurs méthodes de compositions des bétons ont été proposées par différents auteurs : la méthode de Bolomey, de Vallette, de Faury, de Lezy, de Dreux-Gorisse. Nous avons choisi pour notre étude la méthode de composition proposée par Faury.

4.2.1.2. Mode opératoire et malaxage

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques du béton de telle sorte que le ciment soit bien réparti entre et autour de tous les grains inertes, Il faut en outre que le ciment ne soit regroupé en grumeaux. Il se fait comme suit:

- Placer le sable, le liant (éventuellement l'ajout) et les graviers dans le malaxeur ;
- Malaxer à sec pendant 3 minutes ;
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme. Continuer le malaxage durant 5 minutes ;
- Remuer le béton à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation.
- Pour les essais sur béton frais et après malaxage, on remplit les moules à raison de deux couches, la vibration du béton a été effectuée sur une table vibrante à raison de 30 secondes par couche.
- Enfin, araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Les éprouvettes, sont ensuite laissées dans le laboratoire pendant 24 heures. après démoulage, elles sont conservées dans l'eau jusqu'au jour de l'essai.

❖ Incorporation du caoutchouc

Nous préparons au départ des éprouvettes témoins à 0% de caoutchouc, puis des éprouvettes à 1, 2, 3, 4 et 5 % de poudre de caoutchouc là que l'incorporation de quantité de caoutchouc dans le pourcentage de sable (pondéral) comme substitution.

Le tableau 4.8, présente la composition optimale de chaque type de mélange en Kg/m³.

Tableau 4.8. Composition du béton ordinaire modifié avec poudre de caoutchouc pour 1m³

Compositions	BO PC 0%	BO PC 1%	BO PC 2%	BO PC 3%	BO PC 4%	BO PC 5%
Constituants (Kg/m ³)						
Ciment	350	350	350	350	350	350
Adjuvant	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
Sable Alluvionnaire	535.04	529.69	524.34	518.98	513.64	508.29
Poudre de caoutchouc	0	5.35	10.7	16.05	21.4	26.75
Gravillon 3/8	164	164	164	164	164	164
Gravier 8/15	1086.5	1086.5	1086.5	1086.5	1086.5	1086.5
Eau	180.45	180.45	180.45	180.45	180.45	180.45

4.2.2. Béton de sable

4.2.2.1. Formulation des bétons de sable de dunes

Le choix de la composition de béton est fait à partir des deux critères principaux, la maniabilité et la masse volumique. Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des bétons. Il est indispensable que le sable de dunes soit régulièrement dispersé et que le ciment soit bien réparti. La durée de malaxage des bétons de sable de dunes doit être inférieure à celle des bétons ordinaires, ceci suite à des études effectuées à ce sujet [Sablocrète]. En général, cette durée est estimée à 60 secondes dans un malaxeur en usine de fabrication des bétons de sable de dunes. La composition de base comporte le ciment, l'eau de gâchage, un adjuvant plastifiant et le sable de dunes. Elle sert comme témoin.

➤ Dosage en ciment

Le ciment utilisé (CPJ-CEM II/A-L 42,5 N) est divisé en deux fractions pondérales ; 85% du poids de CPJ est considéré comme un CPA, et 15% est considéré comme des fillers calcaires. Pour obtenir un béton de sable de dunes dosé à 300 kg/m³ en ciment CPA, on doit chercher le dosage en CPJ correspondant :

$$[CPA] = 0.85 \times [CPJ] \Rightarrow [CPJ] = \frac{[CPA]}{0.85} = \frac{[300]}{0.85} \quad (4.1)$$

$$[CPJ] = 352 \text{ kg/m}^3$$

On prend un dosage en CPJ égal à 350 kg/m³. Sachant que la masse volumique absolue de ciment est égale à 3.10 g/cm³, alors son dosage volumique est égal à 113 l/m³.

$$[CPJ] = 113 \text{ l/m}^3$$

Les 15% de ciment restant sont considérés comme des fines calcaires, leur dosage est déterminé comme suit :

$$[\text{Filler calcaire}] = 0.15 \times [CPJ] = 52.5 \text{ kg} \quad (4.2)$$

➤ **Dosage en adjuvant**

Le dosage en adjuvant est pris égal à 1.5% (même dosage que pour le béton ordinaire) du poids du ciment pour permettre une réduction de l'eau de gâchage de 10 à 15% (on prend 10%).

$$M_{Adj} = [Adj] = \frac{1.5 \times 350}{100} = 5.25 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = M/V \rightarrow V = M/\rho \quad D = 1.06 \Rightarrow MV_{adj} = 1060 \text{ Kg/m}^3$$

D'où le dosage volumique en adjuvant égal à 4.96 l/m³. [Adj]=4.96 l/m³.

➤ **Dosage en eau**

Le dosage en eau est fonction du dosage en ciment. L'expérience nous donne des valeurs de 250 l/m³ pour un dosage en ciment de 400 kg/m³; et 220 l/m³ pour un dosage en ciment de 350 kg/m³ (dans notre cas).

Cette quantité doit être révisée lors de la réalisation des gâchées surtout avec l'utilisation des adjuvants réducteurs d'eau. Le dosage en adjuvant utilisé permet de réduire l'eau de 10% donc le dosage en eau est égal à 198 l/m³.

On note : [Eau] = 198 l/m³.

Cette quantité doit être versée par étapes jusqu'à l'obtention de la maniabilité recherchée.

➤ **Teneur en air occlus**

Un béton contient toujours un volume d'air. Dans le cas des bétons de sable de dunes, la teneur en air est de l'ordre 5 à 7%. On prend une valeur moyenne de 6%

$$[air] = \frac{6 \times 1000}{100}$$

Donc :

$$[air] = 60 \text{ l/m}^3$$

➤ **Dosage en sable de dunes :**

Après avoir déterminé les valeurs du ciment, de l'eau, de l'adjuvant et de l'air, le volume du sable de dunes s'obtient en complétant la formule d'un mètre cube

$$[Ciment] + [eau] + [adj] + [air] + [sable de dunes] = 1000 \text{ cm}^3$$

$$[\text{Sable de dunes}] = 624.04 \text{ l/m}^3$$

Sachant que la masse volumique absolue du sable de dunes est de 2564.1 kg/m^3 et le dosage massique en sable de dunes est égal à 1600.1 kg/m^3 .

Les résultats sur le maniabilimètre LCPC de cette composition en fonction de la quantité d'eau de gâchage sont donnés dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 Maniabilité en fonction du dosage en eau.

Quantité d'eau en (L)	Maniabilité
185	1mn et 54s
198	40s

On remarque que la quantité d'eau de gâchage calculée théoriquement n'est pas suffisante pour l'obtention de la maniabilité recherchée ceci est dû à la finesse des grains du sable de dunes, et donc une quantité supplémentaire d'eau est nécessaire pour mouiller toute l'interface entre grains et faciliter ainsi l'écoulement du béton.

Pour cela on doit corriger la formulation par l'équation itérative

$$S1 = 1600.1 - (2153.35 - 2140) - 2560 * 35.5 * 10^{-3}$$

$$S1 = 1495.87 \text{ kg/m}^3; \text{ maniabilité égale } 13 \text{ s.}$$

$$S2 = 1495.87 - (2049.12 - 2118) - 2560 * 8.5 * 10^{-3}$$

$$S2 = 1544.27 \text{ kg/m}^3; \text{ maniabilité égale } 8 \text{ s.}$$

$$S3 = 1544.27 - (2097.52 - 2095)$$

$$S3 = 1541.75 \text{ kg/m}^3; \text{ maniabilité égale à } 8 \text{ s, [Sablocrète].}$$

Les compositions réalisées sont données dans le tableau 4.10:

Tableau 4.10 Composition et caractéristiques de la formulation de base de (BSD PC) pour 1 m^3 .

Compositions	BSDPC0%	BSDPC1%	BSDPC2%	BSD PC3%	BSD PC 4%	BSD PC5%
Constituants (Kg/m ³)						
Ciment	350	350	350	350	350	350
Adjuvant	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
Sable de dunes	1541.7	1526.3	1510.91	1495.5	1480.08	1464.66
Poudre de caoutchouc (g)	0	15.41	30.82	46.25	61.66	77.07
Eau	241.5	241.5	241.5	241.5	241.5	241.5

4.3. Essais effectués

4.3.1. Etat frais

a l'état frais nous avons fait l'essai d'ouvrabilité et l'essais de masse volumique réelle ;

4.3.1.1. Essai d'ouvrabilité

Cet essai est réalisé à l'aide d'un cône d'Abrams conformément à la norme NF EN 12350-2.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement comme montré sur la figure 4.7.

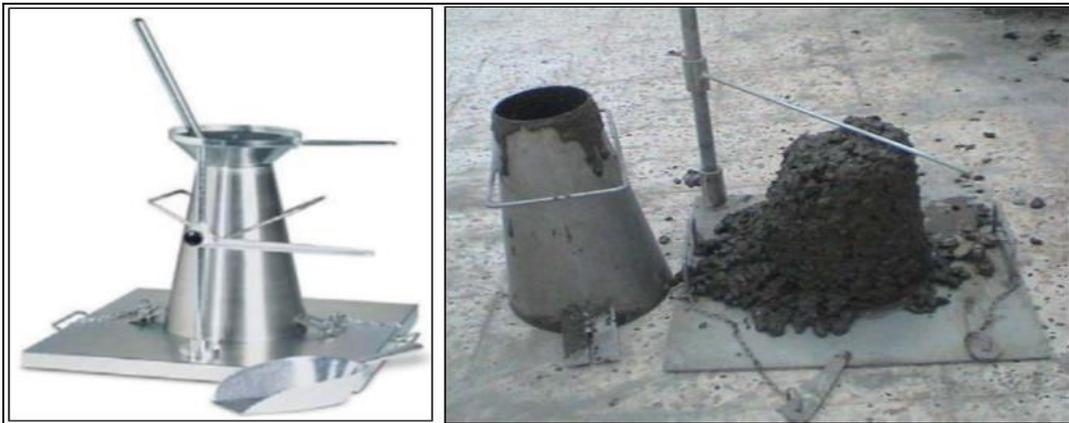


Figure 4.7 Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

4.3.1.2. Essais de masse volumique réelle

La masse volumique réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'une moule de volume V et de masse M_e , puis en remplissant cette dernière avec le béton et on mesure la masse totale soit M_r , puis on calcule la masse volumique avec la formule suivante :

$$\rho_{\text{b frais}} = \frac{(M_r - M_e)}{V} \quad (4.3)$$

Avec :

- ✓ M_r : Masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle).
- ✓ M_e : Masse du récipient vide.
- ✓ ρ : Masse volumique du béton frais
- ✓ V : Volume de l'éprouvette.

4.3.1.3. Conservation des éprouvettes

Après le coulage des mélanges de béton, un échantillon a été mis dans des moules puis arasé et protégé par un film plastique pour éviter toute évaporation de l'eau. La figure 4.8, présente le mode de conservation des éprouvettes.



Figure 4.8 Conservation des éprouvettes.

Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après puis stockées dans un bac rempli d'eau à une température moyenne de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à l'échéance de l'essai.

4.3.2. Etat durci

4.3.2.1. Essais de la résistance à la compression

La qualité du béton à l'état durci est jugée généralement par le résultat de l'essai de la résistance à la compression. En principe, cette propriété dépend directement de la composition de la pâte de ciment. Dans cette étude, la résistance à la compression est déterminée conformément à la norme NF EN 12390-3.

Le nombre total d'éprouvettes de béton ordinaire pour la première série d'essais est de 42 éprouvettes de dimensions $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$. Pour la deuxième série (béton de sable de dune), les résistances à la compression sont obtenues par l'écrasement des éprouvettes cubiques de dimensions $(4 \times 4 \times 4) \text{ cm}^3$ obtenus par découpage à la tronçonneuse des prismes $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$. Les deux séries sont examinées à l'âge de 7, 28 et 90 jours.

Les essais de résistance à la compression du béton, ont été effectués à l'aide d'une presse de capacité de 3000 kN, et à une vitesse de chargement de 0.5 kN/s.

L'éprouvette doit être placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture.

Le résultat de la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai correspond à la résistance caractéristique à la compression du béton étudié. La figure 4.9 présente la procédure de l'écrasement.

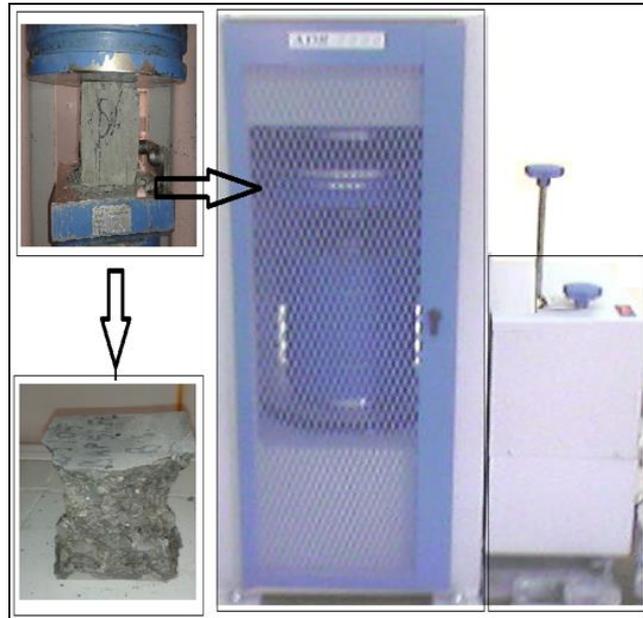


Figure 4.9 Procédure de l'écrasement (essai de compression).

4.3.2.2. Essais de la résistance à la traction par flexion

C'est un essai destructif réalisé sur des éprouvettes prismatiques $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ et $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ selon les normes NF EN 12390-5, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion trois ou quatre points de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité de 3000 kN (Figure 4.10). La résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2a^3} \quad (4.4)$$

On affecte un coefficient de 0.6 aux valeurs trouvées pour tenir compte de la plastification du béton en on déduit les résistances à la traction (σ_t) :

$$\sigma_t = 1.8 \frac{FL}{2a^3} \quad (4.5)$$

Où :

- ✓ σ_t : résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré (MPa);
- ✓ a : côté de la section carrée du prisme, en millimètres ;
- ✓ F : charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

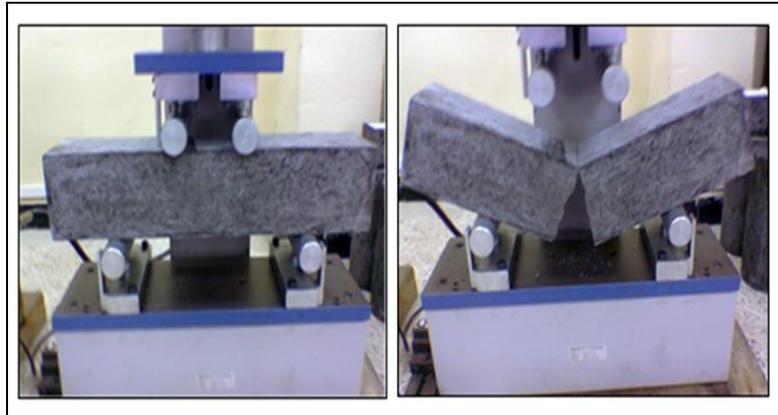


Figure 4.10 Essai de traction par flexion.

4.3.2.3. Essais de mesure du module d'élasticité

Le module d'élasticité des compositions optimales à 28 jours est déterminé selon la norme ASTM C-469 à l'aide de quatre éprouvettes cubiques de dimensions (15x15x15) cm³ soumis à une compression axiale (Figure 4.11). Il a été mesuré par un extensomètre qui permet d'estimer les déformations longitudinales et transversales, ainsi que celle du module d'élasticité (module de Young). Afin de garantir la fiabilité des résultats, les surfaces sur lesquelles s'applique la charge doivent être planes et parallèles.

Le procédé de surfaçage

Pour avoir une bonne zone de contact du plateau exerçant la force de compression sur les cylindres, on a appliqué une couche de soufre sur les deux parties de l'éprouvette selon la norme NF EN 12390-3.



Figure 4. 11 Dispositif de mesure du module d'élasticité.

4.4. Conclusion

La formulation d'un béton, nécessite une étude de choix de ses constituants (sable, gravier, ciment, adjuvants...), et l'optimisation des paramètres influant sur la formulation du béton. Des essais à l'état frais ont été définis, tels les essais d'ouvrabilité et de masse volumique, et à l'état durci comme la résistance à la compression et à la traction et la détermination du module d'élasticité.

CHAPITRE V :
RÉSULTATS ET
DISCUSSIONS.

CHAPITRE V

RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter et d'analyser les données expérimentales acquises au cours de plusieurs séries d'expériences sur le béton ordinaire et le béton de sable de dune modifié par de la poudrette de caoutchouc, tant à sur l'état frais que durci.

Les expériences sur le béton ordinaire ont été menées d'abord pour déterminer les pourcentages les plus élevés de poudre de caoutchouc par substitution de sable naturel qui peuvent être mélangés en gardant les propriétés fondamentales (résistance et maniabilité) du béton ordinaire. La deuxième étape concerne la recherche de béton de sable de dunes.

L'influence des particules de caoutchouc sur l'ouvrabilité du béton, ainsi que sur les propriétés mécaniques du béton sable de dunes, a été présentée et évaluée en utilisant la même approche que pour le béton ordinaire.

5.2. Béton ordinaire

5.2.1. Essais sur béton frais

Un essai d'affaissement et des mesures de masse volumique ont été effectués sur chaque mélange de béton,

Notons : **BO PC** : Béton ordinaire modifié à la poudrette de caoutchouc.

5.2.1.1. Affaissement au cône d'Abrams

Pour chaque formulation du béton, nous avons mesuré l'affaissement du béton au cône d'Abrams. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 5.1.

Nous remarquons que l'affaissement mesuré augmente avec l'augmentation du pourcentage de poudrette de caoutchouc. L'échantillon de béton témoin et 1 % de sable remplacé par la poudrette de caoutchouc avaient presque la même valeur de l'affaissement avec l'ajout d'adjuvant. On peut observer une augmentation de l'affaissement à partir du béton contenant 2% de la poudrette de caoutchouc. Les résultats obtenus pour l'échantillon de béton témoin et les échantillons de béton avec 2, 3, 4 et 5% du poudrette de caoutchouc

étaient dans les limites spécifiées, car tous les résultats de l'affaissement variaient entre 6 et 9cm. Ils se situent dans la plage spécifiée par la norme NF EN 12350-2 (2019). Ceci est dû à la finesse de la poudrette de caoutchouc qui est moins fine que le sable naturel substitué. En plus, ces poudrettes n'absorbent que peu d'eau par rapport au sable. Ce constat a été avancé dans les travaux des chercheurs Aiello et al. (2010). Des résultats similaires ont été également trouvés par Raghavan et Huynh (1998) où l'affaissement est similaire ou supérieur au béton témoin avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc.

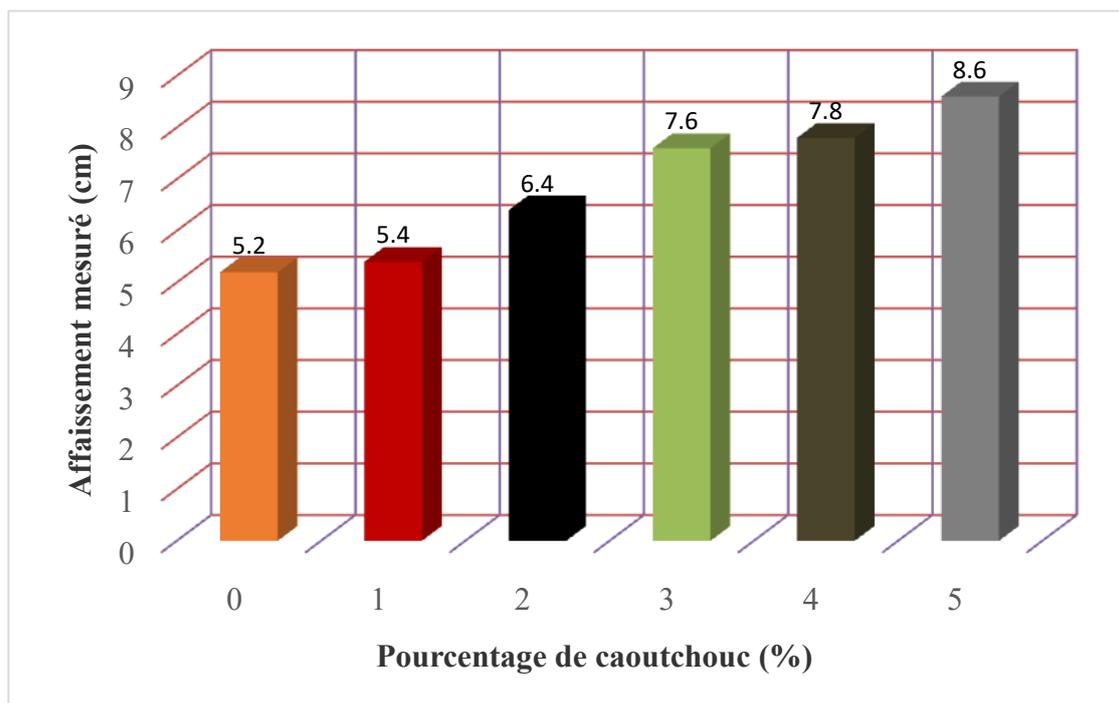


Figure. 5.1 Courbe comparative des affaissements mesurés pour le béton ordinaire modifié.

5.2.1.2. La masse volumique

La figure 5.2 illustre la variation de la masse volumique à l'état frais du béton pour les différentes séries. Le béton caoutchouté de référence a donné une valeur de la masse volumique à l'état frais du béton de 2,453. Après avoir comparé les résultats, on peut constater que la masse volumique du mélange augmente continuellement avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc. En effet, la masse volumique passe de 2,453 à 2,419 lorsque le mélange est réalisé avec 0 à 5% de poudrette de caoutchouc. Cette diminution est due à la faible masse volumique des particules de poudrette de caoutchouc par rapport aux granulats naturels. Plusieurs chercheurs ont utilisé cette approche pour expliquer la diminution de la

masse volumique du béton caoutchouteux (Su et al. 2015, Marie et al. 2017, Thomas et al. 2016).

Benazzouk et al. (2007), Turatsinze et Garros (2008), et d'autres ont lié la perte de la masse volumique du béton caoutchouteux à la quantité d'air piégé. Ils affirment que l'air piégé dans la surface rugueuse des particules de poudrette de caoutchouc allège le béton ordinaire. Néanmoins, cette diminution de la masse volumique reste très légère même avec un niveau de remplacement de 5% de poudrette, il a été de 1.38%.

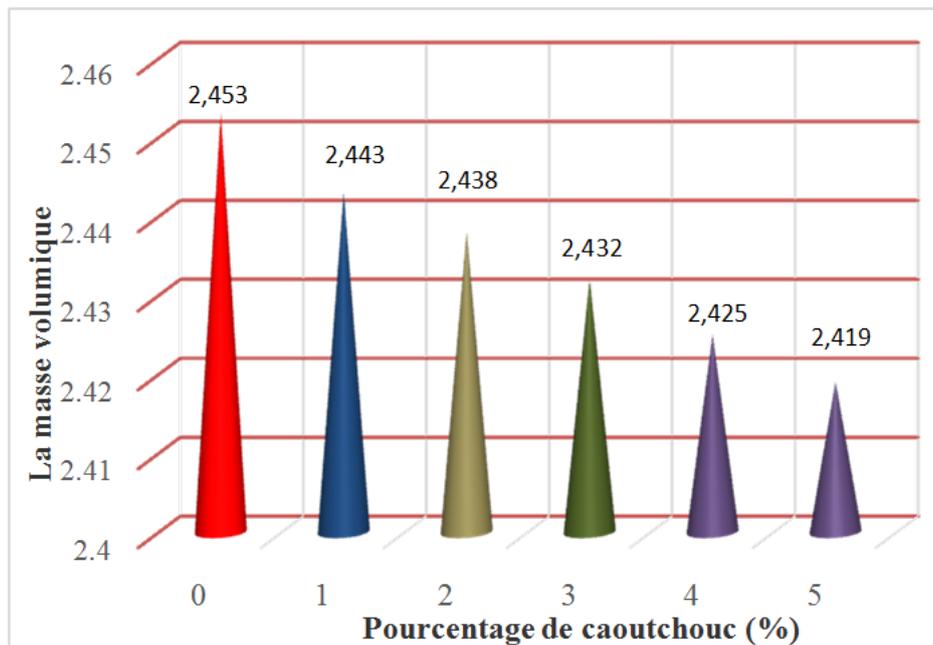


Figure 5.2 Courbe comparative de masse volumique pour le béton ordinaire modifié.

5.2.2. Essais sur béton durci

5.2.2.1. La résistance à la compression

La figure 5.3 présente les résultats de la résistance à la compression des bétons avec les différents pourcentages de la poudrette de caoutchouc à 7, 28 et 90 jours. Cet essai est effectué sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté. L'objectif de l'essai étant de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement du béton contenant le poudrette de caoutchouc en fonction de l'âge et des pourcentages de poudrette de caoutchouc. Une comparaison entre la résistance à la compression du béton à différents pourcentages de poudrette de caoutchouc et la résistance du béton témoin a été faite (0% de poudrette de caoutchouc).

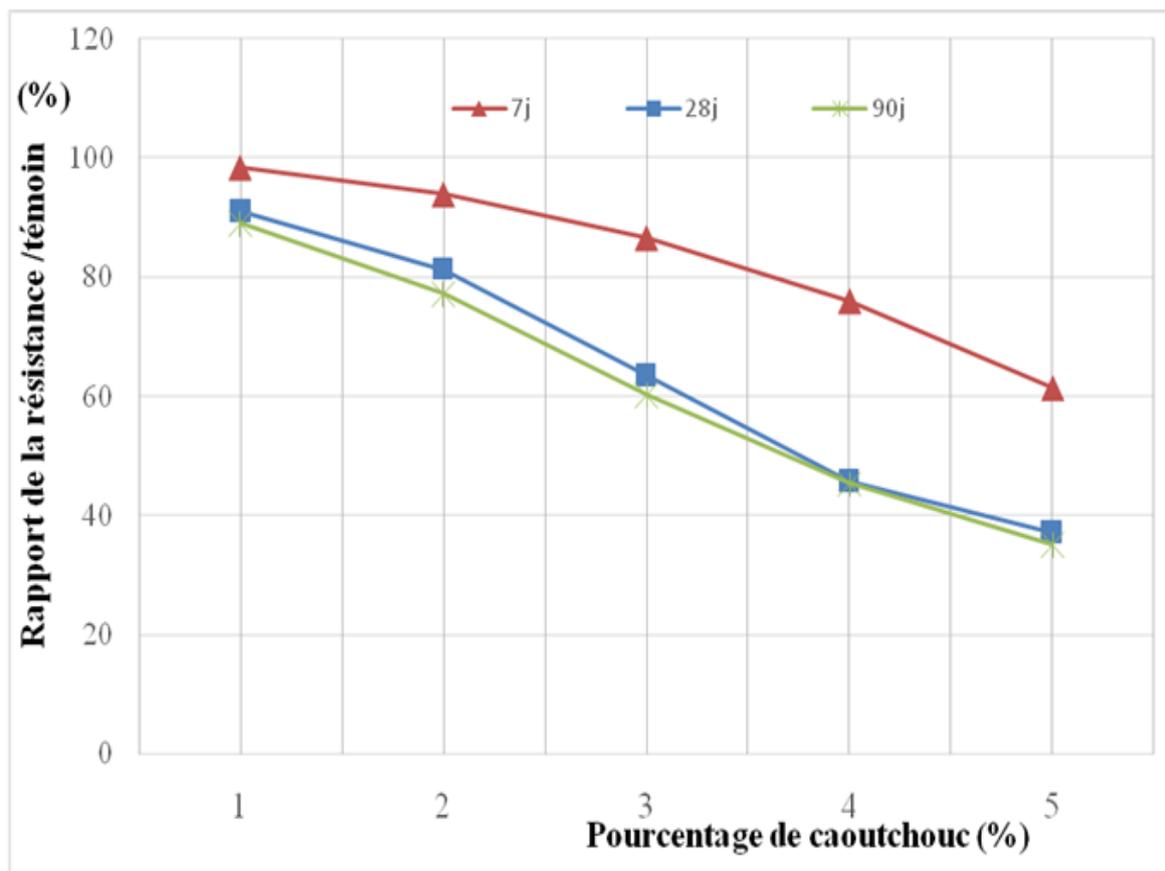


Figure 5.3 Evolution de la résistance à la compression par rapport au témoin en fonction du pourcentage de caoutchouc pour béton ordinaire modifié par de la poudrette de caoutchouc (BOPC).

Selon cette figure, il est remarqué que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de poudrette de caoutchouc incorporé. Des observations similaires ont été constatées par Eldin et Senouci (1993) ainsi que par Hossain et al. (2019). La résistance à la compression à 7 jours des mélanges composés de 1% de la poudrette de caoutchouc est inférieure de 1.63% à celui du béton témoin, mais reste cependant comparable avec le béton sans l'ajout de la poudre de caoutchouc. Ceci indique un effet négligeable sur la résistance à la compression des matériaux cimentaires au jeune âge (7 jours). Cependant, l'ajout de poudre est moins négligeable pour la résistance du béton avec le temps. Ceci serait dû à la mauvaise cohésion inter-granulaire favorisée par les particules de poudrette de caoutchouc. En effet, les réactions d'hydratation sont lentes avec le remplacement de la partie du sable par de la poudre du caoutchouc. La résistance à la compression est inférieure de 11.02% à 28j. Cependant, on remarque une légère évolution de la résistance à la compression au-delà de 28 jours (90 jours).

Pour un pourcentage de 4% de poudrette de caoutchouc incorporé, la résistance à la compression du béton représente près de 45% de la résistance du béton témoin. Nous pouvons admettre que le pourcentage de 3% de poudrette de caoutchouc introduit est un pourcentage intéressant vu que la résistance à la compression est égale à 63% à 28 jours et de 60% à 90 jours de celle du béton témoin. Contrairement aux résultats des travaux effectués par Patel et al. (2020), ils annoncent que l'ajout de 5 à 10% de la poudre de caoutchouc donne une résistance à la compression presque égal à celle du béton normal. Il faut noter que l'utilisation de l'adjuvant permet d'éviter une perte importante de la résistance à la compression [Patel et al. (2020)].

5.2.2.2. La résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion est mesurée sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³. Cet essai a été réalisé à 28 jours. L'objectif de l'essai étant de suivre l'évolution de la résistance du béton à la traction par flexion en fonction des pourcentages de caoutchouc. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 La résistance à la traction par flexion du béton à 28 jours

Pourcentage de caoutchouc (%)		0	1	2	3	4	5
Résistance à la traction par flexion (MPa)	28 jours	1.288	1.093	0.876	0.773	0.458	0.405

La résistance à la traction par flexion du béton à différents pourcentages est comparée par rapport à la résistance du béton témoin (0% de poudrette de caoutchouc), les résultats sont présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2. Pourcentage de la résistance à la traction par rapport au béton témoin.

Pourcentage de poudrette de caoutchouc (%)		1	2	3	4	5
Pourcentage de résistance à la traction par flexion (%)	28 jours	84.86	68.01	60.01	35.56	31.44

La représentation graphique de la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage de poudrette de caoutchouc introduit à 28 jours est indiquée dans la Figure 5.4. Les résistances à la flexion des bétons cimentaires contenant de la poudre de caoutchouc se comportent de la même manière que les résistances à la compression (Topçu 2015, Hossain et al. 2019). Dans une étude, Eldin, et al. (2013) ont constaté que le remplacement de la poudre de caoutchouc dans le mélange entraînait une baisse de la résistance à la flexion des bétons modifiés. Cette baisse est proportionnelle à la quantité de poudre de caoutchouc dans le mélange. Néanmoins, cette diminution est plus importante dans le cas de la traction par flexion, notamment avec 4 et 5% de la substitution du sable naturel par de la poudrette de caoutchouc. En effet, l'incorporation de 4% de poudrette de caoutchouc donne une valeur de 35% de la résistance du béton témoin. Ceci est dû au manque de cohésion inter-granulaire provoquée par les particules de caoutchouc. Par contre, avec 5% de substitution a enregistré une valeur d'environ 31%. Toutefois, la résistance en traction et en compression, avec 3% de la substitution du sable par de la poudrette de caoutchouc, diminuent seulement de 40% (28 jours) de celui du béton témoin.

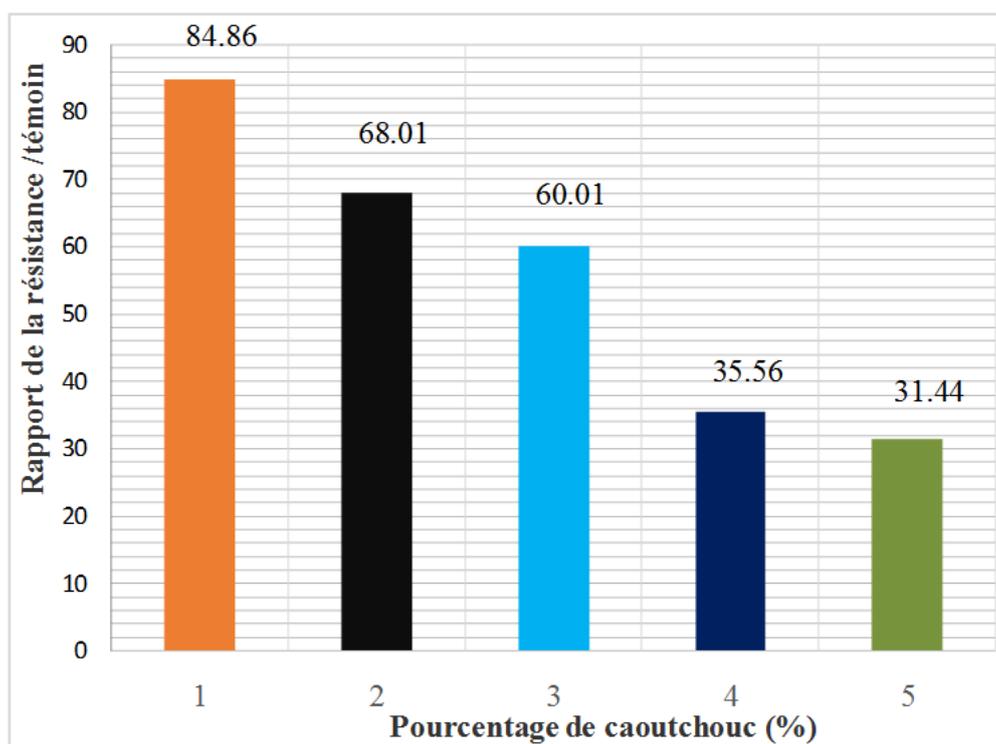


Figure 5.4. Evolution de la résistance à la traction par flexion par rapport au témoin modifié par de la poudrette de caoutchouc (BOPC).

5.2.2.3. La compacité du béton ordinaire modifié

En faisant varier le pourcentage de poudrette de caoutchouc de 0 à 6% par pas de 1%, on remarque que la compacité du béton augmente entre 0 et 1% d'ajout. Les vides intergranulaires des agrégats ont été occupés par les fillers de caoutchouc, ce qui diminue le volume des vides et nous mène à une croissance de la valeur de compacité. Cette augmentation de compacité est peu visible entre 1% et 5%, ceci est dû à la diminution du pourcentage des vides à remplir. Donc on peut parler d'une stabilisation de la compacité au-delà de 1%.

La maniabilité s'améliore lorsque le dosage en poudrette augmente, ceci est justifié par la faible absorption d'eau par les particules de caoutchouc, ce qui conduit à un gain d'une quantité d'eau de gâchage pour les autres constituants de béton, sans variation de rapport (E/C) qui reste fixe (E/C = 0.51).

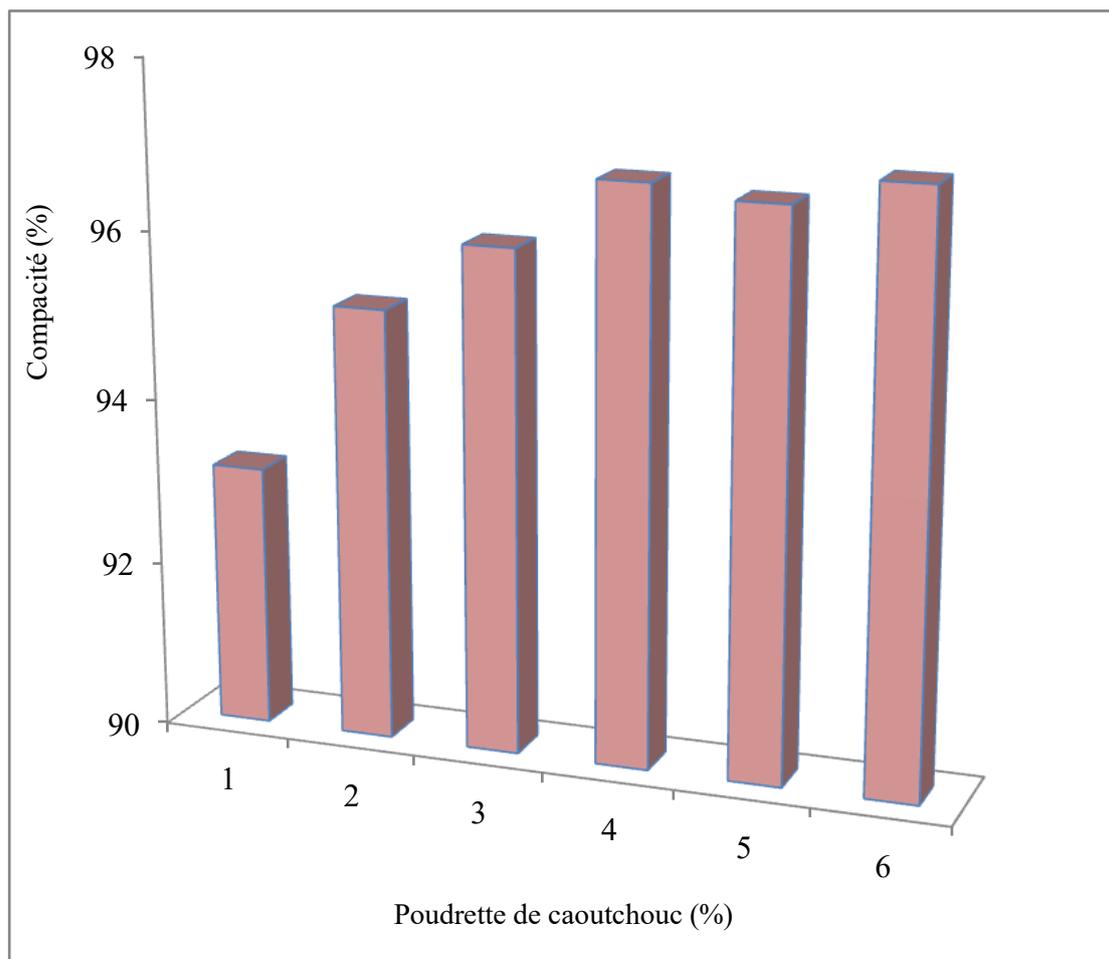


Figure 5.5. Compacité en fonction de dosage de poudrette de caoutchouc (BOPC).

5.3. Béton de sable de dune

La composition témoin serait modifiée par l'ajout de différents pourcentages de la poudre de caoutchouc variant entre 1% et 5% par pas de 1% c.à.d. (1, 2, 3, 4, 5) %, elle sera considérée comme addition.

Notons : BSD PC : Béton de sable de dunes modifié à la poudre de caoutchouc. Pour tirer les caractéristiques principales de BSD PC ,nous avons utilisé pour chaque dosage 6 éprouvettes (4×4×16) cm³, pour la compression et la traction. Le nombre total des éprouvettes pour le béton de sable de dunes à la Première série d'essais est de 36 éprouvettes de (4×4×16) cm³.

5.3.1. Essais sur le béton frais

5.3.1.1. La maniabilité

Lorsque le dosage de poudre est augmentée, la maniabilité s'améliore (figure 5.6). Ceci est dû à la faible absorption d'eau des particules de caoutchouc, ce qui entraîne un gain d'eau pour les autres éléments du béton alors que le rapport (E/C) est supposé constant dès le début (E/C =0,69).

Tableau 5.3: Comparaison des Maniabilités (s).

Compositions	BSD 0 %	BSDPC 1%	BSDPC 2%	BSDPC 3%	BSDPC 4%	BSDPC 5%
Maniabilité (s)	8	7.5	7	6	5.5	5

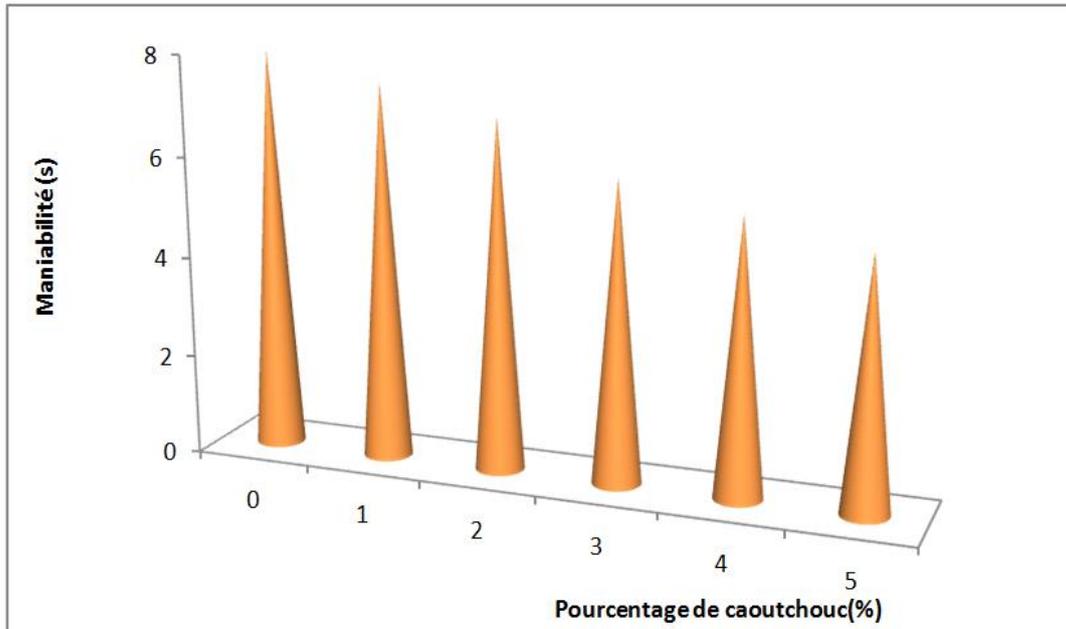


Figure 5.6 : Maniabilité de BSDPC en fonction du pourcentage de poudrette de caoutchouc.

5.3.1.2. La masse volumique

Les masses volumiques absolues sur ces compositions sont données dans le tableau 5.4. La masse volumique diminue avec l'augmentation du pourcentage de la poudrette de caoutchouc. Elle diminue à cause de la légèreté de la poudrette de caoutchouc (figure 5.7). Le béton de sable de dunes et grâce à sa petite granularité est plus léger que les bétons traditionnels. L'ajout de la poudrette de caoutchouc allège davantage les bétons de sable de dunes. Plus la proportion de la poudrette de caoutchouc augmente, plus la masse volumique du composite diminue. Ceci est normal du fait qu'on a introduit des grains de poudrette de caoutchouc de structure poreuse dans une matrice cimentaire plus dense et plus lourde. De plus, nous pouvons aussi remarquer que cette diminution est presque linéaire.

Tableau 5.4 : Caractéristiques des compositions BSDPC.

Caractéristiques	ρ
Compositions	(Kg/m ³)
BSDPC (1%)	1415
BSDPC (2%)	1340
BSDPC (3%)	1280
BSDPC (4%)	1205
BSDPC (5%)	1180

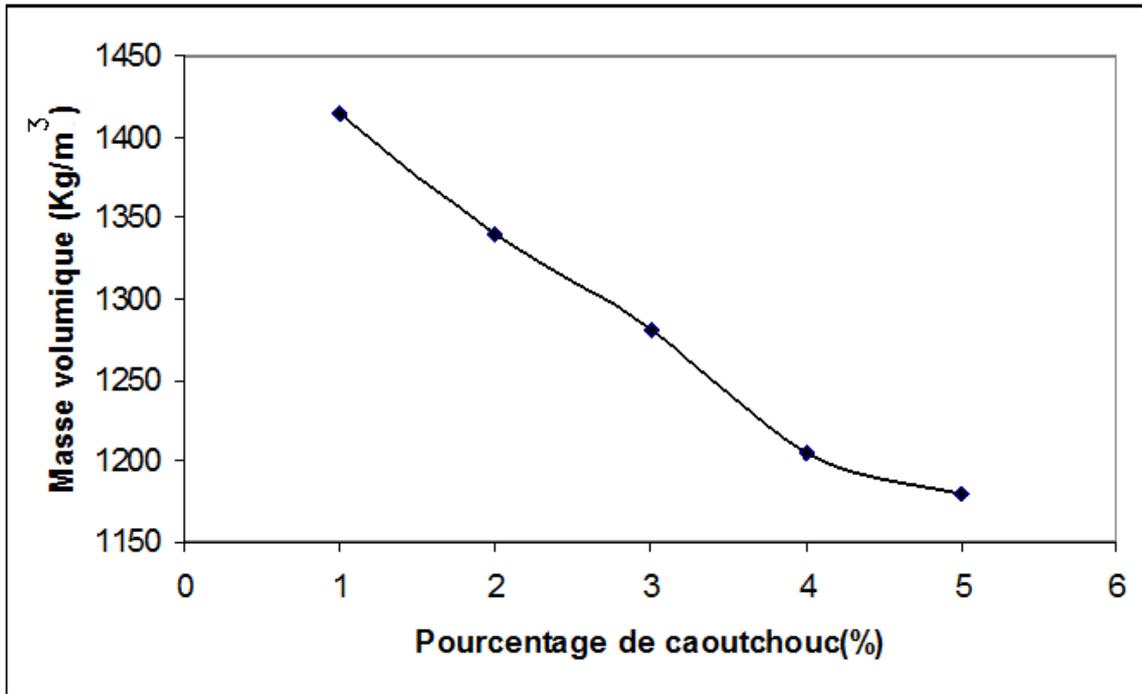


Figure 5.7. Courbe comparative de la masse volumique de BSDPC.

5.3.2. Essais sur le béton durci

5.3.2.1. La résistance à la compression

Tableau 5.5 : La résistance à la compression du béton de sable de dunes à 7, 28 et 90 jours

	Compositions	BSD 0 %	BSD PC 1%	BSD PC 2%	BSD PC 3%	BSD PC 4%	BSD PC 5%
R _c (MPa)	7 jours	10	8.6	6.9	5.29	4.15	4.06
	28 jours	22.6	16	13.2	10.29	8.15	7.65
	90 jours	23.2	16.5	13.71	11.3	9.12	8.7

La résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de poudre de caoutchouc incorporé (tableau 5.5). Pour un pourcentage de 4% de poudre de caoutchouc incorporé la résistance à la compression du béton représente près de 36% de la résistance du béton témoin. De la même façon que le béton ordinaire ceci est dû à la mauvaise cohésion inter-granulaire favorisée par les particules de caoutchouc.

Nous pouvons admettre que le pourcentage de 3% de poudre de caoutchouc introduit est un pourcentage intéressant vu que la résistance à la compression est égale à 45% à 28 jours et de 48% à 90 jours de celle du béton témoin (figure 5.8).

Tableau 5.6. Pourcentage de la résistance à la compression par rapport au béton témoin pour BSDPC.

(% de poudrette de caoutchouc)		BSD PC 1%	BSD PC 2%	BSD PC 3%	BSD PC 4%	BSD PC 5%
Rapport de la résistance / témoin (%)	7 jours	86	69	52.9	41.5	40.6
	28 jours	70.8	58.4	45.53	36.06	33.85
	90 jours	71.12	59.1	48.7	39.1	37.5

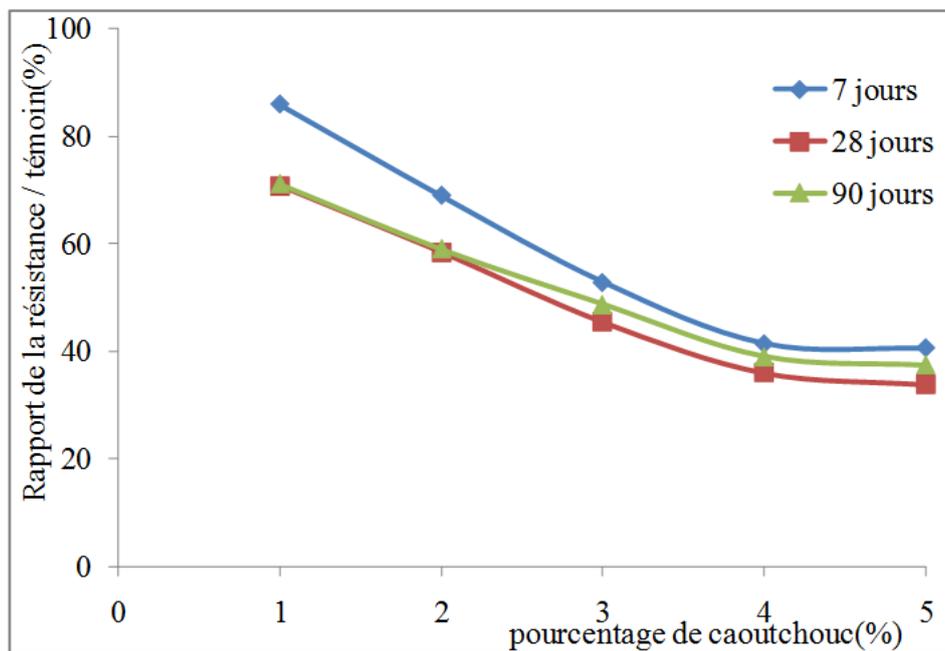


Figure 5.8: Evolution de la résistance à la compression par rapport au témoin en fonction du pourcentage de poudrette de caoutchouc pour BSDPC.

5.3.2.2. La résistance à la traction

La résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du pourcentage de la poudrette de caoutchouc. Pour un pourcentage de 4% de la poudrette de caoutchouc la résistance à la traction par flexion du béton a une valeur de 43% de la résistance du béton témoin.

De la même façon que le béton ordinaire ceci est dû à la mauvaise cohésion inter-granulaire favorisée par les particules de caoutchouc.

Par les données obtenues dans le tableau 5.7 nous pouvons admettre que le pourcentage de 3% de la poudrette de caoutchouc introduit est un pourcentage intéressant vu que la résistance à la traction par flexion atteint un taux de 54 % à 28 jours de celle du béton témoin.

Tableau 5.7 : La résistance à la traction par flexion du béton de sable de dunes modifié

Compositions	BSD PC 0%	BSD PC 1%	BSD PC 2%	BSD PC 3%	BSD PC 4%	BSD PC 5%
R _t 28 j (MPa)	2.87	1.83	1.7	1.57	1.25	1.13

Tableau 5.8 : Pourcentage de la résistance à la traction par flexion par rapport Au béton témoin pour BSDPC.

Pourcentage de poudrette de caoutchouc (%)	0	1	2	3	4	5
Rapport de la R _t /témoin (%)	100	63.76	59.23	54.7	43.55	39.73

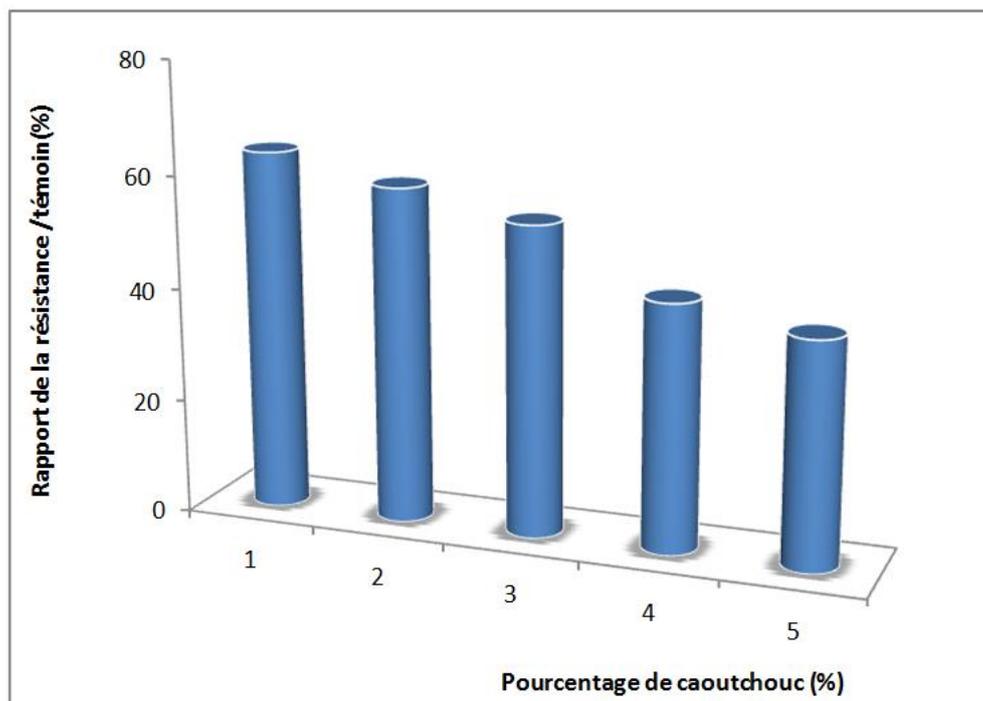


Figure 5.9: Evolution de la résistance à la traction par flexion par rapport au témoin en Fonction du pourcentage de poudrette de caoutchouc pour BSDPC.

5.3.2.3. La compacité

Par incréments de 1%, la compacité du béton augmente entre 0% et 1% d'ajout (figure 5.10). Les fillers de caoutchouc ont occupé les vides inter-granulaires du sable de dune, réduisant le volume des vides et augmentant la compacité. Entre 1% et 4%, l'amélioration de la compacité est à peine perceptible en raison d'une réduction du pourcentage de vides à combler. En conséquence, on peut parler d'une stabilisation de la compacité au-delà de 1%.

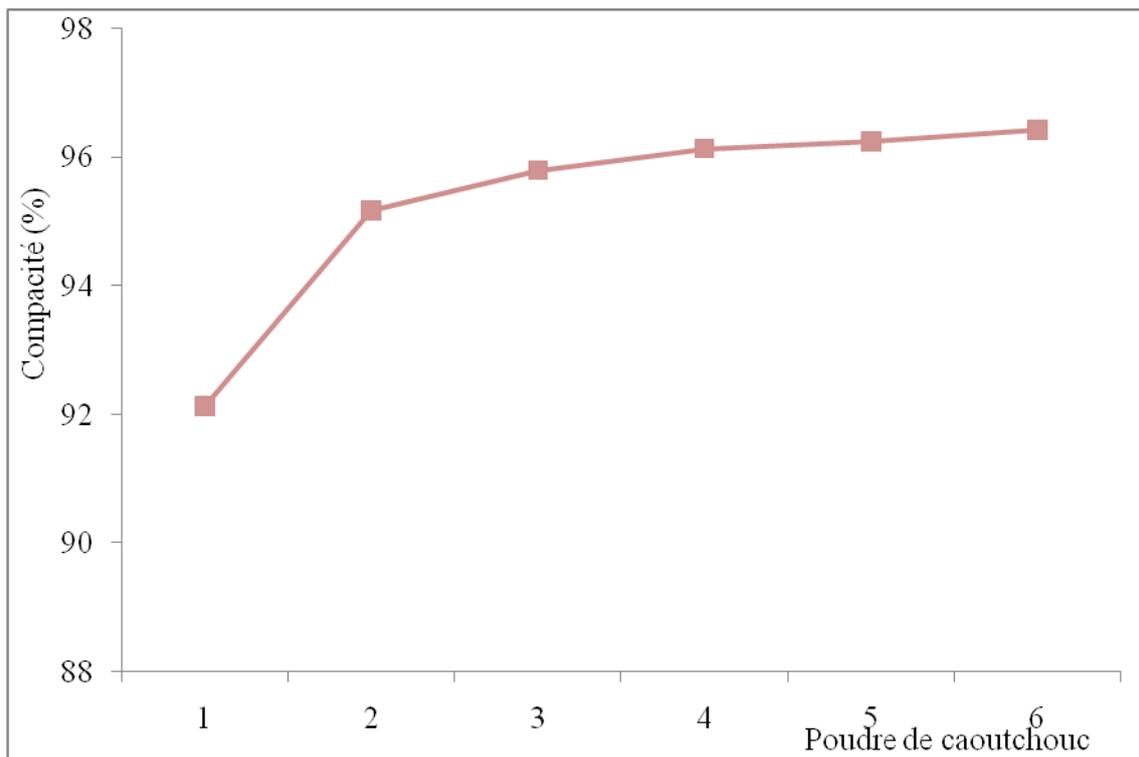


Figure 5.10 : Compacité en fonction de dosage de poudre de caoutchouc (BSD PC).

Comme le béton ordinaire, l'analyse des résultats des essais de résistance à la compression et à la traction par flexion pour le béton de sable de dunes, nous pouvons conclure que le taux de 3% de la poudre de caoutchouc introduit constitue un pourcentage intéressant. C'est donc **l'optimal**.

5.4. Comparaison entre le béton ordinaire et le béton de sable

5.4.1. Affaissement

Les résultats des essais montrent que l'influence de l'ajout de poudre de caoutchouc à l'effet sur l'ouvrabilité. En effet, l'ouvrabilité augmente avec l'augmentation de taux de

poudrette.

5.4.2. La masse volumique

Les valeurs de masse volumique du béton mesurées pour les deux types de béton BOPC et BSDPC avec différentes teneurs en caoutchouc sont présentées dans la figure 5. 11.

Les résultats indiquent que la masse volumique du béton est inversement proportionnelle à la teneur en poudrette de caoutchouc. Cela peut s'expliquer par le fait que la masse volumique du poudrette de caoutchouc ($0,54 \text{ t/m}^3$) est considérablement plus faible que celle du sable naturel ou sable de dune ($2,56 \text{ t/m}^3$).

En raison de sa texture fine, le béton de sable de dunes est plus léger que les bétons ordinaires. Plus la teneur en poudrette de caoutchouc est élevée, plus la masse volumique du béton est faible. L'ajout de poudrette de caoutchouc allège fortement le BSDPC par rapport au l'BOPC. Ceci est à interpréter par la grande quantité de sable incorporée dans le BSDPC par rapport à l'BOPC. Sachant que le pourcentage de poudrette de caoutchouc est en fonction de la quantité de sable, par exemple, pour 3% de poudrette de caoutchouc, les quantités de sable réduites pour l'BOPC et le BSDPC sont respectivement de 47 kg et 16 kg pour 1m^3 de béton, soit environ un tiers ($1/3$). De plus, on peut noter que la masse volumique diminue de manière quasi-linéaire.

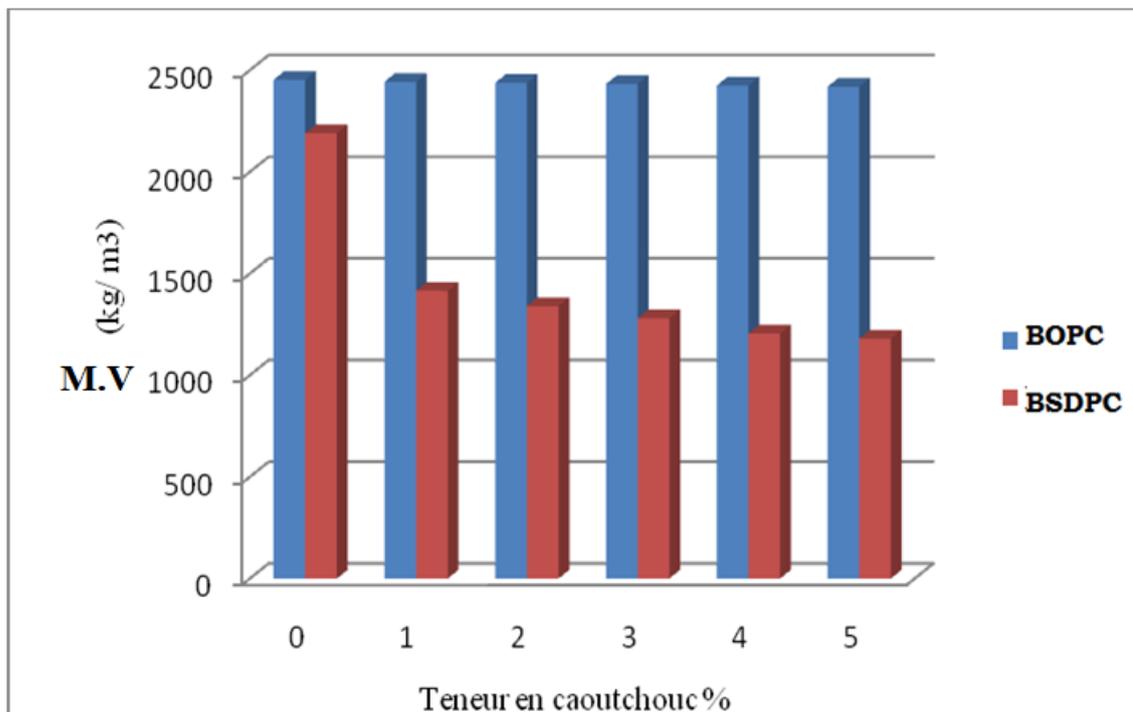


Figure. 5.11 : La masse volumique de béton BOPC et BSDPC.

5.4.3. La compacité

La figure 5.12 montre la compacité relative de l'BOPC et du BSDPC avec différentes teneurs en poudre de caoutchouc. On constate que la compacité relative du béton BOPC augmente de 0 à 1%. Les interstices intergranulaires des granulats sont progressivement occupés par les charges de poudre de caoutchouc ; le volume a été réduit, ce qui augmente légèrement le réarrangement entre 1% et 5% et la plupart des interstices sont déjà remplis. On peut donc dire que la compacité relative se stabilise au-dessus de 1%. La compacité est améliorée lorsque la teneur en poudre de caoutchouc est augmentée. Ceci est dû à la faible adsorption de l'eau par les particules de poudre de caoutchouc, ce qui permet d'économiser une certaine quantité d'eau de gâchage pour les autres constituants du béton sans modifier le rapport eau / ciment ($E / C = 0,51$).

En augmentant progressivement la teneur en poudre de caoutchouc de 0 à 5% par paliers de 1%, on constate que la compacité relative du béton BSDPC augmente de manière significative au stade de 1%. Les interstices entre les granulats ont été occupés par les charges de poudre de caoutchouc, ce qui diminue le volume des interstices et augmente la compacité relative de manière légèrement perceptible entre 1% et 4%, car la plupart des interstices étaient déjà remplis. Ainsi, on peut dire que la compacité relative se stabilise au-dessus de la teneur en poudre de caoutchouc de 1%.

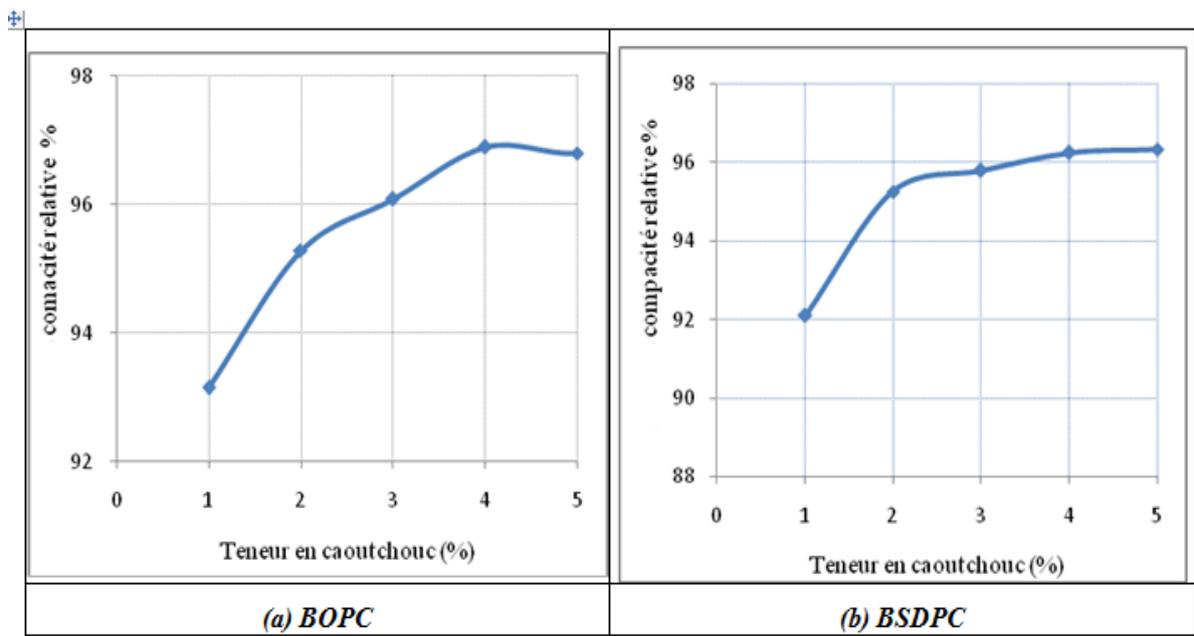


Figure. 5.12. Compacité relatif BOPC et BSDPC en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc

5.4.4. Résistance à la compression

À cette étape de la mesure, la résistance à la compression de l'BOPC et du BSDPC a été déterminée conformément à la norme EN 12390-3, en utilisant une presse hydraulique d'une capacité de 2000 kN avec un taux de charge appliqué de 0,5 MPa/s.

Les valeurs moyennes de trois spécimens cubiques à trois âges différents, 7, 28 et 90 jours, ont été enregistrées. Les résultats des essais de résistance à la compression réalisés sur les mélanges BOPC et BSDPC étudiés sont donnés dans la Figure 5.13.

D'après cette figure, la résistance à la compression est inversement proportionnelle à la teneur en poudre de caoutchouc ; plus la proportion de poudre de caoutchouc augmente, plus la résistance à la compression diminue. Pour une teneur en poudre de caoutchouc de 4%, la résistance à la compression des bétons BOPC et BSDPC représente respectivement 45% et 39% par rapport à la résistance du béton du pilote. Ceci est dû à la faible cohésion intergranulaire favorisée par les particules de poudre de caoutchouc. Pour la teneur en poudre de caoutchouc de 3%, la résistance à la compression obtenue représente un pourcentage significatif de 63% à 28 jours et 60% à 90 jours de la résistance du béton pour l'BOPC et 46% à 28 jours et 49% à 90 jours de la résistance du béton pour le BSDPC.

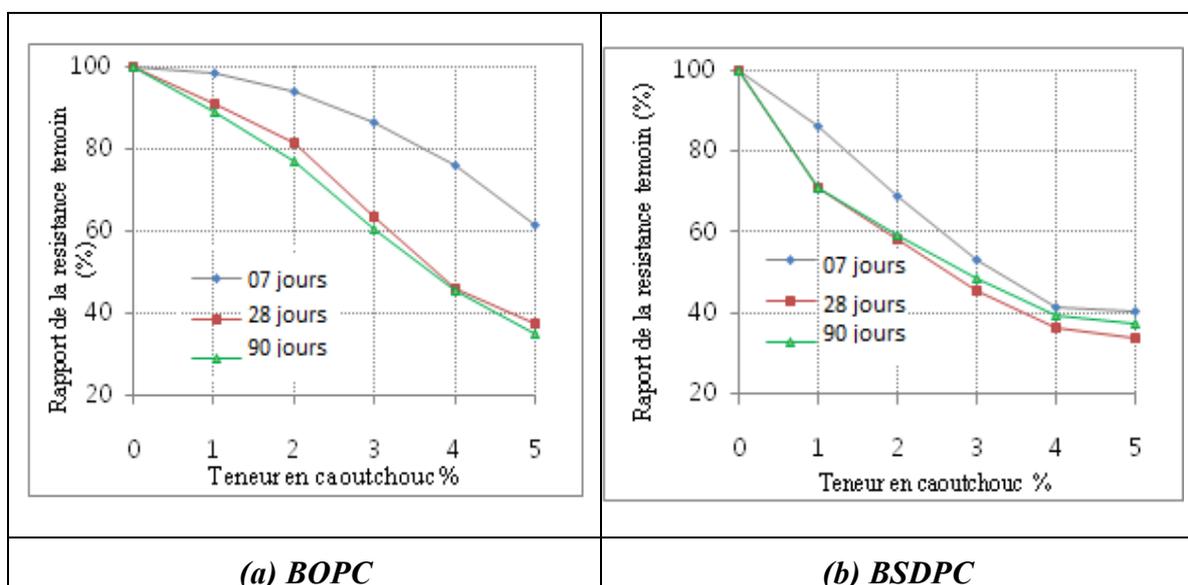


Figure. 5.13 : Rapport de la résistance à la compression par rapport à la résistance à la compression du témoin en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc

5.4.5. Traction par flexion

La figure 5.14 montre les rapports entre la résistance de traction des bétons BOPC et BSDPC et la résistance de traction du béton pilote en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc. On peut voir sur cette figure que la résistance de traction par flexion est inversement proportionnelle à la teneur en poudre de caoutchouc.

Par exemple, pour une teneur en poudre de caoutchouc de 4%, la résistance représente, respectivement, 35% et 43% de l'BOPC et du BSDPC du béton témoin. Ceci est dû à la faible cohésion intergranulaire favorisée par les particules de poudre de caoutchouc. Alors que pour une teneur en poudre de caoutchouc de 3%, la résistance en traction par flexion représente un pourcentage intéressant de 60% et 54%, respectivement, pour l'BOPC et le BSDPC de la résistance du béton témoin.

Les résultats de l'analyse des essais de résistance à la compression et à la flexion permettent de conclure que la teneur de 3% de poudre de caoutchouc introduit est un pourcentage intéressant. Ce taux de 3% peut être considéré comme un taux optimal.

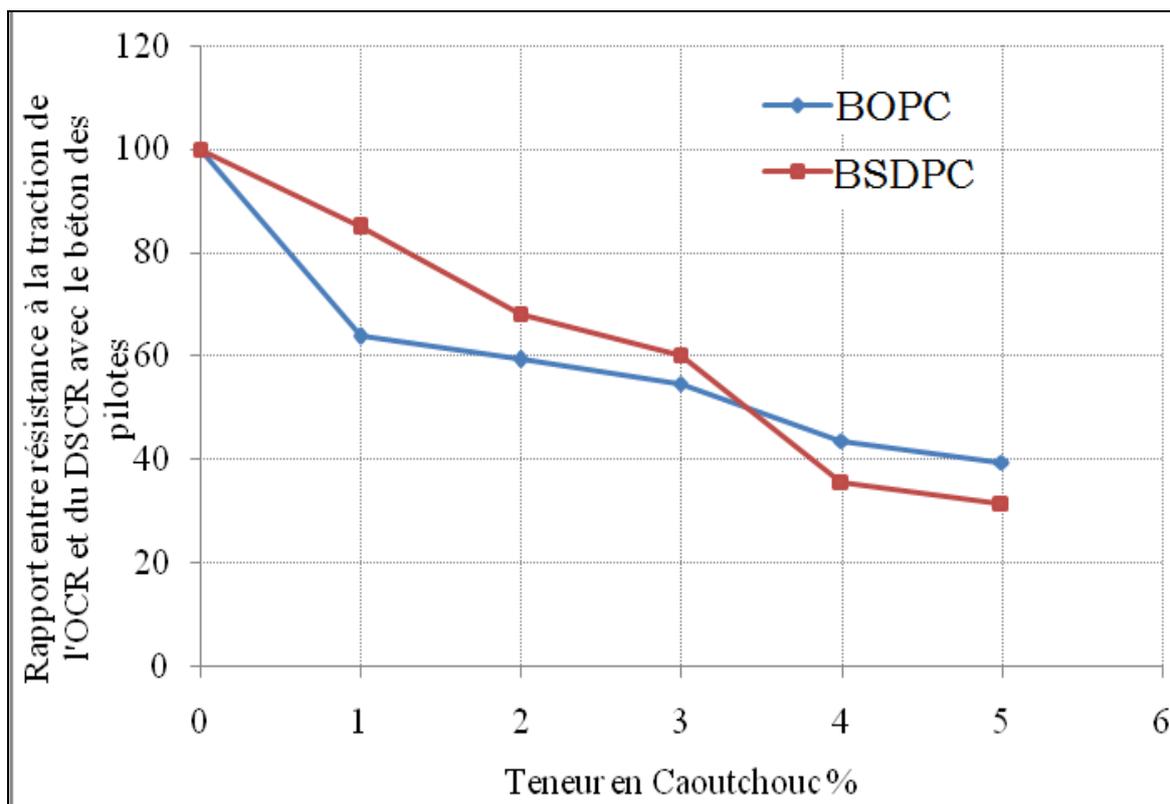


Figure. 5.14 : Rapport entre la résistance de traction de l'BOPC et du BSDPC avec le béton de pilotes selon la teneur en poudre de caoutchouc.

5.5. Comportement du béton en compression

5.5.1. Courbes Contraintes -déformations

Les courbes obtenues pour un béton de sable de dunes et un béton ordinaire modifiés pour la teneur en poudrette de caoutchouc optimum de 3%, sont données dans les figures 5.15 et figure. 5.16.

La courbe contraintes-déformation longitudinale n'est pas linéaire, elle comporte trois (03) phases (pour les deux bétons) :

- **1ère phase** : Un comportement élastique quasi-linéaire du béton. Pour le béton de sable de dunes modifié, cette phase s'étend jusqu'à une déformation élastique $\epsilon_{el}=0,42 \text{ ‰}$ qui correspond à $\sigma = 5 \text{ MPa}$ (55% de la contrainte uni-axiale) alors que pour le béton ordinaire modifié elle ne dépasse pas une déformation $\epsilon_{el}=0,38 \text{ ‰}$. La pente à l'origine de cette courbe (droite) est le module de déformation longitudinale à l'origine. (Loi de Hooke $\sigma = E * \epsilon$)

$$E_{b0} = \text{tg}\alpha_0 = \text{Cste.}$$

- **2ème phase** : Cette phase est caractérisée par une allure parabolique sur la courbe contraintes-déformation longitudinale jusqu'à un seuil correspondant à la contrainte maximale de chaque échantillon. Le béton a un comportement plastique où on observe le développement de la microfissuration jusqu'à la rupture, dans ce cas on définit le module d'élasticité sécant ; pentes des droites joignant l'origine à un point donné de l'allure parabolique.
- **3ème phase** : Caractérisée par une fissuration généralisée, propagation de la rupture et développement des surfaces de fractures. La déformation augmente en même temps que la contrainte de rupture diminue. On observe ce phénomène sur la courbe contraintes-déformation longitudinale des deux échantillons pour le béton ordinaire et le béton de sable de dunes modifiés, par une branche descendante. La pente descendante de cette branche montre le caractère fragile plus ou moins accentué du béton. Le béton de sable de dunes modifié est moins fragile puisque cette pente est quasi-horizontale alors qu'elle est quasi-verticale pour le béton ordinaire ce qui traduit sa fragilité.

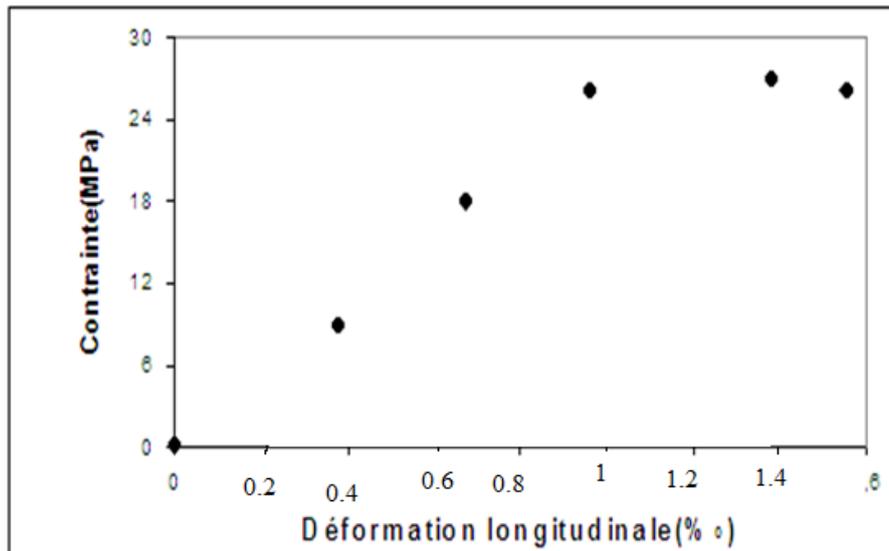


Figure 5.15. Courbe contrainte-déformation du Béton Ordinaire modifié avec PC 3%.

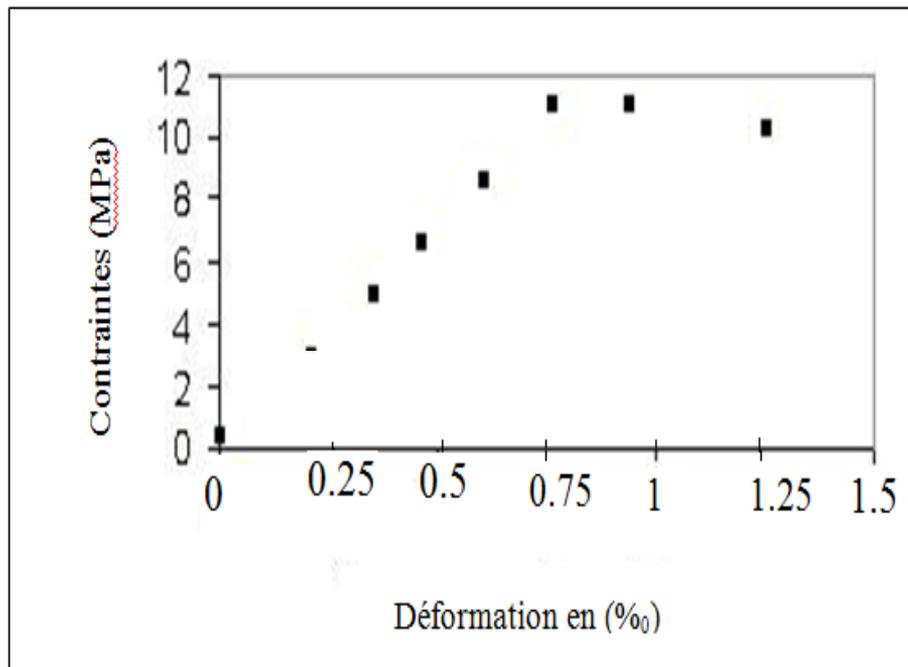


Figure. 5.16. Courbe contrainte-déformation du Béton de sable de dunes modifié avec PC 3%

5.5.2. Valeurs des modules d'élasticité tangents à l'origine

Le module de déformation longitudinale à l'origine est donné par la tangente de la courbe contrainte déformation longitudinale, Ce module présente une grande utilité, On peut déterminer un module tangent en tout point de la courbe contrainte-déformation, mais ce module ne s'applique qu'à de très petites variations de la charge aux alentours du point considéré.

Pour un intérêt pratique, on détermine le module d'élasticité sécant. On peut se contenter de la courbe contrainte-déformation longitudinale puisqu'on n'a pas besoin de la branche descendante de cette courbe, le module d'élasticité tangent à l'origine :

- ◆ Pour le béton ordinaire modifié BO DPC 3% : $E = 23342\text{MPa}$.
- ◆ Pour le béton de sable de dunes modifié BSD DPC 3%: $E = 12748\text{MPa}$.

La valeur du module d'élasticité du béton de sable de dunes est faible par rapport à celle du béton ordinaire.

Un béton de sable de dunes ayant une résistance à la compression entre 24 et 30 MPa a également un module d'élasticité égal à 20 000 MPa à 28 jours [12] alors que pour des bétons classiques ce module varie de 20 à 50 GPa (selon la composition du béton).

En augmentant le diamètre des plus gros grains , on obtient une amélioration du module d'élasticité.

Sur la base des mesures faites, on remarque bien que le module élastique du béton de sable de dunes est de l'ordre de 54% par rapport à celui du béton ordinaire.

L'objectif de cette partie est d'étudier la relation entre le module d'élasticité et la résistance caractéristique du béton et de tracer les courbes contrainte-déformation dans le cas du Béton Ordinaire Modifié par la Poudrette de caoutchouc (BOPC) et du Béton de Sable de Dunes modifié par la Poudrette de caoutchouc (DSRC).

Pour la quantification du module d'élasticité, divers codes de construction suggèrent une relation à la puissance 1/3 de la résistance à la rupture du béton. Les règles BAEL 91 sont applicables aux bétons de sable de dunes uniquement lorsque la teneur en ciment portland artificiel est supérieure à 300 kg/m^3 .

Des éprouvettes cubiques de dimensions $(150 \times 150 \times 150)\text{ mm}^3$ sont utilisées pour les compositions optimales. Ces éprouvettes ont ensuite été soumises à des essais d'extensométrie, permettant la détermination des déformations longitudinales et transversales ainsi que du module d'élasticité (module de Young).

Les bétons de sable de dunes sont plus déformables que les bétons ordinaires. Le module de déformation instantanée peut être estimé à l'aide de la formule (Bobinski , J. Tejchman 2007) :

Pour le béton de sable de dune :

$$E_{id} = 8100 x f_{cd}^{1/3} \quad (1)$$

Pour un béton ordinaire :

$$E_{id} = 11000 x f_{cd}^{1/3} \quad (2)$$

Où "d" est l'âge du béton par jour.

Le module de déformation différée peut être déduit par la formule :

$$E_{vd} = \frac{1}{3} E_{id} = 2700 x f_{cd}^{1/3} \quad (3)$$

Avec : E_{id} : Module d'élasticité instantanée,

E_{vd} : Module d'élasticité retardée,

f_{cd} : Résistance à la compression à J jours.

Dans la présente étude, les déformations relatives ont été mesurées sous charge afin d'évaluer le comportement sous de faibles contraintes/ déformations. Pour cela, on a utilisé des éprouvettes équipées de jauges électriques à fil qui mesurent les déformations dans deux directions (longitudinale et transversale).

Ces essais ont consisté à appliquer une charge de compression incrémentale de 20 kN à une vitesse moyenne de 15 kN/s. Pour chaque incrément de charge, les déformations longitudinales et transversales ont été mesurées. Pour chaque incrément de charge, les déformations longitudinales et transversales sont enregistrées. Les essais ont été réalisés sur des mélanges BSDPC 3% et BOPC 3%.

5.6. Modélisation numérique

Sur la base du comportement du béton ordinaire modifié et du béton de sable de dunes modifié, déterminé expérimentalement, les deux types de béton peuvent être modélisés. L'analyse numérique est principalement basée sur le béton ordinaire (BOPC 3%) et le sable des dunes (BSDPC 3%).

Le modèle numérique est une éprouvette prismatique (150 x 150 x 150) mm³, soumise à une contrainte de compression allant de 0 à 30 MPa. Selon l'analyse expérimentale, le module d'élasticité de l'BOPC 3% est $E_1 = 23342$ MPa et celui du BSDPC 3%, $E_2 = 12748$ MPa, le coefficient de Poisson (ν) est pris égal à 0,2.

Le modèle numérique de l'éprouvette est discrétisé par éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS. La figure 5.17 représente la discrétisation du modèle numérique analysé.

En faisant varier la contrainte de compression appliquée à l'éprouvette d'BOPC 3%, dont le module d'élasticité (E_1) et le coefficient de poisson (ν) sont respectivement égaux à 23342 MPa et 0,2. Les cartes des figures 5.18 suivantes représentent la déformation de distribution longitudinale générée par la contrainte de compression.

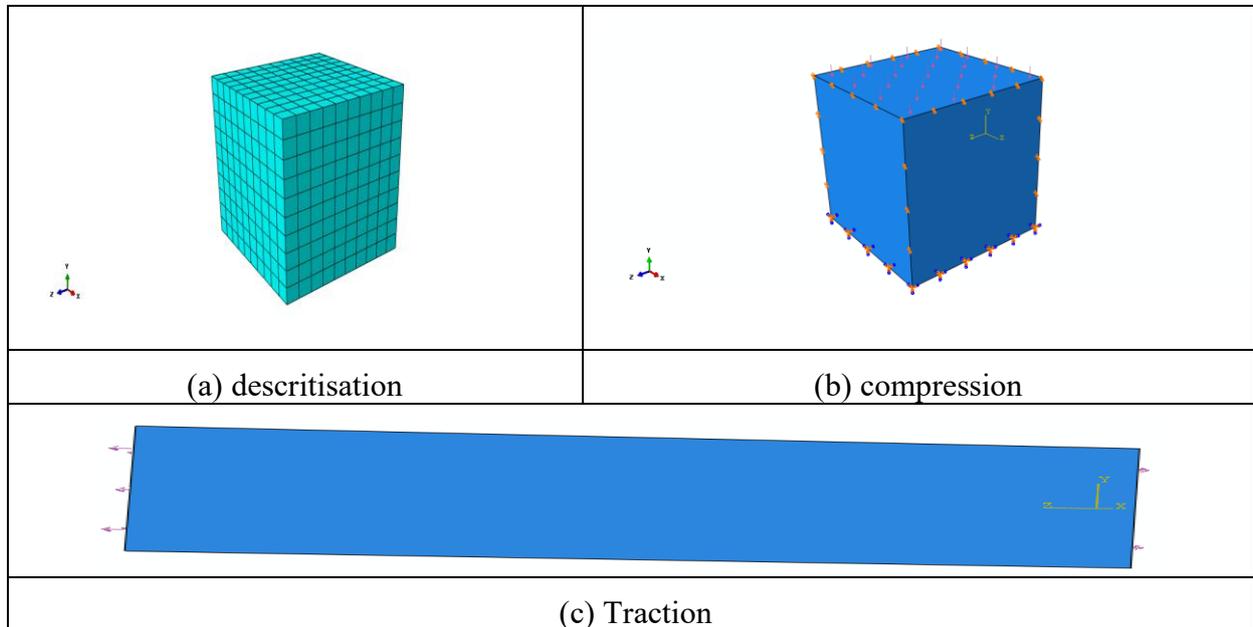
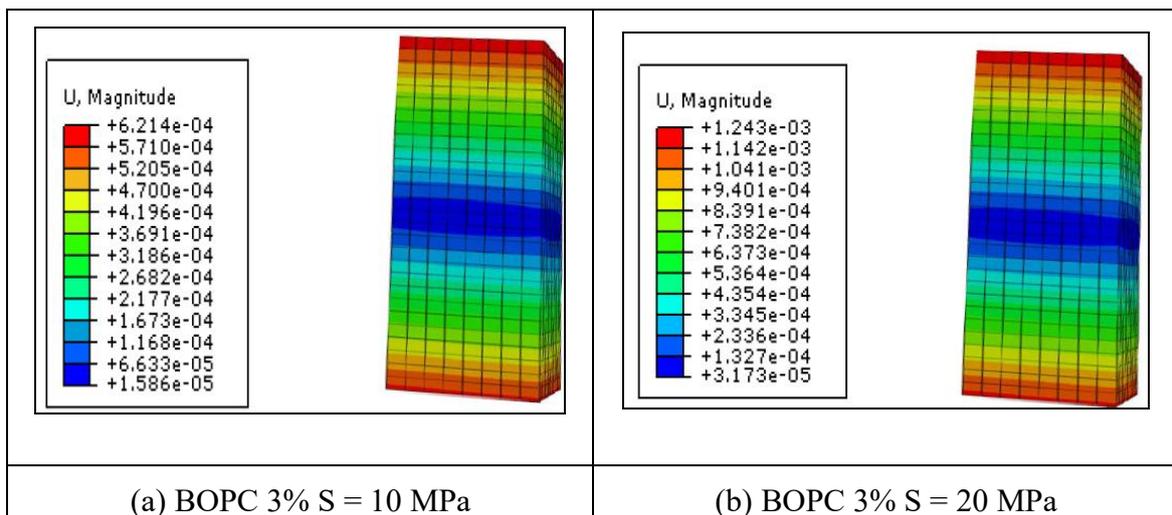


Figure. 5.17 : Modèle numérique d'une éprouvette cubique (150 x 150 x 150) mm³



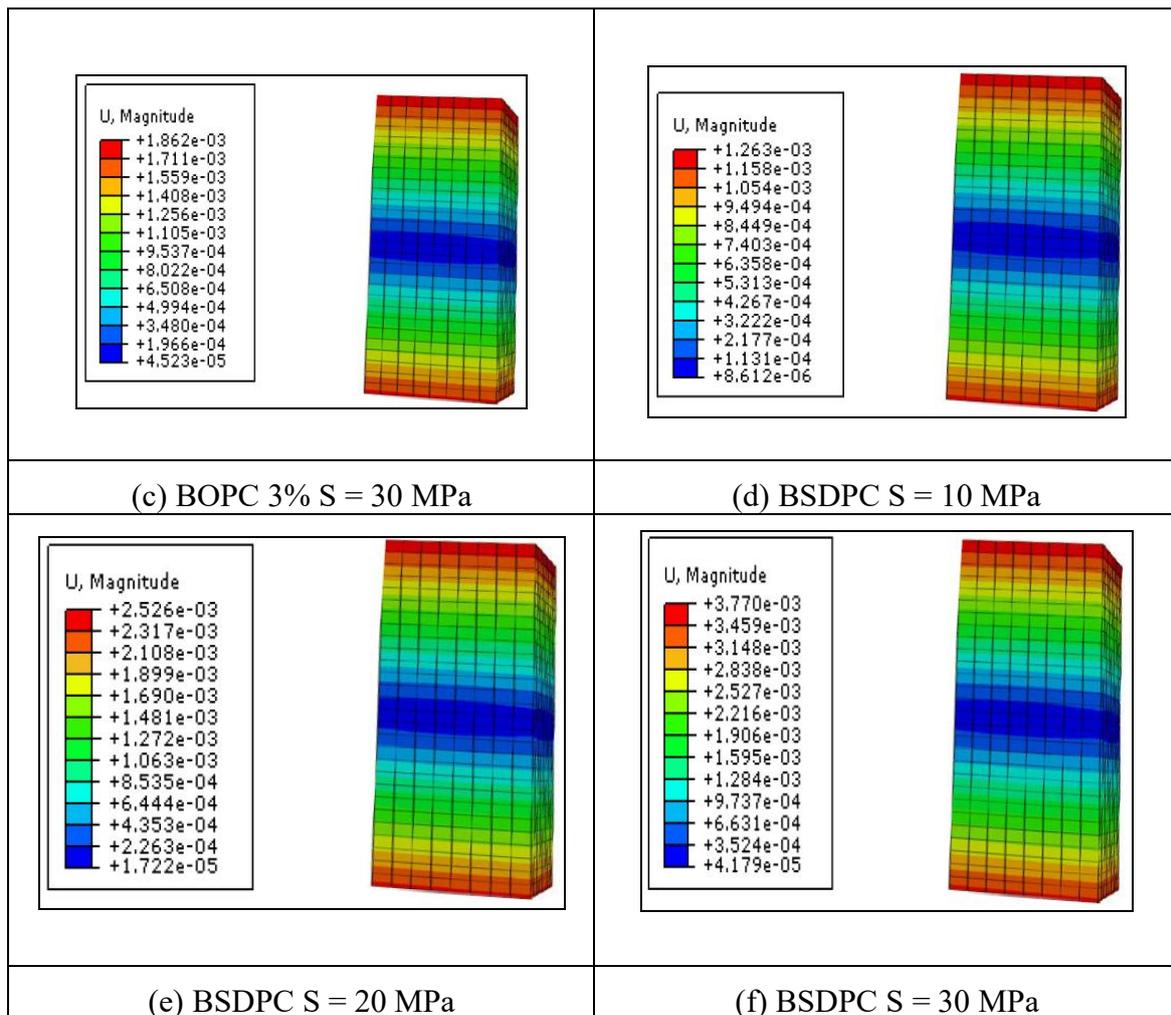


Figure. 5.18 : Déformation longitudinale distribuée

D'autre part, l'analyse numérique nécessite la modélisation du BSDPC 3% ayant un module d'élasticité ($E_2 = 12748$) et un coefficient de Poisson ($\nu = 0.2$) avec différentes contraintes appliquées aux éprouvettes. Ses déformations longitudinales distribuées sont représentées dans les figures 5.19 et figures 5.20. En appliquant les contraintes de traction ou compression sur l'éprouvette prismatique ($70 \times 70 \times 280$) mm³, les figures précédentes regroupent les valeurs numériques des déformations longitudinales de deux types de béton modifiés (BOPC 3% et BSDPC 3%).

Selon l'analyse numérique et expérimentale du béton ordinaire et du béton de sable de dune, les courbes de contrainte-déformation sont illustrées dans les figures 5.19 et figures 5.20.

Les courbes de contrainte-déformation représentatives de chaque série ont montré un comportement typique en trois étapes.

- 1er stade : un comportement élastique presque linéaire du béton. Pour le BSDPC, ce stade

correspond à une déformation élastique $\epsilon_{el}=0,42\%$ pour une contrainte de $\sigma =5\text{ MPa}$ (55% de la contrainte uniaxiale) alors que pour l'BOPC $\epsilon_{el}=0,38\%$. Le gradient à l'origine de cette courbe est le module de déformation longitudinale à l'origine.

- 2ème étape : cette étape est caractérisée par une forme parabolique de la courbe contrainte-déformation longitudinale jusqu'à un seuil correspondant à la contrainte maximale de chaque spécimen.

- 3ème étape : cette étape est caractérisée par une fissuration généralisée. La déformation augmente alors que la contrainte de rupture diminue. Ce phénomène est observé sur la courbe longitudinale contrainte-déformation des deux bétons sous forme d'une branche descendante dont la pente représente la nature fragile plus ou moins marquée du béton. Le béton de sable de dunes à granulats seuls est moins fragile puisque cette pente est pratiquement horizontale alors qu'elle est presque verticale pour le béton ordinaire ce qui traduit sa fragilité.

Le module de déformation longitudinal à l'origine est donné par la tangente à la courbe de contrainte longitudinale. Pour le BOPC 3%, E s'est avéré être 23342 MPa, tandis que pour le mélange BSDPC à 3% de poudrette de caoutchouc, E= 12748 MPa. Le module d'élasticité du béton de sable de dunes et de granulats seuls est apparemment faible par rapport au béton ordinaire.

Enfin, une vérification numérique est effectuée en mettant en œuvre une analyse par éléments finis (FEA) non linéaire à l'aide du logiciel ABAQUS. La fiabilité des modèles FE est démontrée par une comparaison avec les résultats expérimentaux, qui montre une bonne concordance des deux types de béton modifié (BOPC et BSDPC) en termes de courbes contrainte-déformation et de charge de rupture de deux bétons avec une teneur optimale en poudrette de caoutchouc (3%). Par conséquent, le logiciel ABAQUS peut être utilisé pour prédire la capacité du béton modifié avec des poudrettes de caoutchouc sur les sites de construction tout en respectant l'optimum de la poudrette de caoutchouc démontré dans l'étude expérimentale (3%).

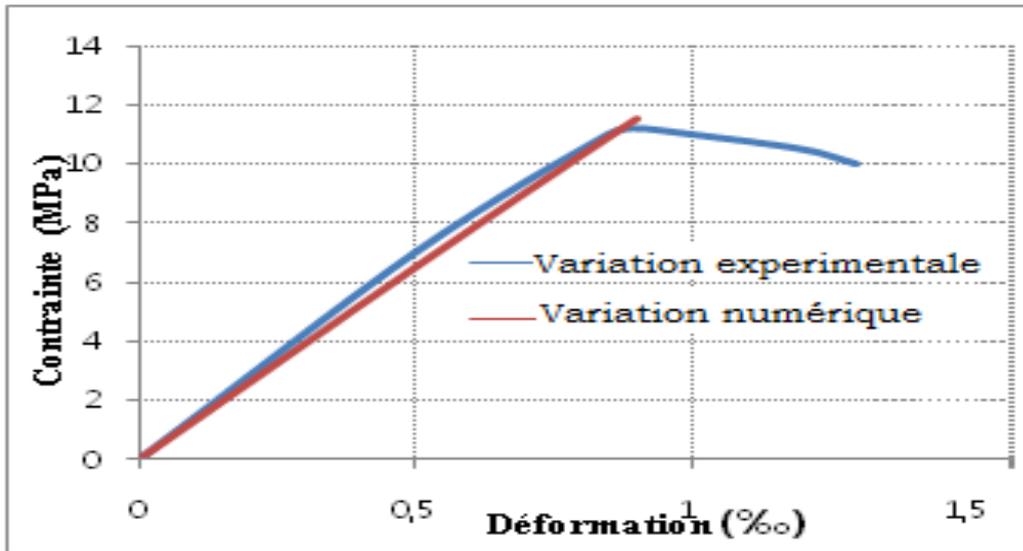


Figure 5.19. Contrainte-déformation de la courbe BOPC 3%.

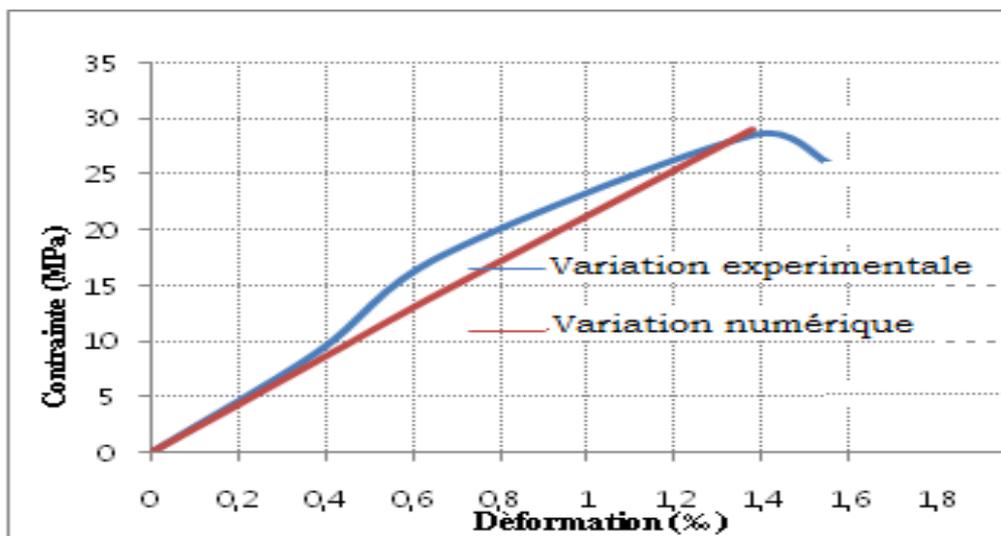


Figure 5.20. Courbe contrainte-déformation du BSDPC 3%.

5.7. Conclusion

Les résultats trouvés montrent que les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable modifié sont inférieures à celles du béton ordinaire modifié avec la même poudre, ainsi que les résultats expérimentaux et le modèle numérique révèlent un bon accord entre les deux types de béton de teneur optimale en poudre de caoutchouc en termes de courbes de contrainte-déformation et de charges de rupture.

**CONCLUSION GÉNÉRALE
ET RECOMMANDATIONS**

CONCLUSION GENERALE:

Cette recherche a permis de découvrir la possibilité de collecter le sable des dunes, qui est une composante importante de ressources locales de notre pays, ainsi que les déchets des pneus usés, qui sont abondants mais rarement collectés. En minimisant les déchets et en prévenant la contamination, nous avons pu résoudre un triple défi environnemental, ainsi que les problèmes économiques et technologiques qui se posent dans le secteur de la construction en raison du manque de matériaux de construction non renouvelables.

Nous nous sommes intéressés à l'incorporation d'un élastomère acrylonitrile-butadiène (NBR) sous forme de poudre de caoutchouc dans un béton ordinaire et un béton de sable de dune, non pas pour améliorer les performances mécaniques, mais pour comparer leurs propriétés et leur comportement. Ce polymère non biodégradable est un sous-produit industriel. Il nous a été suggéré par une entreprise algérienne d'élastomères(SAEL).

L'analyse expérimentale sur les compositions testées a révélé que l'ajout de faibles pourcentages aux bétons de sable et aux bétons ordinaires n'est pas conseillé lorsque l'objectif principal est la résistance. En effet, si l'inclusion d'additifs bien choisis permet d'améliorer les caractéristiques et les qualités des mélanges la plupart du temps, et si l'amélioration croît en général avec le degré de modification, l'excès peut parfois aboutir à l'inverse. À l'issue de la recherche, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

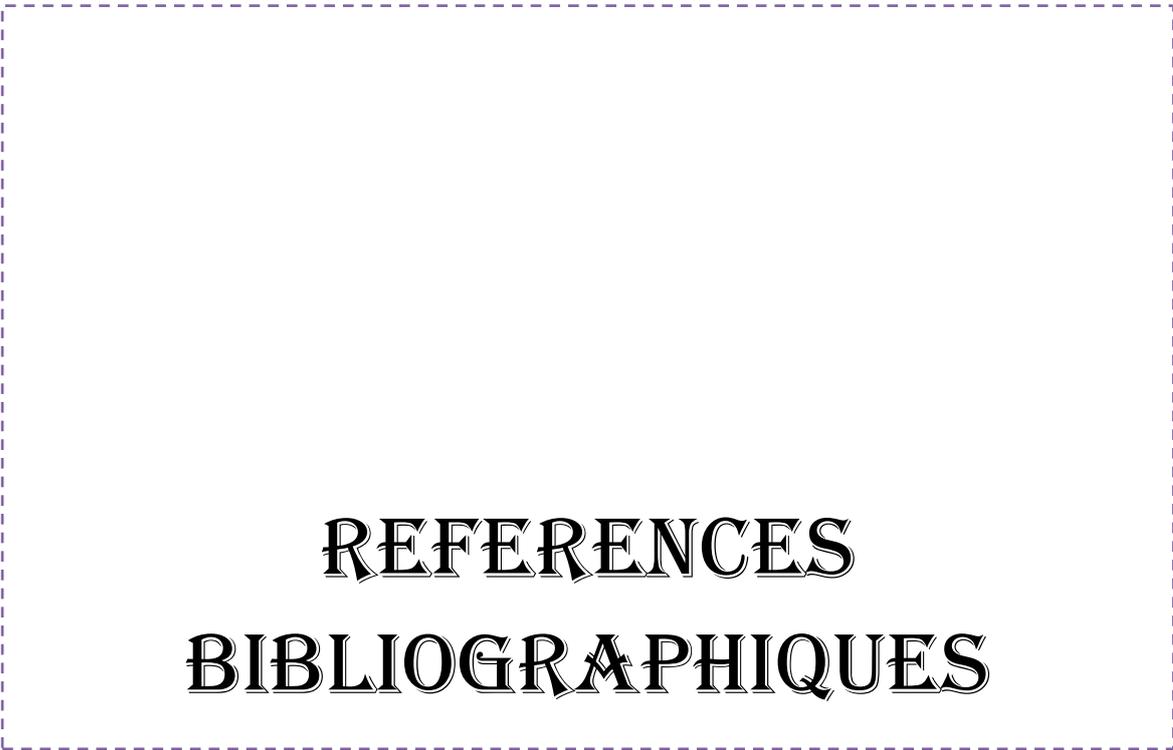
- Pour les deux bétons (ordinaire et de sable de dune), la proportion recommandée d'inclusion de la poudre de caoutchouc est de trois pour cent (3%).
- En raison de sa granularité fine, le béton de sable est plus léger que le béton ordinaire. La poudre de caoutchouc est utilisée pour rendre le béton de sable plus léger. La densité du composite diminue lorsque la quantité de poudre de caoutchouc augmente. Ceci est attendu puisque les granules de caoutchouc poreux ont été mis dans une matrice cimentaire plus rigide et plus lourde. De plus, nous pouvons constater que cette diminution est presque linéaire.
- Au fur et à mesure que le pourcentage de poudre augmente, la maniabilité s'améliore. Cela s'explique par la faible absorption d'eau des particules de caoutchouc, qui entraîne un gain d'eau de gâchage pour les autres constituants du béton sans affecter le rapport (E/C), qui reste constant pour les deux bétons.

- Plus la proportion de caoutchouc incorporé augmente, plus la résistance à la compression diminue. La résistance à la compression du béton ordinaire est d'environ 45 % de la résistance du béton témoin pour un pourcentage de 4 % de caoutchouc incorporé ; cependant, la résistance à la compression du béton de sable est de 36 % de la résistance du béton témoin. Ce phénomène se produit en raison de la faible cohésion inter-granulaire des particules de caoutchouc.
- Selon les tests effectués, le module d'élasticité du béton de sable est environ 54 % plus élevé que celui du béton ordinaire.
- Les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton de sable modifié sont inférieures à celles du béton ordinaire modifié avec la même poudre, Ce qui empêche son utilisation dans les éléments structuraux. Cependant, il pourrait être utilisé pour enterrer des produits faiblement radioactifs, ainsi que pour les bordures, les éléments esthétiques et la séparation des voies d'autoroute...
- Le programme ABAQUS peut être utilisé pour anticiper la capacité du béton modifié par des poudrettes de caoutchouc tout en restant dans le niveau optimal de poudrettes de caoutchouc trouvé dans l'enquête expérimentale(3 %).
- Les résultats expérimentaux et le modèle numérique révèlent un bon accord entre les deux types de béton modifié en termes de courbes de contrainte-déformation et de charges de rupture de deux bétons avec une teneur optimale en caoutchouc.

Recommandations et perspectives :

- Afin d'améliorer les performances mécaniques, il faut tenir compte du paramètre de l'adjuvant, du dosage et/ou de l'adjuvant lui-même, ainsi que de la granulométrie du caoutchouc.
- D'autres tests de comportement à long terme doivent être effectués afin de gérer ce matériau (possibilité de relargage).
- Compléter par d'autres essais à savoir, le retrait, le fluage, les essais de durabilité (perméabilité au gaz, carbonatation), et le comportement de ces deux type de béton en milieu agressif (eau de mer) ;
- Le ministère de l'environnement et le ministère de l'équipement et du logement devraient collaborer pour mettre au point une technique de caractérisation des déchets en rapport avec un objectif spécifique.
- Pour une bonne utilisation des déchets industriels, il faudrait commencer par évaluer les risques (manque d'essais environnementaux) ; le problème majeur est l'absence de seuils réglementaires pour l'utilisation de ces déchets.

Cela facilitera la compréhension du comportement de ce sous-produit et son utilisation convenable dans la construction.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdollahzadeh, R. Masoudnia, S. Aghababaei, Predict strength of rubberized concrete using artificial neural network. *Journal of Cement and Concrete Research*, 34, 2309-2372.
- Abu-Jdayil, B., Mourad, A.-H., Hittini, W., Hassan, M., Hameedi, S., 2019. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Constr. Build. Mater.* 214, 709–735.
- Acker, J. Torrenti, M. GUerinet, La maîtrise de la fissuration au jeune âge: condition de durabilité des ouvrages en béton, *La durabilité des bétons* (2008) 217-246.
- Adam M. Neville. (1992). *Propriétés des bétons*. Eyrolles. p. 805.
- Aiello, Ma., Leuzzi, F., Waste tyre rubberized concrete : Properties at fresh and hardened state, *Waste Manag.* V. 30, (2010), 1696–704.
- Ait Mohamed Amer Adem, Valorisation des matériaux de démolition dans la construction, These doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, 2017, p. 134.
- Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Felieu, M., and Hernandez, M. Influence of Scrap Rubber Addition to Portland I Concrete Composites: Destructive and Non Destructive Testing. *Composite Structures*, V. 71(3-4), (2005), 439–446.
- Aliapure, Le taux résiduel de fils métalliques dans les granulats, 2010.
- Al-Mashhadani, J., (2001). Physical properties and impact resistance of rubber tire waste concrete. Faculty of Civil Engineering Research Report – Military Collage of Engineering, Baghdad.
- Al-Sakini J. S., (1998). Behavior and characteristics of chopped worn-out tires lightweight concrete. *Building and construction Journal*, University of Technology, Baghdad; 1998.
- Amar Mezidi, Ratiba Mitiche Kettab, Hamid Hamli Benzahar and Mahfoud Touhari, (2021), « Behavior of modified concrete based on crumb rubber: Experimental test and numerical investigation », *Advances in Concrete Construction*, Vol. 12, No. 2 (2021) 125-134 <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.2.000>.
- Ameli, E.P. Karan, S.A.H. Hashemi. Development of designs for RCC mixtures with waste material. *Int. J. Pavement Eng.* (2020), pp. 1-13.
- Ansys Basic, "Analysis Practice Guide", 2nd edition, SAS IP, Inc.

- Arockiasamy.M, "Time dependent deformations of concrete beams reinforced with bars", Florida Atlantic university, USA, 2000.
- Assaad J. and Khayat K.H.(2005).Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal, pp. 145-153.
- Baderina .M :«caractérisation mécanique et physique des béton de sable a base de déchets de bois », thèse de doctorat, ENP 2007.
- Ben Ftima M. (2005). Comparaison des trois logiciels d'éléments finis: ANSYS, ADINA et ABAQUS. Rapport interne, École Polytechnique de Montréal.
- Benaissa, A. (nov. 1992) : «Déformations différées d'un béton de sable» – Thèse de doctorat, Université de bordeaux; Laboratoire régional des ponts et chaussées.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M., “Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes”, Cem. Concr. Compos, V. 29, (2007), 732–740.
- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B., Quéneudec, M. Thermalconductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling. Constr. Build. Mater, V. 22, (2008), 573–579.
- Bertolini, M.S., 2014. Painéis de resíduosmadeireiros e de borracha de pneu associados à espumapoliuretana à base de mamona para aplicaçãocomocomposiçãoestermoacústicas. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Bisht, P.V. Ramana.Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concreteConstr. Build. Mater., 155 (2017), pp. 811-817.
- Bombléd J.P.(1973).Rhéologie des mortiers et des bétons frais; influence du facteur ciment. Proceeding of RILEM. Leeds Seminar, Vol.1, sujet 3, p.1-169.
- Borges A., Flores-Colen I., de Brito J. (2018).Physical and mechanical performance of cement-based renders with different contents of fly ash, expanded cork granules and expanded clay, Construction and Building Materials, vol. 191, pp. 535-543.
- Boulay, V. (2014). Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel. Université de Sherbrooke.
- Bouziani T., Bederina M., Hadjoudja M. (2012). Effect of dune sand on the properties of flowing sand concrete (FSC). International Journal of Concrete Structures and Materials, 6, pp. 59 – 64.
- Cachaço, A.G., Afonso, M.D., Pinto, M.L., 2013. New applications for foam composites of polyurethane and recycled rubber. J. Appl. Polym. Sci. 129, 2873–2881.

- Choi, H.-D. Yun, Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading, *Engineering structures* 41 (2012) 285-293.
- Colom, X., Cañavate, J., Carrillo, F., Velasco, JI., Pagès, P., Mujal, R. Structural and mechanical studies on modified reused tyres composites. *EurPolym J*, V. 42(10) , (2006), 2369–78.
- concrete”, *Constr. Build. Mater*, V. 133, (2017), 516–524
- D.M. Smith, A.R. Chughtai, The surface structure and reactivity of black carbon, *Colloid Surf A* 105 (1995) 47-77.
- D.-T. Dao, (Multi-) recyclage du béton hydraulique, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, France, 2012, p. 309.
- Da Gloria M.Y.R., Toledo Filho R.D. (2021). Innovative sandwich panels made of wood bio-concrete and sisal fiber reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*.doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121923>.
- De Larrard, H. Colina, *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, Ouvrages Scientifiques, OSI4, 2018.
- Debieb, S. Kenai, The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, *Construction and building materials* 22(5) (2008) 886-893.
- Domingo, C. Lázaro, F. Gayarre, M. Serrano, C. Lopez-Colina, Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete, *Materials and Structures* 43(8) (2010) 1147-1160.
- Dominik Segiet, Laura Neuendorf, Joerg C. Tiller and Frank Katzenberg, Realizing a Shape-Memory Effect for Synthetic Rubber (IR). *Polymer*. Volume 203, 26 August 2020.
- Domone P.L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 197 – 208.
- Dreux G. et Festa J.: « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles Huitième édition, Paris 1998.
- El-Ariss B.(2006). Effect of reducing coarse aggregates on concrete strength. *Construction and Building Materials*, vol 20, pp. 149–157.
- Elchalakani, M. High strength rubberized concrete containing silica fume for the construction of sustainable road side barriers. *Structures*, V. 1, (2015), 20–38.
- Eldin, N.N., Senouci, A.B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *J. Mater. Civ. Eng*, V. 5, (1993), 478–496.
- Fazli, A., Rodrigue, D., 2020. Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers. *Materials (Basel)*. 13.

- Fedroff D, Ahmad S, Savas BZ. Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. Transportation Research Board, Report No. 1532. Washington, DC: Transportation Research Board; 1996. p. 66–72.
- Folino, H. Xargay, Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression, *Construction and building materials* 56 (2014) 21-31.
- Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Constr. Build. Mater.*, V. 23, (2009), 1828–1836.
- Gao, J., Wang, H., Chen, J., Meng, X., You, Z., 2019. Laboratory evaluation on comprehensive performance of polyurethane rubber particle mixture. *Const. Build. Mater.* 224, 29–39.
- Garrido, M., Correia, J.R., Keller, T., 2015. Effects of elevated temperature on the shear response of PET and PUR foams used in composite sandwich panels. *Constr. Build. Mater.* 76, 150–157.
- Garros, M. Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, (2007).
- Gesoglu, E. Güneyisi. Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. *Mater. Struct.*, 40 (9) (2007), pp. 953-964.
- Ghrieb, A., «étude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques», thèse de magister, ENP 2003.
- Gómez-Soberón, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study, *Cement and concrete research* 32(8) (2002) 1301-1311.
- Guennoun R., «Etude et formulation d'un béton de sable de dune», P.F.E., ENP, Alger—Algérie juin 2003.
- Guneyisi, E., Gesoglu, M., and Ozturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume.” *Journal of Cement and Concrete Research*, ELSEVIER, 34, 2309-2317.
- Gupta, S. Chaudhary, R. Sharma. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 73 (2014), pp. 562-574.
- Gupta, S. Siddique, R.K. Sharma, S. Chaudhary Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment *Constr. Build. Mater.*, 217 (2019), pp. 283-291.

- H. Choi, M. Lim, R. Kitagaki, T. Noguchi, G. Kim. Restrained shrinkage behaviour of expansive mortar at early ages. *Constr. Build. Mater.* 84 (2015) 468–476,
- H. Li, S. H. Zhao, Y. Q. Wang. Microbial desulfurization of ground tire rubber by thiobacillusferrooxidans. *Polym. Degrad. Stab.* 2011;96:1662–1668.
- HADDADI. S, « Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux », thèse de doctorat, USTHB 2007.
- Harini M., Shaalini G., Dhinakaran G. (2012). Effect of size and type of fine aggregates on flowability of mortar. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16, pp. 163 – 168.
- Hejna, A., Korol, J., Przybysz-Romatowska, M., Zedler, Ł., Chmielnicki, B., Formela, K., 2020. Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers – A review. *Waste Manage.* 108, 106–118.
- Hibbitt, H. D., Karlson, B. I. et Sorensen, E. P. (2010). ABAQUS version 6.10, finite element program, Hibbitt, Karlson and Sorensen, Providence, R.I.
- 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.*, V. 4, (1971), 107–114.
- Holmes, N., Browne, A., Montague, C. Acoustic properties of concrete panel with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, V. 73, (2014), 195–204.
- Hong, Z., Bo, L., Guangsu, H., Jia, H., 2007. A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *J. Sound. Vib.* 304, 400–406.
- Hossain, M. Shahjalal, K. Islam, M. Tiznobaik, M. Alam. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing crumb rubber and polypropylene fiber *Constr. Build. Mater.*, 225 (2019), pp. 983-996.
- Hoyer, S., Kroll, L., Sykutera D. Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres. *Procedia Manufacturing* 43 (2020) 193–200
- in concrete: durability-related performance”, *J. Clean. Prod.* V. 112, (2016), 504–513
- Iran Transportation Research Institute. Research reports for 2005. Ministry of Road and Transport, Tehran, Iran, 2006.

- Jean –Charles Craveur, "Modélisation des structures, calcul par élément finis", deuxième édition DUNOD, Paris, 2001
- Jiang, S.M. Easa, C. Hu, X. Zheng, Understanding damping performance and mechanism of crumb rubber and styrene-butadiene-styrene compound modified asphalts, *Constr. Build. Mater.* 206 (2019) 151–159,
- Jianwen Shao, Han Zhu, Gang Xue, Yong Yu, Said MirganBorito, Wenlixia Jiang. Mechanical and restrained shrinkage behaviors of cement mortar incorporating waste tire rubber particles and expansive agent. *Construction and Building Materials* 296 (2021) 123742.
- Journal officiel de la république Algérienne et populaire. Loi du 15 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, No. 77, Algérie.
- Jung, I. Roh, S. Chang, Stress analysis of runway repaired using compliant polymer concretes with consideration of cure shrinkage, *Compos. Struct.* 119 (2015) 13-23.
- Kachlakev.D, "Finite element analysis of Historic Bridge Strengthened with FRP Laminate", California Polytechnic State University, USA, 2000, pp1-12.
- Kayali O., Haque M.N., Zhu B. (2002). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, pp. 207-213.
- Kenai, F. Debieb, L. Azzouz, Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates, in: T. Telford (Ed.) *Challenges of Concrete Construction, SustaiChallenges of Concrete Construction*, University of Dundee, Scotland, UK, 2002, pp. 383-392.
- Kettab .R :«valorisation du sable de dune», thèse de doctorat ENP 2007.
- Kettab, R., Bali, A. Alliche (2007). « Rubber modified sand concrete for waste management» ; *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology (IJNEST)*, Volume 3 N°1 pp 63-75.
- Khaloo, A.R., Dehestani, M. and Rahmatabadi, P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire – rubber particles. *Waste Management*, V. 28(12), (2008), 2472–2482.
- Khatib, Z.K. and Bayomy, F.M. Rubberized Portland Cement Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 11(3), (1999), 206–213.
- Koller E. « traitement des pollutions industrielles », Ed, Dunod, avril 2004.

- Kumar, Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete, *Construction and Building Materials* 142 (2017) 248-255.
- Ledhem A., Dheilily R.M, Benmalek M.L., Queneudec M. (2000). Properties of wood based composites formulated with aggregate industry waste. *Construction and Building Materials*, vol. 14, pp. 341-350.
- Lee, HS., Lee, H., Moon, JS. and Jung, HW., Development of tire-added latex concrete, *ACI Mater J*, V. 95, (4), 356–364.1998.
- Liu. Reagents for Swelling Rubber and Method of Using.U.S 6,569,977 B1. 2003.
- Locher, F.W. (1976). Die festgeit des zements, *Beton*. pp. 247–249.
- Lulu Liu, GuojunCai, Xiaoyan Liu. Investigation of thermal conductivity and prediction model of recycled tire rubber-sand mixtures as lightweight backfill.*Construction and Building Materials*.248 (2020).
- Lye, R.K. Dhir, G.S. Ghataora, H. Li, Creep strain of recycled aggregate concrete, *Construction and building materials* 102 (2016) 244-259.
- M. Neaz Sheikh, M.S. Mashiri, J.S. Vinod, H.H. Tsang, Shear and compressibility behavior of sand–tire crumb mixtures, *J. Mater. Civil Eng.* 25 (10) (2012) 1366–1374.
- M.C. Rao, S. Bhattacharyya, S. Barai, Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Materials and Structures* 44(1) (2011) 205-220.
- Marie, I., “Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate – Rubberized
- Meddah, A. Caractérisation d’un béton compacté contenant des déchets pneumatiques. Thèse de Doctorat en Sciences, École Nationale Polytechnique d’Alger, Algérie, 0105.
- Mefteh, O. Kebaïli, H. Oucief, L. Berredjem, N. Arabi, Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, *Journal of cleaner production* 54 (2013) 282-288.
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J.V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M.T., Kurmus, Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Maghool, F., 2020. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resour. Conserv.Recycl.* 155.
- Mohammad Mustafa al bakri, S.A. Syed NuzulFadli, M.D. Abu bakar and K.W leong, Comparison of rubber as aggregate and rubber as filler in concrete. *Journal of Cement and Concrete Research*, 84, 2309-2323.

- Mohammad Reza sohrabi, Mohammad Karbalaie, an experimental study on compressive strength of concrete containing crumb rubber. *Journal of Cement and Concrete Research*, 44, 2309-2358.
- Mostafa Amiria, Farzad Hatamib, Emadaldin Mohammadi, Golafshanic. Evaluating the synergic effect of waste rubber powder and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*. Vol 15, December 2021.
- Moustafa A and El Gawady M A. 2015. Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. *Constr. Build. Mater.* 93 249-256
- Mpan.PetLevacher.D, "Analyse numérique du comportement d'un pieu isolé tridimensionnel chargé latéralement en milieu pulvérulent", Compiègne, 7-9 Septembre 2004.
- Myhre, D. A. MacKillop. Rubber recycling. *Rubber Chem. Technol.* 2002; 75(3):429-474.
- Na, Y. Xi. Mechanical and durability properties of insulation mortar with rubber powder from waste tires. *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 19 (2) (2017), pp. 763-773.
- Naoki N., Ozawa K. (1996). Effect of fine aggregate on the filling ability of fresh concrete. *Proceedings of JSCE*. Vol. 18, No. 1, pp. 105 – 109.
- Neville A.M.(2000). *Propriétés des bétons*, Traduction de CRIB. Sherbrooke, Canada, Ed. Eyrolles, Paris, p. 806.
- Newman, J., and Choo.(2003). *Advanced concrete technology-Constituent materials*. Butterworth-Heinemann. ISBN 0750651032 Leemann A., Hoffman C. (2003).
- NF-EN-1008. (2003). *Eau de gâchage pour bétons - Spécifications échantillonnage, essais et évaluation de l'aptitude à l'emploi*.
- Nie, Y., Gu, Z., Wei, Y., Hao, T., Zhou, Z., 2017. Features of strain-induced crystallization of natural rubber revealed by experiments and simulations. *Polym. J.* 49, 309–317.
- Norme Française : « Béton – essais de compression », AFNOR, Paris 1981 NF EN 12390-3
- Norme Française : « Béton – essais de flexion », AFNOR, Paris 1981 NF EN 12390-5
- Norme Française : « Béton – essais d'affaissement », AFNOR, Paris 1981. NF EN 12350-2
- Nuzaimah, M., Sapuan, S.M., Nadlene, R., Jawaid, M., 2020. Effect of surface treatment on the performance of polyester composite filled with waste glove rubber crumbs. *Waste Biomass Valorization*.

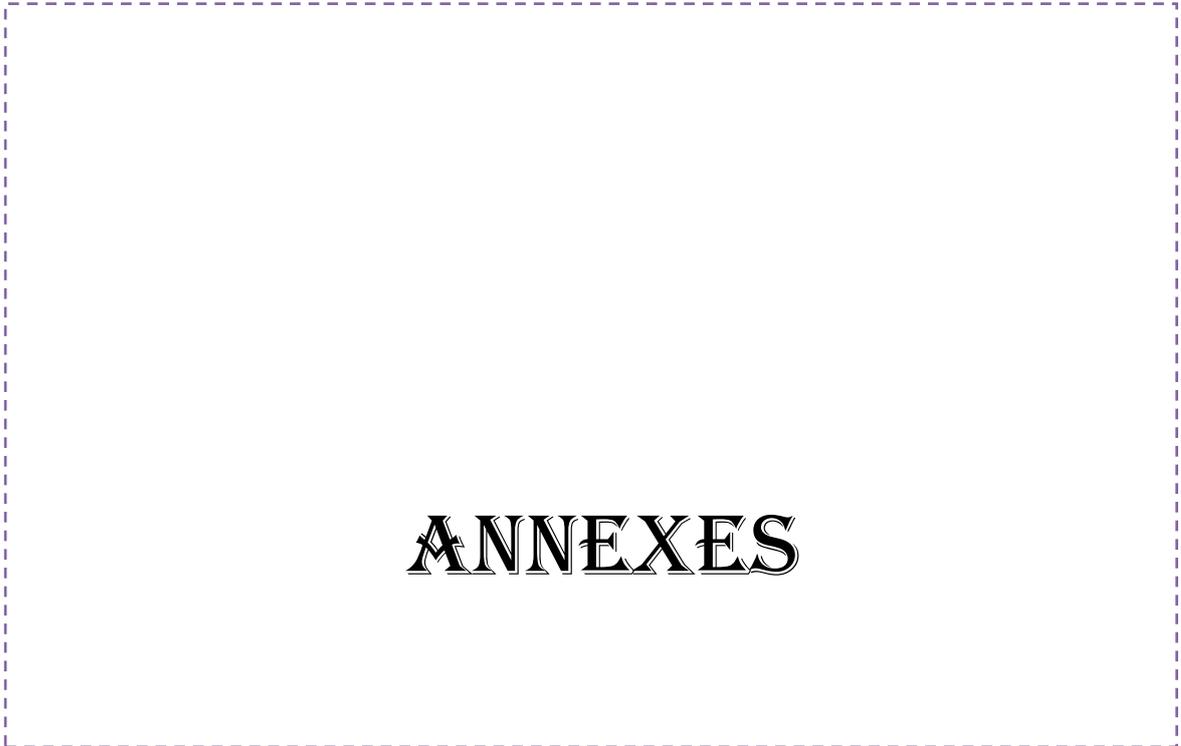
- Nycolle G.S. Silva, Lucas I.C.O. Cortat, Diego Orlando, Daniella Regina Mulinari,. Evaluation of rubber powder waste as reinforcement of the polyurethane derived from castor oil. *Waste Management* 116 (2020) 131–139.
- Patel R, Patel Y, Patel V, Patel K, Patel S, Tivadi G. Comparative analysis of compressive strength of concrete with waste type rubber powder. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. V. 07(6). 2020.
- Priyadarshan, P.M., Hoa, T.T.T., Huasun, H., Street, T., Chi, H., City, M., Postal, C., 2005. Yielding Potential of Rubber (*Heveabrasiliensis*) in Sub- Optimal Environments. *J. CropImprov.* 14, 221–247.
- Priyadarshan. *Experimental Agriculture* , Volume 48 , Issue 2 , April 2012 , pp. 302. DOI: .[https:// doi.org /10.1017/S0014479711001232](https://doi.org/10.1017/S0014479711001232)
- Raghavan, D., Huynh, H., 1998. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled. cementitious composite. *Journal of Materials Science* 33, 1745–1752.
- Rajan, W. K. Dierkes, J. W. M. Noordermeer, R. Joseph. Comparative investigation on the reclamation of NR based latex products with amines and disulfides. *Rubber Chem. Technol.* 2005;78 (5): 855–867
- S. B. Liang, Y. C. Hao. A novel cryogenic grinding system for recycling scrap tire peels. *Adv. Powder Technol.* 2000; 11(2):187–197.
- S. Bandyopadhyay, P.P. De, D.K. Tripathy, S.K. De, Influence of surface oxidation of carbon black on its interaction with nitrile rubbers, *Polymer* 37 (2) (1996) 353 - 357.
- S. Braymand, Influence de l'utilisation de granulats recyclés sur les propriétés rhéologiques et physiques des bétons, *Actes du colloque Matériaux*, 2010.
- Sablocrète, (1994), *Béton de sable*, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- Sadoudi Lyacia, Mitiche-Kettab Ratiba and Si Bachir Djaffar (2019), «Evaluation of the workability, marshall parameters, and the stiffness modulus of rubber modified bituminous concrete», *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* Vol. 10, No. 2, 43-55, <https://doi.org/10.22712/susb.20190006>
- Sahamitmongkol, T. Kishi, Tensile behavior of restrained expansive mortar and concrete, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 131–141,
- Salvucci, M.E., Coffelt, T.A., Cornish, K., 2009. Improved methods for extraction and quantification of resin and rubber from guayule. *Ind. Crops Prod.* 30, 9–16.

- Segre, N, Joekes I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *CemConcr Res*; 30(9), (2000), pp.1421–1425.
- Senetakis, A. Anastasiadis, K. Pitolakis, Dynamic properties of dry sand/ rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 33 (1) (2012) 38-53.
- Sharma V., Giri A., Thakur S., Pant D. (2020). Chapter 13 - Resource recovery from inert municipal waste, *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, In book: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, doi: 10.1016/B978-0-444-64321-6.00013-6.
- Shukla, N. Gupta, R. Goel, S. Kumar. Study on the behaviour of green concrete by the use of industrial waste material: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing (2020).
- Siddique, R. and Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview. *Journal of Waste Management*, 24, 563-569.
- Silva, J. De Brito, R. Dhir, Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review, *Construction and Building Materials* 77 (2015) 327-339.
- Somarathna, H.M.C.C., Raman, S.N., Mohotti, D., Mutalib, A.A., Badri, K.H., 2018. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.*190, 995–1014.
- Soratana, K., Rasutis, D., Azarabadi, H., Eranki, P.L., Landis, A.E., 2017. Guayule as an alternative source of natural rubber: A comparative life cycle assessment with Hevea and synthetic rubber. *J. Clean. Prod.* 159, 271–280.
- Soto, G., Castro, A., Vechiatti, N., Iasi, F., Armas, A., Marcovich, N.E., Mosiewicki, M.A., 2017. Biobase porous acoustical absorbers made from polyurethane and waste tire particles. *Polym. Test.* 57, 42–51.
- Su, H., Yang, J., Ling, T.C., Ghataora, G.S. and Dirar, S., “Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes”, *J. Clean. Prod.*, V. 91, (2015) 288–296
- Swinton, M.C., Maref, W., Bomberg, M.T., Kumaran, M.K., Normandin, N., 2006. In situ performance evaluation of spray polyurethane foam in the exterior insulation basement system (EIBS). *Build. Environ.* 41, 1872–1880.
- T. C. P. Lee, W. Millns. Treatment of vulcanized rubber. U.S 4,049,588 . 1977.

- Tavakoli, M. Hashempour, A. Heidari. Use of waste materials in concrete: a review. *Pertanika J. Sci. Technol.*, 26 (2) (2018), pp. 499-522.
- Thai, Q.B., Siag, T.E., Le, D.K., Shah, W.A., Phan-Thien, N., Duong, H.M., 2019. Advanced fabrication and multi-properties of rubber aerogels from car tire waste. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 577, 702–708.
- Thomas, B., Gupta, R. and Panicker, V., “Recycling of waste tire rubber as aggregate
- Thomas, B.S., Gupta, R.C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renew. Sustain. Energy Rev*, V. 54, (2016), 1323–1333.
- Topçu. I.B, The properties of rubberized concretes, *Cem. Concr. Res*, V. 25, (1995), 304–310.
- Trouzine, H., Asrouna, A., Asrouna, N, Belabdelouhab, F. and Longd, N.T. Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. *Nature & Technologie*, (2011), Volume 3, Numéro 2, Pages 28-35.
- Turatsinze, A. and Garros, M., “On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates”, *Resour. Conserv. Recycl*, V. 52, (2008), 1209–1215.
- Turatsinze, A., Bonnet, S. and Granju, J.L. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Constr. Build. Mater*, V. 21, (2005), 176–181.
- W. Feng-chi, W. Qing-long, D. Ming, Experimental study on dynamic characteristics of rubberized cement soil, *J. Disaster. Prev. and Mitig. Eng.* 34 (2014) 253–258.
- Wang Y, The modified of unsaturated polyester concrete (UPC) by low shrinkage agents, *Fiber reinforced plastics/Composites* (06) (1997) 42-45.
- Wang, Y. Kang, Z. Wang, Y. Cheng. Recycling waste tire rubber by water jet pulverization: powder characteristics and reinforcing performance in natural rubber composites. *J. Polym. Eng.* 2017; 38(1):51–62.
- Weber, A, Zanchet, R. N. Brandalise, J. S. Crespo, R. C. R. Nunes. Grinding and Characterization of Scrap Rubbers Powders. *J. Elastom. Plast.* 2008; 40(2):147–159.
- Xiang Li, Xiaofei Xu b, Zhijun Liu. Cryogenic grinding performance of scrap tire rubber by devulcanization treatment with ScCO₂. *Powder Technology*. 2020

- XianjieRen, Cindy S. Barrera, Janice L. Tardiff, AndresGil, KatrinaCornish. Liquid guayule natural rubber, a renewable and crosslinkable processing aid in natural and synthetic rubber compounds. *Journal of Cleaner Production*. Volume 276, 10 December 2020.
- XiaoPingWanga, Li Hong, HaiJian Wu, HuiLin Liu, DeMingJia. Grafting waste rubber powder and its application in asphalt. *Construction and Building Materials*. 271 2021.
- Yammine J. (2007). Rhéologie des bétons fluides à hautes performances: relations entre formulations, rhéologie, physico-chimie et propriétés mécaniques. Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Université Paris – 6, p. 198.
- Yang, H.S., Kim, D.J., Lee, Y.K., Kim, H.J., Jeon, J.Y., Kang, C.H., 2004. Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials. *Bioresour. Technol.* 95, 61–65.
- Yinong Shen, XiaobingMaa, Jiantao Huang, Fan Hao, JianfuLv, Manlin Shen. Near-zero restrained shrinkage polymer concrete incorporating ceramsite and waste rubber powder. *Cement and Concrete Composites*. Vol 110, 2020,
- Youssf, O., El Gawady, Ma., Mills, JE., and MaX . An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and Building Materials*, V. 53, (2014), 522–532.
- Youwai, D.T. Bergado, Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire sand mixtures, *Can. Geotech. J.* 40 (2) (2003) 254–624.
- Yung, L.C. Yung, L.H. Hua. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.*, 41 (2013), pp. 665-672.
- Zaharieva, F. Buyle-Bodin, E. Wirquin, Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research* 34(10) (2004) 1927-1932.
- Zaharieva, F. Buyle-Bodin, E. Wirquin, Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research* 34(10) (2004) 1927-1932.
- Zhang, X., Lu, Z., Tian, D., Li, H., Lu, C., 2012. Mechanochemical devulcanization of ground tire rubber and its application in acoustic absorbent polyurethane foamed composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 127 (5), 4006–4014.
- Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, L. Li, Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate, *Results in Physics* 9 (2018) 1317-1322.

- Zornberg, R. Cabral, C. Viratjandr., Behaviour of tire shred sand mixtures, *Can. Geotech. J.* 41 (2) (2004) 227–241.
- Zubov, A., Pokorny, J., Kosek, J., 2012. Styrene–butadiene rubber (SBR) production by emulsion polymerization: Dynamic modeling and intensification of the process. *Chem. Eng. J.* 207–208, 414–420.



ANNEXES

Behavior of modified concrete based on crumb rubber: Experimental test and numerical investigation

Amar Mezidi*¹, Ratiba Mitiche Kettab^{1a}, Hamid Hamli Benzahar^{2b} and Mahfoud Touhari^{3c}

¹Department of Civil Engineering, National Polytechnic School of Algiers, Algeria

²Department of Technology, Faculty of Sciences and Technology, University of Khemis Miliana, Algeria

³Acoustic and Civil Engineering Laboratory LAGC, Faculty of Sciences and Technology, University of Khemis Miliana, Algeria

(Received June 9, 2020, Revised April 29, 2021, Accepted June 25, 2021)

Abstract. The Crumb rubber concrete is becoming a new interesting environmental material in the last two decades, which requires research studies on the recovery of local materials using industrial waste. The present paper is devoted to investigate the behavior of concrete made only with dunes sand and an ordinary concrete modified with various weight contents of crumb rubber. The mechanical and physical properties such as the density, the compressive strength, the relative compaction and the tension by bending strength of a dune sand concrete and an ordinary concrete modified with different weight percentage of rubber crumb, 1%, 2%, 3%, 4% and 5% are investigated. The obtained results show that the optimal percentage of the crumb rubber is 3%. In addition, the results indicate that concrete made only with dunes sand has weaker elasticity modulus -54% approximately, and reduced compressive strength -63% compared to the modified ordinary concrete. Consequently, the ordinary concrete mix with crumb rubber and admixture incorporation has proven acceptable performances for the eventual use in the structural elements, however, the dunes sand only aggregate concrete modified by crumb rubber may limit its use in certain structural applications such as pavements borders. Finally, modified ordinary concrete and modified dunes sand are modeled by the finite element method and compared with the experimental results.

Keywords: elasticity modulus; finite elements; materials mechanical behavior; modified concrete; rubber crumb

1. Introduction

Crumb rubber concrete, also called recycled tire rubber-filled concrete, is becoming a new interesting environmental material in the last two decades. More than 1.5 billion tires are produced worldwide per year, and most of these tires will sooner or later become waste (Xu *et al.* 2018, Karakurt 2015). Statistics indicate the increased consumption of rubber worldwide between 2000 and 2018, including natural and synthetic rubber. In 2017, combined global consumption of natural rubber and synthetic rubber totaled 28.4 million metric tonnes where different countries are facing growing problems for several years of disposal of these recycled materials. The disposal of tire waste becomes very expensive once it is sent to landfills. Not to mention the vast space they use for landfills and the risks they pose to the environment. In the other hand, the demand for building materials continues to increase year-over-year worldwide and is not being met due to insufficient supply.

This imbalance, which seems to last for years, cannot be overcome without taking advantage of recyclable materials such as used waste tire rubber available in each country. In fact, the recovery of huge amounts of used waste tire rubber in the construction has a triple advantage: environmental, technical and economic. Along with the expansion of the concrete industry around the world, other industries have also made progress in this sector. One of the most important of these is the adjuvant sector. Concrete has acquired improved properties with chemical and mineral admixtures (Sablocrete 1994, Festa 1998, Bravo and Brito 2012). They used tire rubbers as recycled material and replaced a portion of the fine aggregate with filtered used tire rubber powder to produce an ordinary concrete modified with crumb rubber OCR (Yung *et al.* 2013, Benbellil *et al.* 2018). Since ordinary concrete modified with crumb rubber (OCR) flows under its own weight, no external vibration is needed to compact the concrete. ordinary concrete modified with crumb rubber OCR, as highly openable concrete, was introduced for the first time in the late 1980s in Japan (Youssf *et al.* 2016, Benouadah *et al.* 2017). OCR is characterized by its high pulp content and, as a result, various cement-based materials such as slag, natural pozzolana, limestone and metakaolin are added to the mixture (Yahiaoui *et al.* 2017, Morlier and Viguier 2000, Kettab *et al.* 2007, Tayeh 2013). Rubberized concrete studies show a reduction in unit weight and mechanical properties (compressive, tensile and flexural strength) and a more ductile behavior with increased rubber content (Khaloo *et al.* 2008, Kromoser and Huber 2016, Segre and

*Corresponding author, Assistant Professor

E-mail: a.mezidi@univ-dbk.m.dz

^aProfessor

E-mail: mitiche_rdz@yahoo.fr

^bAssociate Professor

E-mail: h.hamli-zahar@univ-dbk.m.dz

^cAssociate Professor

E-mail: m.touhari@univ-dbk.m.dz



Fig. 1 Rubber aggregate



Fig. 2 Crushed rubber powder used

Joekes 2000, Meddah *et al.* 2017). This paper examines the potential use of recycled rubbers in roller-compacted concrete pavements to improve performance and reduce environmental impacts, including the effects of adding low percentages of rubber particles to dunes sand only aggregate concretes (DSCR) and ordinary concretes. The relationship between the compaction force applied and the rubber content is determined, presented and detailed. There are several studies conducted on Crumb rubber concrete among them (Xu *et al.* 2018), for the numerical part, we devoted our study on the optimal percentage of rubber crumbs (3%.) for the two concretes OCR and DSCR.

2. Material and methodology

2.1 Crumb rubber

The polymer used as modifier is crumb rubber which comes from the recovery of crushed rubber waste of soles of shoes and carpet of vehicles. The size of the crumb rubber used varies from 0.1 mm to 2 mm of fine powder (Fig. 1). Rubber waste is a huge recoverable pool, either by volume or by weight. The origins of this pool are worn tires; industrial rubber wastes, tires manufacturing wastes and retreading waste. Currently, 25% of rubber and tires are recovered, while there are a variety of treatment modes.

The polymer used in this work is a blackish industrial; resulting from the crushing of the rubber in fine textured form 1.25 mm maximum and 31% < 0.08 mm (Fig. 2); with 45% of a waste purity. It is an elastic material at ambient temperature compatible with cement and aggregates. It has a low viscosity at high temperature with a melting temperature of 200 to 220°C. (Abdeldjalil *et al.* 2019).

The spectrum of infrared spectroscopy characterizing the polymer used is given in Fig. 3. The available spectrum indicates that the polymer is a rubbery material of the ABR (Butadiene Rubber) type.

In Fig. 3, The FT-IR spectrum of the normal untreated sample containing rubber shows typical absorption bands from poly-butadiene (C-H stretching at 2919 and 2852 cm⁻¹, -CH₂ twisting at 1384 cm⁻¹ and out of plane deformation of C-H at 867 cm⁻¹) and from polystyrene (aromatic C-H stretching at 3014 cm⁻¹, aromatic C=C stretching at 1631 cm⁻¹) units. There is also C-O-C bending absorption at 1122 cm⁻¹. Finally, band detected at 539 cm⁻¹ corresponds to the stretching mode of Zn-O single bond. These results confirm that the sample analyzed by FTIR is probably constituted by styrene-butadiene-styrene rubber compacted with zinc oxide. In order to identify the chemical composition of the waste, a microanalysis was carried out. Indeed the punctual analysis by EDS measures the relative composition of organic matter and minerals. The microstructure of the waste was observed using a Jeol-type scanning electron microscope (SEM), JSM-6360 LV. The results are shown in Fig. 4 .

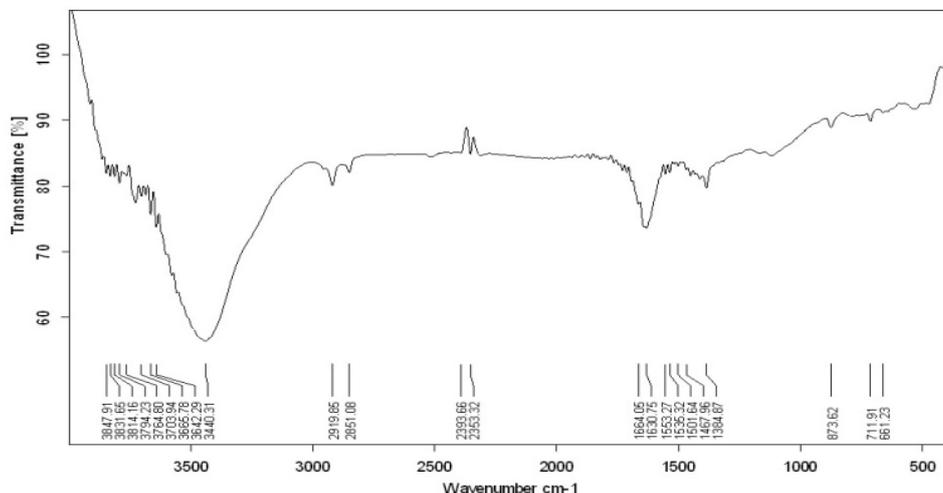


Fig. 3 FT-IR Spectra of rubber

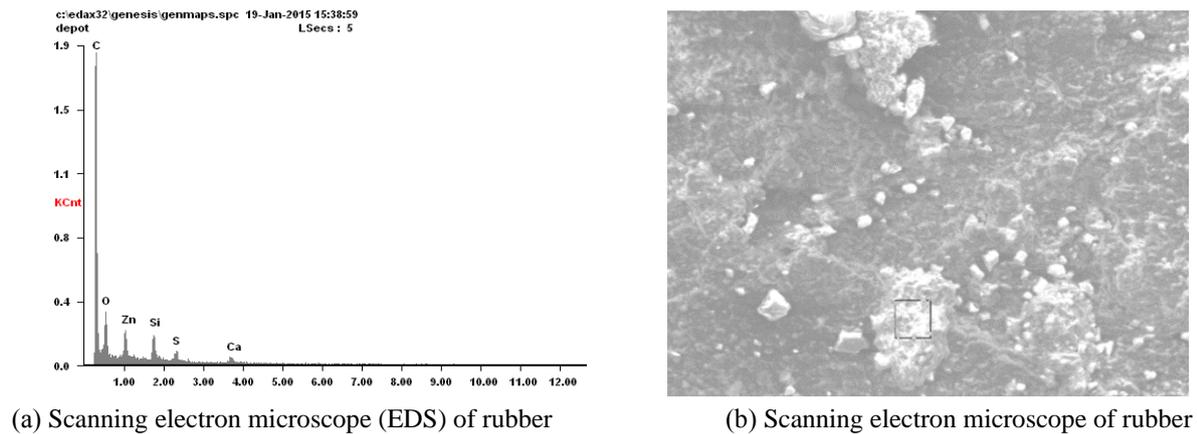


Fig. 4 Scanning electron microscope

Table 1 Physical properties of rubber crumb

Test	Result
Methylene blue value (MBV) g/l	0.67
Relative Compaction(%)	68.81
Porosity (%)	31.19
Density (kg/m ³)	0.54

Table 2 Basic chemical analysis was of fine and normal gravel

Elements	Gravel 3/8 (%)	Gravel 8/15 (%)
Insoluble materials (silica SiO ₂ +silicates)	98.2	8.61
Iron oxide (Fe ₂ O ₃) and alumina oxide (Al ₂ O ₃)	3.08	2.98
Chloride (NaCl)	0.41	0.29
Sulfates (CaSO ₄ -2 H ₂ O)	Traces	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	85.47	89.74
Carbone dioxide (CO ₂)	37.61	39.49
Fire loss at 1050°C	41.13	40.43
Water content (H ₂ O)	3.52	0.94
Chemical balance weight	100.68	102.56

The morphology of the rubber (Fig. 4(b): view of the surface) shows that this material exhibits heterogeneous dense structure, the distribution of the different components is not uniform. We note also that a grey color is recognized to the rubber polymeric chains and the white color is attributed to zinc grains (Ketta, *et al.* 2004, Lyacia *et al.* 2019). The density of this material is 1.22 measured relative to ethanol, which has a density of 0.79. The physical properties of the rubber crumbs are summarized in Table 1.

2.2 Aggregates

Table 2 and Table 3 summarizes, respectively, the basic chemical analysis and the main physical properties of aggregates 3/8 and 8/15. The important values of the soluble ratio (carbonates-CaCO₃) in the analyzed gravel samples with respectively 85.47% and 89.74% indicate that these two gravels have a calcareous character.

Table 4 and Table 5 summarizes, respectively, the basic chemical analysis and the main physical properties of dunes and natural sands. The important values of the ratio of

Table 3 Physical properties of fine and normal gravels 3/8 and 8/15

Test	Fine gravel 3/8	Normal gravel 8/15
Flatness coefficient%	26	8.58
Micro-Deval%	38.4	18.2
Los-Angeles%	34.89	21.73
Apparent density g/l	1310	1416
Absolute density g/l	2500	2500
Compactness%	52.4	56.64
Porosity%	47.6	43.36

Table 4 Physical properties of dunes and natural sand

Test	Dunes sand	Natural sand
Fineness modulus (FM)	1.04	3.08
Sand equivalent (SE) %	91.52	89.49
Friability (%)	21	39.2
Apparent density g/l	1870	1452
Absolute density g/l	2564.1	2564.1
Compactness%	72.93	56.63
Porosity%	27.07	43.37

Table 5 Basic chemical analysis of dunes and natural sands

Elements	Dunes sand (%)	Natural sand (%)
Insolubles (silica SiO ₂ +silicates)	94.86	86.07
Iron oxide (FeO ₃) and alumina oxide (Al ₂ O ₃)	0.81	5.38
Chloride (Na Cl)	0.23	0.58
Sulfates (CaSO ₄ , 2 H ₂ O)	Traces	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	4.98	8.55
Carbone dioxide (CO ₂)	2.28	3.76
Fire loss at 1050°C	2.31	4.43
Water content (H ₂ O)	0.6	0.67
Chemical balance weight	/	101.25

insoluble materials (silica SiO₂+silicates) in the analysis are respectively 94.86% for dunes sand and 86.07% for natural sand, indicating that these two materials have a siliceous character.

The mixing water used for the manufacture of concrete is water tape without additional treatment and does not

Table 6 Composition of one cubic of DSCR and OCR

Rubber	0%		1%		2%		3%		4%		5%	
	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR
Components (kg/ m ³)	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR	OCR	DSCR
Cement	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Admixture	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
Natural sand	535	-	529	-	524	-	519	-	513	-	508	-
Dunes sand	-	1541.7	-	1526	-	1510	-	1495	-	1480.1	-	1464.7
Rubber Crumb	0	-	5.35	15.41	10.7	30.82	16.05	46.25	21.4	61.66	26.7	77.07
Fine Gravel 3/8	164	-	164	-	164	-	164	-	164	-	164	-
Normal Gravel 8/15	1086	-	1086	-	1086	-	1086	-	1086	-	1086	-
Water	180	241.5	180	241.5	180	241.5	180	241.5	180	241.5	180	241.5



(a) Prismatic specimens



(b) Cubic specimens

Fig. 5 Cubic and prismatic specimens (100 mm² ; (70×70×280) mm³)

contain excessive harmful substances such as salts, sulphates and acids. The adjuvant used is the Medaflo SR20 super plasticizer, a 3rd generation water reducer. It is made from a polycarboxylate base that significantly improves the properties of concrete and gives concrete and mortars of the highest quality. The super plasticizer content varies from 1 to 2.5% of the weight of the cement. For cement, CPJ CEM II / A 42.5 NA 442 composite Portland cement was used.

3. Experimental design and procedure

3.1 Preparation of mixture concrete

In this section, the mixtures concrete of Ordinary Concrete Modified by Crumb rubber (OCR) and Dunes Sand only aggregate Concrete modified by Crumb rubber (DSCR) are studied. The amount of rubber is incorporated into the sand for both concrete OCR and DSCR. We prepare at the star Pilot control samples containing 0% rubber, the other samples containing 1%, 2%, 3%, 4% and 5% of rubber (The quantity of rubber is incorporated in the percentage of sand by weight). Table 6 presents the mixer formulation of both concrete OCR and DSCR with different amount of rubber crumb.

3.2 Procedure of control

The hardened concrete tests of OCR are the compressive strength, the tension by the bending strength, and the

concrete relative compaction test. Concerning the compressive strength test, the measurement was carried out on 100 mm cubic samples at the age of 7, 28 and 90 days for all the rubber contents. The aim was to assess the change in compressive strength depending on the age of the concrete and the rubber content. The tension by the bending strength, measurements were made on prismatic specimens (70×70×280) mm³. The test was carried out at 28 days to observe the variation of the concrete's tension by bending strength against various rubber contents.

Fig. 5. In order to properly simulate the behavior of DSCR, Prismatic specimens of dimensions (40×40×160) mm³ were adopted for all compositions for measure the tension by the bending strength. The compressive strengths are obtained by crushing the cubes of dimensions (40×40×40) mm³. The specimens were cured in water for 28 days at a constant temperature of 25°C.

4. Results and discussions

4.1 Slump test and workability

Slump test and density measurements were performed on each concrete mixture. The slump test of OCR results are summarized in Table 7. This table shows that the measured slump increases with the rubber content. In fact, rubber is coarser than sand and will therefore absorb less water.

The workability of DSCR with different rubber contents is summarized in Table 8. The results show that the

Table 7 Slump test of OCR

Rubber content (%)	0	1	2	3	4	5
Measured slump (cm)	5.2	5.4	6.4	7.6	7.8	8.6

Table 8 Workability of DSCR

Rubber content (%)	0	1	2	3	4	5
Workability (s)	8	7.5	7	6	5.5	5

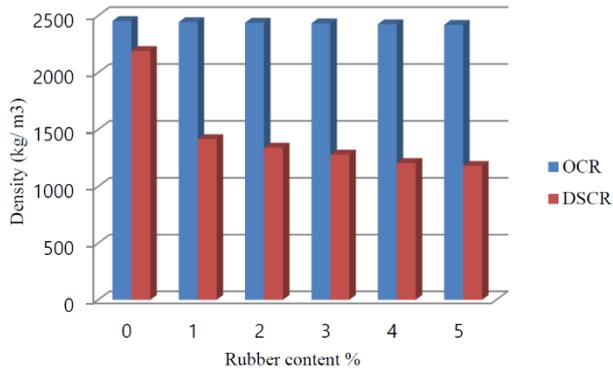


Fig. 6 The density concrete OCR and DSCR

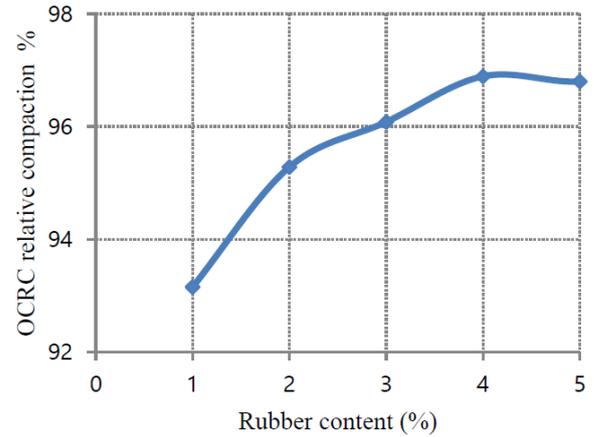
workability of DSCR is improved by increasing the rubber content, which can be justified by the low adsorption of water by the rubber particles, which saves a certain amount of mixing water for other concrete components without varying the ratio W/C, (W/C remains fixed=0, 69).

4.2 Density

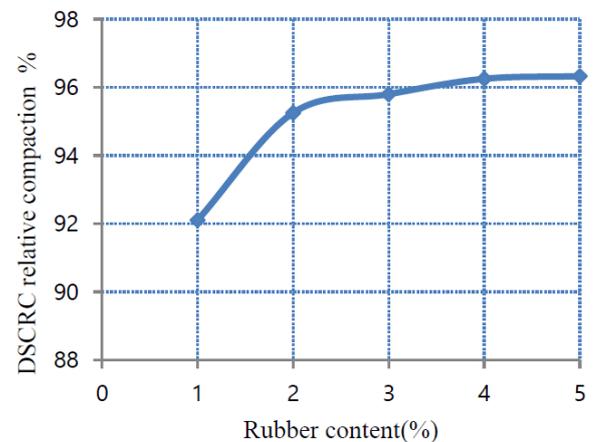
The density concrete values measured for both type concrete OCR and DSCR with different rubber contents are shown in Fig. 6. The results indicate that the concrete density is inversely proportional to the rubber content. This can be explained by the fact that the rubber density (0.54 t/m³) is considerably smaller than sand's density (2,56 t/m³). Due to its fine texture, sand dunes only aggregate concrete is lighter than ordinaryconcretes. The higher the crumb rubber content, the lower the concrete density. The addition of crumb rubber will lighten strongly the DSCR compared to OCR. This is to be interpreted by the large quantity of sand incorporated in the DSCR compared to the OCR. Knowing that the percentage of the crumb rubber is a function of the quantity of sand, for example, for 3% of crumb rubber, the quantities of sand reduced for OCR and DSCR are respectively 47 kg and 16 kg for 1 m³ of concrete, approximately one third (1/3). In addition, it can be noted that the density decreases in an almost linearly.

4.3 Compactness

The Fig. 7 shows the OCR and DSCR relative compaction with different rubber content. It can be seen that the concrete relative compactness of OCR increases from 0 to 1%. The intergranular interstices of the aggregates are progressively occupied by the rubber loads; the volume has been reduced, which slightly increases the settlement between 1% and 5% and most interstices are already filled.



(a) OCR



(b) DSCR

Fig. 7 OCR and DSCR relative compaction against rubber content

Thus, it can be said that the relative compactness stabilizes above 1%. The handling is improved when the rubber content is increased. This is due to the low adsorption of water by the rubber particles, which saves a certain amount of mixing water for the other constituents of the concrete without modifying the water / cement ratio (W/C=0.51).

By gradually increasing the rubber content from 0 to 5% in increments of 1% step, it can be seen that the concrete relative compactness of DSCR shows significant increases at the 1% stage. The inter-granular aggregates gaps were occupied by rubber fillers decreasing so the gaps volume which increases the relative compaction in a lightly noticeable way between 1% and 4% as most of the gaps were already filled. Thus, it can be said that the relative compactness stabilizes above the rubber content of 1%.

4.4 Compressive strength

At this step of measurement, the OCR and DSCR compressive strength were determined according to EN 12390-3, using a 2000 kN capacity hydraulic press machine with an applied loading rate of 0.5 MPa/s. The average values of three cubic specimens at three different ages 7, 28 and 90 days were recorded. The results of the compressive strength tests conducted on the OCR and DSCR mixture

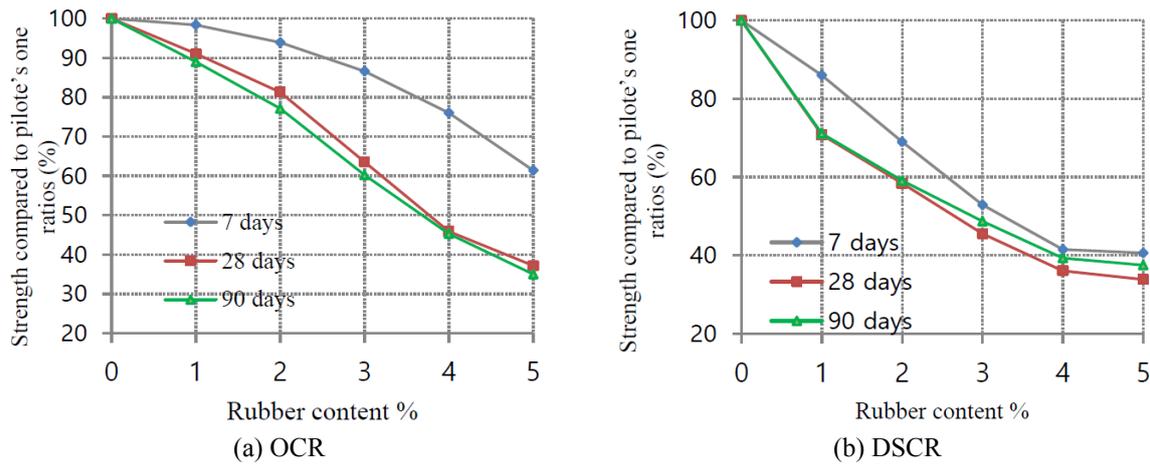


Fig. 8 Ratio of the compressive strength against the pilot's compressive strength according to the rubber content

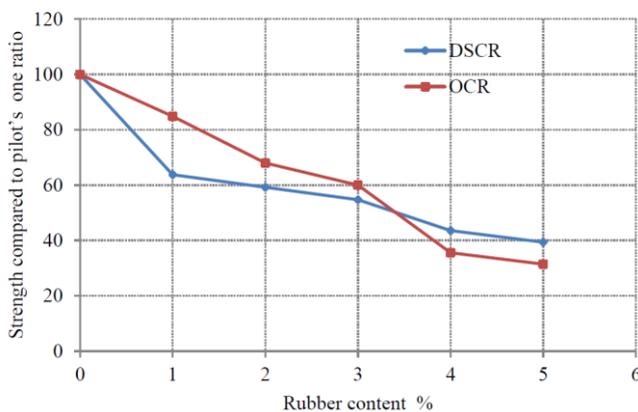


Fig. 9 Ratio between the strength tension of OCR and DSCR with the pilots concrete according to the rubber content

studied are given in Fig. 8. According to this figure, the compressive strength is inversely proportional to the rubber content; the more increased the proportion of rubber, decreased the compressive strength. For a rubber content of 4%, the concrete compressive strength of OCR and DSCR represents respectively 45% and 39% according to the pilot's concrete strength. This is due to the low intergranular cohesion favored by the rubber particles. For the rubber content of 3%, the compressive strength obtained represents a significant percentage of 63% at 28 days and 60% at 90 days of the concrete strength for OCR and 46% at 28 days and 49% at 90 days of the concrete strength for DSCR.

4.5 Tension by bending strength

Fig. 9 shows the reports between the tension of OCR and DSCR concretes and the tension of the pilots concrete according to the rubber content. It can be seen from this figure that the tension by bending strength is inversely proportional to the rubber content. For example, a rubber content of 4%, the strength represents, respectively, 35% and 43% of OCR and DSCR of the witness concrete. This is due to the poor intergranular cohesion favored by the rubber particles. Whereas for a rubber content of 3%, the

tension by bending strength represents an interesting percentage of 60% and 54%, respectively, for OCR and DSCR of the pilot concrete strength.

The analysis results of the compressive and flexural tensile strength tests allow concluding that the content of 3% of crumb rubber introduced is an interesting percentage. This rate of 3% can be considered as an optimal rate

4.6 Concrete behavior in compression

The objective of this part is to study the relationship between the modulus of elasticity and the characteristic strength of concrete and to trace the stress-strain curves in the case of Ordinary Concrete Modified by Crumb rubber (OCR) and Dunes Sand only aggregate Concrete modified by Crumb rubber (DSCR). For the quantification of the elasticity modulus, various construction codes suggest a relationship to the power of 1/3 of the breaking strength of the concrete. BAEL 91 Rules are applicable to sand dunes only aggregate concrete when the artificial portland cement content is greater than 300 kg/m³. Cubic specimens of dimensions (150×150×150) mm³ are used for the optimal compositions. These test pieces were then subjected to extensometry tests, allowing the determination of longitudinal and transverse deformations as well as that of the modulus of elasticity (Young's modulus). Sand dunes only aggregate concretes are more deformable than classic concrete. The instantaneous deformation modulus can be estimated using the formula (Bobinski and Tejchman 2007):

For sand dunes only aggregate concrete

$$E_{id} = 8100 \times f_{cd}^{1/3} \quad (1)$$

For a classic concrete

$$E_{id} = 11000 \times f_{cd}^{1/3} \quad (2)$$

Where "d" is the concrete age by day. The differed deformation modulus can be deduced by the formula

$$E_{vd} = \frac{1}{3} E_{id} = 2700 \times f_{cd}^{1/3} \quad (3)$$

With: E_{id} Instant Elasticity Modulus, E_{vd} Delayed Elasticity Modulus, f_{cd} Compression strength to D days. In the present study, relative strains have been measured

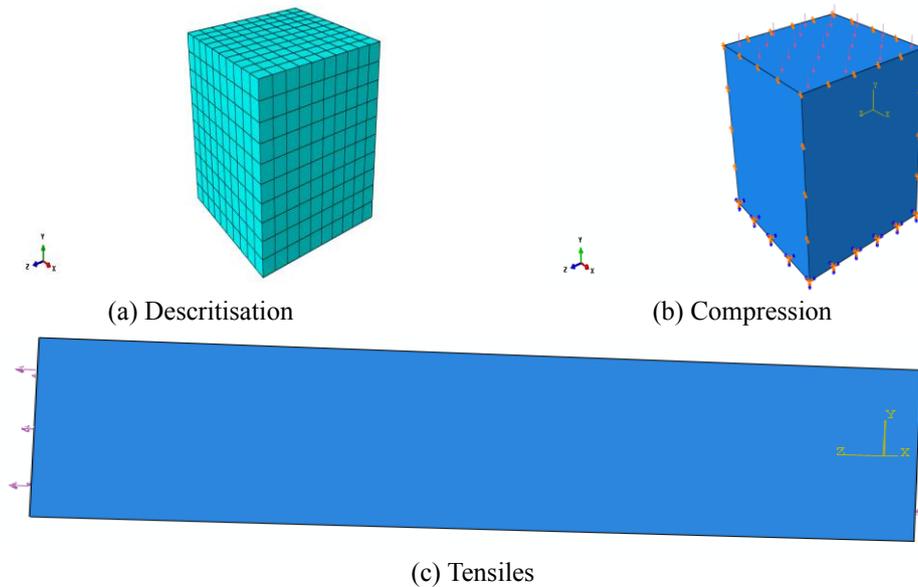


Fig. 10 Numerical model of a cubic specimen ($150 \times 150 \times 150$) mm³

under load in order to assess the behavior: low (stress-strain). Here, 150 mm-cubic test pieces fitted with electrical wire gauges that measure the strains in two directions (longitudinal and transversal) have been used (Hosseinpour and Abbasnia 2014). These tests consisted in applying a 20 kN incremental compression load at an average speed of 15 kN/s. For each load increment, the longitudinal and transversal strains are recorded. The tests were performed on DSCR 3% and OCR 3% mixtures.

5. Numerical modeling

Based on the behavior of modified ordinary concrete and modified dunes sand concrete, experimentally determined, both types of concrete can be modeled. The numerical analysis is mainly based on ordinary concrete (OCR 3%) and dunes sand (DSCR 3%). The numerical model is a prismatic specimen ($150 \times 150 \times 150$) mm³, subjected to compressive and tensile stress tensile ranging from 0 to 30 MPa (Hamid 2019). According to the experimental analysis, the elasticity modulus of OCR 3% is $E1=23342$ MPa and that of DSCR 3% can be $E2=12748$ MPa, the Poisson's ratio (ν) is taken equal to 0.2. The numerical model of the specimen is discretized by finite elements using the software ABAQUS. The figure 10 represents the discretization of the analyzed numerical model.

By varying the compressive stress applied to the specimen of OCR 3%, whose elasticity modulus ($E1$) and poison ratio (ν) equal respectively to 23342 MPa and 0,2. The maps of the following figures represent the longitudinal distribution strain generated by the compressive stress.

On the other hand, numerical analysis requires the modeling of DSCR 3% having a elasticity modulus ($E2=12748$) and a Poisson ratio ($\nu=0.2$) with various applied constraints to the specimens, the longitudinal distributed strains of this type of concrete are represented in

the following figures. By applying the tensile constraints on the prismatic specimen ($70 \times 70 \times 280$) mm³, the following table groups the numerical values longitudinal strain of two types of concrete modified (OCR 3% and DSCR 3%). According to the numerical and experimental analysis of ordinary concrete and dune sand concrete, the following figures represent the stress-strain curves.

6. Results and discussions

- The representative stress-strain curves for each series showed a typical three stage.
 - 1st Stage: an almost linear elastic behavior of the concrete. For the DSCR, this stage corresponds to an elastic deformation $\epsilon_{el}=0,42\%$ which a stress of $\sigma=5$ MPa (55% of the one-axial stress) whereas for the OCR it is equal to $\epsilon_{el}=0,38\%$. The gradient at this curve origin is the longitudinal deformation modulus at the origin.
 - 2nd stage: this stage is characterized by a parabolic shape of the longitudinal stress-strain curve up to a threshold corresponding to the maximum stress of each specimen.
 - 3rd stage: this stage is characterized by a generalized cracking. The strain increases while the failure stress decreases. This phenomenon is observed on the longitudinal stress-strain curve of both concretes as a downward branch of which the slope represents the more or less marked brittle nature of the concrete. The dunes sand only aggregate concrete is less brittle since this slope is practically horizontal while it is almost vertical for the ordinary concrete which reflects its brittleness.
- The longitudinal strain modulus at the origin is given by the tangent to the longitudinal stress-stress curve. For OCR 3%, E was found to be 23342 MPa, while for the DSCR mixture at 3% rubber, $E=12748$ MPa. The

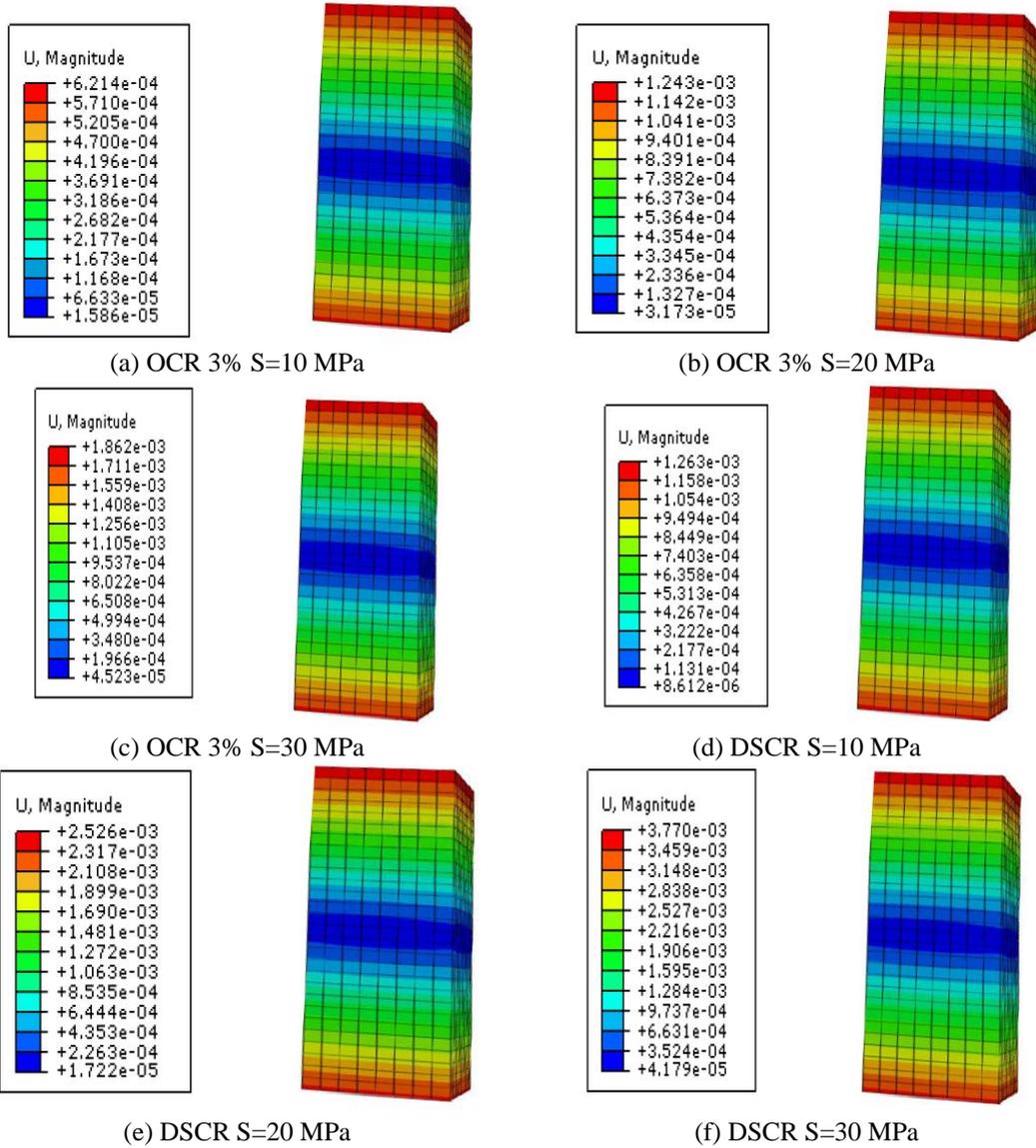


Fig. 11 Distributed longitudinal strain

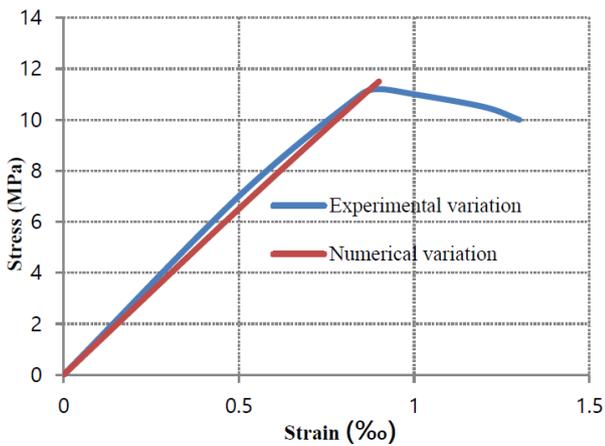


Fig. 12 Stress-strain of curve OCR 3%

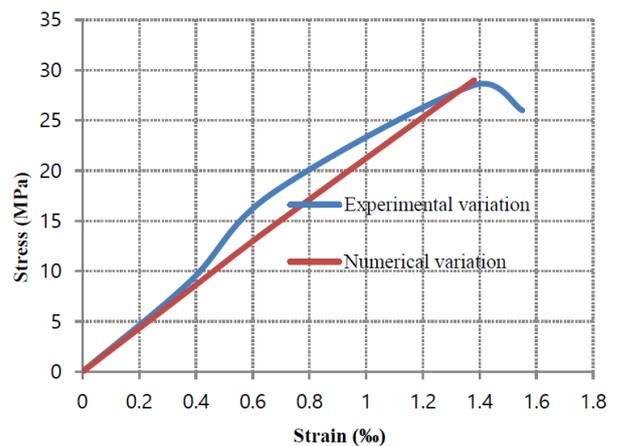


Fig. 13 Stress-strain curve of DSCR 3%

elasticity modulus of dunes sand only aggregate concrete is apparently small compared to ordinary concrete.

- Finally, a numerical verification is carried out by implementing non-linear Finite Element Analysis (FEA) using ABAQUS software. The reliability of the FE

models is demonstrated by a comparison with the experimental results, which shows good agreement of both types of modified concrete (OCR and DSCR) in terms of stress-strain curves and failure load of two concretes with optimal rubber content (3%). Therefore, ABAQUS software can be used to predict the capacity of the modified concrete with rubber crumbs on the construction sites while respecting the optimum of the crumb rubber demonstrated in the experimental study (3%).

7. Conclusions

The work presented in this study focuses on the possibility of using the crumb rubber in the ordinary concrete and Dunes Sand only aggregate Concrete the dunes sand only aggregate concrete. The incorporation of crumb rubber into dunes sand only aggregate concrete (DSCR) represents a dual opportunity: the first is the value enhancement of sand dunes, which represents a significant percentage of local materials in some countries of the world and the second is the recovery the waste resulting from worn tires which are present in high non recovered quantities. This opportunity can potentially solve a triple problem: environmental protection by reducing waste storages areas and the resulting contamination, economic and technical issues encountered in the construction fields due to the scarcity of building materials.

The experimental study of the tested mixtures has shown that the addition of small percentages of rubber to sand dunes only aggregate concrete and ordinary concretes is not recommended if the strength is the main objective. However, a well chosen amount of additives often leads to improve the characteristics and properties of the mixtures, an excess can sometimes lead to the contrary.

Therefore, it can be concluded from the present study that:

- The ratio 3 is the optimal that has a significantly amount of usable rubber waste, while preserving the main characteristics of the concrete compared to the 4 and 5% where the concrete has a significant loss of these properties.
- Owing to its small particle size distribution, dunes sand only aggregate concrete is lighter than ordinary concrete. Adding the crumb rubber will even lighten them because of the introduction of rubber particles with porous structure in a heavier and denser cement matrix. This decrease is almost linear.
- The workability is improved when the rubber content is increased. This aspect is explained by the weak water absorption by rubber particles which saves a certain amount of mixing water for other concrete constituents; (Topçu and Bilir 2009, Hilal 2017).
- The compressive strength decreases as the incorporated rubber content increases;
- Mechanical properties of dunes sand only aggregate concrete modified concrete compared with those of ordinary one with the same rubber content are not in favor of using it in structural elements. Nevertheless, dunes sand only aggregate can be used as a material for pavement borders, decorative elements, roads separation

in motorways,...

- A good agreement was obtained between experimental and proposed model results

References

- Abdeldjalil, B., Djaffar, S.B. and Kheireddine, A. (2019), "Influence of tire rubber aggregates on the physico-mechanical properties of cement mortars", *Int. J. Sust. Build. Tech. Urban Develop.*, **10**(1), 2-14. <https://doi.org/10.22712/susb.20190002>.
- Benaissa, A., Morlier, P. and Viguier, C. (2000), "Microstructure du Béton de Sable", *Cement. Concret. Res.*, **30**(5), 703-711. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90017-4).
- Benbellil, B., Kebdani, S., Mitiche Kettab, R. and Benbouras, M.A. (2018), "Comparative modelling of seismic performance of I-shaped reinforced concrete shear walls", *Urban. Arch. Constr.*, **10**(1), 29-46.
- Benouadah, A., Beddar, M. and Meddah, A. (2017), "Physical And mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber", *J. Fund. Appl. Sci.*, **9**(2), 623-635. <https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2.1>.
- Benzahar, H.H. (2019), "Theoretical and numerical analysis of stress and stress intensity factor in bi-material", *Int. J. Struct. Integ.*, **10**(1), 76-84. <https://doi.org/10.1108/IJSI-08-2018-0048>.
- Bravo, M. and Brito, J. (2012), "Concrete made with used tyre aggregate: durability related performance", *J. Clean. Prod.*, **25**, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.066>.
- Festa, J. (1998), *Nouveau Guide du Béton et de Ses Constituants*, Eyrolles Huitième Edition, Paris, France.
- Hilal, N.N. (2017), "Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content", *Int. J. Sust. Built Envir.*, **6**(1), 191-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijse.2017.03.001>.
- Hosseinpour, F. and Abbasnia, R. (2014), "Experimental investigation of the stress-strain behavior of FRP confined concrete prisms", *Adv. Concret Constr.*, **2**(3), 177. <https://doi.org/10.12989/acc.2014.2.3.177>.
- Karakurt, C. (2015), "Microstructure properties of waste tire rubber composites: An overview", *J. Mater. Cycl. Waste Manage.*, **17**, 422-433. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0263-9>.
- Kettab, R., Bali, A. and Fleureau, J.M. (2004), "Modified bituminous concrete", *International Conference Sustainable Waste Management and Recycling Challenge and Opportunities*, Londres.
- Kettab, R., Bali, A. and Alliche, A. (2007), "Rubber modified sand concrete for waste management", *Int. J. Nucl. Energ. Sci. Technol.*, **3**(1), 63-75. <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2007.012441>.
- Khaloo, A.R., Dehestani, P. and Rahmatabadi P. (2008), "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles", *J. Wast. Manag.*, **28**, 2472-2482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.015>.
- Kromoser, B. and Huber, P. (2016), "Pneumatic formwork systems in structural engineering", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2016**, Article ID 4724036. <https://doi.org/10.1155/2016/4724036>.
- Lyacia, S., Ratiba, M.K. and Djaffar, S.B. (2019), "Evaluation of the workability, marshall parameters, and the stiffness modulus of rubber modified bituminous concrete", *Int. J. Sust. Build. Tech. Urban Develop.*, **10**(2), 43-55. <https://doi.org/10.22712/susb.20190006>.
- Marzec, I., Bobinski, J. and Tejchman, J. (2007), "Simulations of spacing of localized zones in reinforced concrete beams using elasto-plasticity and damage mechanics with non-local softening", *Comput. Concrete*, **4**(5), 377-402. <https://doi.org/10.12989/cac.2007.4.5.377>.
- Meddah, A., Bensaci, H. and Bali, A. (2017), "Study of effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the

- performance of rubberized roller-compacted concrete pavement”, *Innov. Infrastr. Solut.*, **2**(1), 17. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0068-5>.
- Sablocrete (1994), *Beton de Sable*, Presse de L’Ecole Nationale des Ponts Et Chaussees, Paris, France.
- Segre, N. and Joekes, I. (2000), “Use of tire rubber particles as addition to cement paste”, *J. Cement Concret Res.*, **30**, 1421-1425. <https://doi.org/10.1016/j.wasman>.
- Tayeh, A.I. (2013), “Effect of replacement of sand by waste fine crumb rubber on concrete beam subject to impact load: experiment and simulation”, *Civil Eng. Res.*, **3**(13), 165-172.
- Topçu, İ.B. and Bilir, T. (2009), “Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete”, *Mater. Des.*, **30**(8), 3056-3065. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.011>.
- Xu, J., Fu, Z., Han, Q., Lacidogna, G. and Carpinteri, A. (2018), “Micro-cracking monitoring and fracture evaluation for crumb rubber concrete based on acoustic emission techniques”, *Struct. Hlth. Monit.*, **17**(4), 1-13. <https://doi.org/10.1177/1475921717730538>.
- Yahiaoui, W., Kenai, S., Menadi, B. and Kadri, E. (2017), “Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate”, *Adv. Concrete Constr.*, **5**(3), 271-288. <https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.3.271>.
- Youssf, O., Mills, J.E. and Hassanli, R. (2016), “Assessment of the mechanical performance of crumb rubber concrete”, *Constr. Build. Mater.*, **125**, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.040>.
- Yung, W.H., Yung, L.C and Hua, L.H (2013), “A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete”, *Constr. Build. Mater.*, **41**, 665-672. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>.

JK

NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 145 est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le MEDAFLOW 145 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le MEDAFLOW 145 ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

• Forme.....	Liquide
• Couleur.....	brat clair
• pH.....	5 - 6
• Densité.....	1.065 ± 0,015
• Teneur en chlore.....	< 1g/L
• Extrait sec.....	30±1,5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 145 permet :

- Sur béton frais :**
- l'obtention d'un E/C très bas
 - Béton plastiques à fluides
 - une très bonne maniabilité
 - un long maintien de l'ouvrabilité
 - de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferrailage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,33 à 1,8 litre pour 100 Kg de ciment.

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

MODE D'EMPLOI

Le MEDAFLOW 145 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le MEDAFLOW 145 peut être combiné à un retardateur de prise MEDARETARD GR.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAFLOW 145 est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg et cubitainer 1100 kg

Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Précaution d'emploi:
Manipulation non dangereuse.

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

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



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

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

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



L'ESPRIT BÂTISSEUR

قرانيتكس مواد جديدة

Granitex nouveaux produits

SPA AU CAPITAL DE 384.445.800,00 DA - Reg.Com. Alger 99 B 0008760
Art d'Imp. 16151565011 - Imm.Fisc. 098416150069524

Bon d'échantillons

N° 000058

Oued-Smar le,

Cliant : MEZINI AMAR
Nom du contact :
N° de tél : 0668 215 936
E-mail : AOMER2002@yahoo.fr

Projet : de DOCTORAT

Bétons modifiés par polymère de caoutchouc

Suivi par : TUNANOVINE

NA SSI MA

DESIGNATION	QUANTITE
Meda flow 145	05 litres

Signature: [Signature]

Stamp: [Stamp]

Granitex nouveaux produits
Zone industrielle Oued Smar (AGRH) BP85 - 16270
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
Site web : www.granitex.dz
Email : granitex@granitex.dz



APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance

FORMULATION CONSEILLÉE

Ciment 50kg	Sable (sec) 0/5	Gravillons (sec) 8/15mm	Eau (littres)
X 1	+ X7	+ X5 + X4	+ 25 L

Dosage pour béton c25/30

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	8.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



Conditionnement: Sac et vrac

LAFARGE
القاراج

Bureau n°02, 1^{er} étage, tour Geneva, les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55

A member of
LafargeHolcim

ALGÉRIE

ماتين MATINE

50kg



LAFARGE
Construire
des villes meilleures™

Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/A-L 42.5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine

NA442 CEM II/A-L 42.5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.



A member of
LafargeHolcim