

Université 20Aout 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département : Génie Civil

Ref : D012120013D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم : الهندسة المدنية

المرجع : D012120013D

Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de
Doctorat en sciences

En Génie Civil

Option : Géo-matériaux

**Elaboration et caractérisation physico-chimique
d'un béton à base de caoutchouc**

Présentée par : **KECHKAR Chiraz**

Soutenue publiquement le : 09/07/2020

Devant le jury composé de :

Président	MESSAST Salah	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur	BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma
Co-Rapporteur	CHERAIT Yacine	Professeur	Université de Guelma
Examineur	OUCIEF Houcine	Professeur	Université d'Annaba
Examineur	HEBHOUB Houria	M.C.A	Université de Skikda
Examineur	BENSEBTI Salah Eddine	M.C.A	Université de Constantine1

REMERCIEMENTS

Je voudrais avant tout remercier **ALLAH**, le Très Haut, le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté et le courage de mener à terme ce travail de thèse de doctorat.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse qui a été menée au sein du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH) de l'Université de Guelma.

Les travaux ont été réalisés sous la direction scientifique du professeur **Belachia Mouloud** et du professeur **Chérait Yacine** à qui j'adresse mes profonds et sincères remerciements pour m'avoir donné l'occasion de travailler au sein de leur équipe, et aussi pour leurs compétences, pour m'avoir aidé et encouragé, pour leur enthousiasme, leur gentillesse et leur compréhension dans tous les précieux moments qu'ils ont su me consacrer.

Je tiens à renouveler mes remerciements à mon directeur de thèse le professeur **Belachia Mouloud**, pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant d'être le directeur de ce travail. Ses encouragements, sa rigueur scientifique, ses remarques très pertinentes m'ont été d'une grande aide.

Je tiens à manifester ma profonde reconnaissance à mon Co-encadreur le professeur **Chérait Yacine**, pour ses conseils, son aide précieuse, ses qualités scientifiques et humaines, qui m'ont permis de finir ma thèse dans les meilleures conditions.

J'exprime mes vifs remerciements à monsieur **Messast Salah**, professeur à l'Université de Skikda, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens également à remercier Monsieur **Oucief Houcine**, professeur à l'Université d'Annaba, Madame **Habhoub Houria**, maitre de conférences A à l'Université de Skikda et Monsieur **Bensabti Salah Eddine**, maitre de conférences A à l'Université de Constantine 1 pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail. Je leur exprime toute ma reconnaissance pour l'intérêt qu'ils ont porté à la lecture et la critique de ma thèse.

Mes remerciements également aux responsables et techniciennes du laboratoire pédagogique du département de génie civil et d'hydraulique de l'université du Guelma pour leur entière disponibilité.

J'exprime ma profonde gratitude à **Boukour Salima, Nigri Ghania** et **Benamara F. Zohra**, pour leurs encouragements et leurs contributions dans l'accomplissement de cette thèse.

Un remerciement spécial est adressé à tous les enseignants, qui depuis mes débuts au département de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Je ne saurais oublier les responsables, les ingénieurs et les techniciens du laboratoire pédagogique de chimie de l'université de Guelma et du laboratoires de l'école Nationale Supérieure des Mines et des Métallurgies d'Annaba pour m'avoir accueillie et aider à réaliser certains essais.

Je tiens à remercier très tendrement mon mari pour son soutien indéfectible et ses encouragements, mes enfants : **Nour El-Islem** et **Raid**. Du fond du cœur : MERCI.

Finalement je tiens à exprimer mon immense gratitude à ma famille pour son soutien et ses encouragements pour la poursuite de ma thèse.

A tous : MERCI

Dédicace

A la mémoire de mon père

A ma mère

A mon mari

A mes enfants

A mes Frères et Sœurs

A toute ma famille

A tous mes Amis.

RESUME

Une grande partie des déchets industriels, dont notamment les pneus usagés s'accumulent chaque jour d'avantage dans la nature constituant une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Dans le but de préserver d'avantage notre environnement et face aux évolutions de la législation en vigueur au niveau local et international, plusieurs opérations de valorisation de sous-produits et autres déchets ont été entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction.

Le présent travail s'inscrit dans cette vision et a pour but principal objectif de contribuer à l'étude des propriétés mécaniques et la durabilité des bétons élaborés à partir de granulats de pneus usagés. Pour atteindre cet objectif, nous avons envisagé la substitution d'une partie du sable par des granulats de caoutchouc dans des proportions volumiques variant entre 10 et 25%. Une comparaison des résultats avec un béton de référence a été établie.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence que cette substitution, s'accompagne d'une baisse des performances mécaniques et d'une augmentation du gonflement du béton dans l'eau. Par contre, cette substitution améliore la résistance dans les milieux agressifs tels que les attaques aux acide sulfurique H_2SO_4 , sulfate de sodium Na_2SO_4 et l'eau de mer. Les critères choisis étant la mesure des pertes et de gains en masse, ainsi que la perte en résistances mécaniques particulièrement à long terme (au-delà de 90jours). Nous avons également observé une diminution du retrait de séchage, ce qui s'accompagne d'une baisse du nombre de fissures microscopiques et d'une amélioration de la durabilité du béton.

MOTS CLES : *Béton –Déchets pneus -Durabilité - Milieux agressifs – Performances mécaniques.*

ملخص

يتراكم جزء كبير من النفايات الصناعية، بما في ذلك الإطارات المستعملة، كل يوم في الطبيعة، مما يشكل مصدراً محتملاً للمشاكل البيئية والاقتصادية الرئيسية. من أجل الحفاظ على البيئة بشكل أفضل ومواجهة التغييرات في التشريعات المعمول بها على المستوى الوطني والدولي، تم اتخاذ العديد من إجراءات الاسترداد و رسكلت هذا النوع من النفايات لا سيما في مجال مواد البناء.

يعد العمل الحالي جزءاً من هذه الرؤية ويهدف أساساً إلى المساهمة في دراسة الخواص الميكانيكية وديمومة الخرسانة المصنوعة من حبيبات مطاطية الناتجة عن إعادة تدوير الإطارات المستعملة. للوصول إلى هذا الهدف، قمنا باستبدال جزء من حجم الرمل بحبيبات مطاطية بنسب تتراوح ما بين 10% و 25%. ثم قمنا بمقارنة النتائج المتحصل عليها مع الخرسانة المرجعية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن استبدال نسبة من الرمل بحبيبات المطاط في تركيبة الخرسانة يؤدي إلى انخفاض في الخصائص الميكانيكية ويزيد من حجم الخرسانة في الماء من جهة، ومن جهة أخرى، هذا الاستبدال يحسن من مقاومة الخرسانة للتشوه إثر التعرض لهجمات من أوساط عدوانية مثل حمض الكبريت H_2SO_4 ، كبريتات الصوديوم Na_2SO_4 ومياه البحر. المعايير المختارة هي قياس الزيادة أو النقصان في الكتلة، وكذلك نقصان المقاومة الميكانيكية خاصة على المدى الطويل (بعد 90 يوماً). لاحظنا أيضاً نقصاناً في الانكماش، وبالتالي انخفاض في عدد التشققات الميكروسكوبية وبذلك تحسين ديمومة الخرسانة.

كلمات مفتاح: الخرسانة - نفايات الإطارات - الديمومة - الأوساط العدوانية - الخصائص الميكانيكية.

ABSTRACT

A large part of industrial waste, in particular used tires, accumulates more every day in nature, constituting a potential source of major environmental and economic problems. In order to better preserve our environment and in the face of changes in legislation in force at local and international level, many recovery actions have been carried out especially in the field of building materials.

The present work is part of this vision and has as main objective to contribute to the study of mechanical properties and durability of concrete based on rubber aggregates. To achieve this objective, we have contemplated incorporating therein amounts of rubber granules according to different volume substitution percentages being 10% and 25%. A comparison of the results with a control concrete has been established.

The obtained results make it possible to demonstrate that the substitution of a percentage of sand by rubber granules decreases the mechanical strengths and increases the expansion in water. On the other hand, it improves the resistance to attack from sulfuric acid H_2SO_4 , sodium sulfate Na_2SO_4 and seawater. The latter is evaluated by the loss and gain in mass as well as the loss in mechanical resistance, especially in the long term (more than 90 days), decreases drying shrinkage, thus decreasing microscopic cracks and providing better durability.

KEY WORDS: Concrete - Waste tire – Durability - Aggressive environments - Mechanical performance.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	I
ملخص.....	II
ABSTRACT.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux.....	XV
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION.....	6
I.2. RECYCLAGE DES DECHETS.....	6
I.2.1. Principes du recyclage.....	7
I.2.2. Chaîne du recyclage	8
I.2.3. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil	8
I.3. QUELQUES DECHETS RECYCLES DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL.....	10
I.3.1. Cendres volantes	10
I.3.2. Les laitiers sidérurgiques.....	10
I.3.3. Déchets de verre.....	11
I.3.4. Granulats recyclés.....	11
I.3.5. Ciment durci.....	12
I.3.6. Déchet de caoutchouc.....	12
I.4. PRINCIPAUX CONSTITUANTS D'UN PNEU.....	14

I.5. ELABORATION DE GRANULES ET POUDRETTE DE PNEUS USAGES.....	15
I.6. CATEGORIES ET PROPRIETES PHYSIQUES DU CAOUTCHOUC DECHIQUETE.....	16
I.7. PROPRIETES DES COMPOSITES A BASE DE DECHETS DE PNEUS USAGES	17
I.7.1. Impact des G.C. sur les propriétés des bétons à l'état frais.....	18
I.7.1.1.Masse volumique.....	18
I.7.1.2. Ouvrabilité.....	19
I.7.1.3. Air occlus	20
I.7.2. Impact des G.C. sur les propriétés des bétons à l'état durci.....	20
I.7.2.1. Masse volumique à l'etat sec	20
I.7.2.2. La résistance à la compression	21
I.7.2.3. Résistance à la traction par fendage.....	25
I.7.2.4. Résistance à la traction par flexion.....	26
I.7.2.5. Module d'elasticité.....	26
I.7.2.6. Retrait.....	27
I.7.3. Impact des G.C. sur les propriétésde durabilité des bétons.....	29
I.7.3.1. Absorption capillaire.....	29
I.7.3.2. Perméabilités à l'air	31
I.7.3.3. Perméabilité à l'eau.....	31
I.8. CONCLUSION.....	33
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES DU PREMIER CHAPITRE	35

CHAPITRE II.

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION	40
II.2. MATERIAUX UTILISES.....	40
II.3. ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LES GRANULATS	41

II.3.1. Analyse Granulométrique	41
II.3.2. Masse Volumique.....	43
II.3.3. Coefficient d'absorption d'eau	44
II.3.4. Mesure de la propreté des granulats	45
- Cas des graviers.....	45
- Cas du sable.....	45
II.3.5 Mesure de la dureté des graviers.....	46
II.4. LE CIMENT	46
II.5. L'EAU DE GACHAGE.....	46
II.6. FORMULATION DES BETONS.....	47
II.6.1. Dosages des bétons.....	47
II.6.2. Confection des éprouvettes	48
II.6.3. Moulage et démoulage	49
II.7. PRESENTATION DES ESSAIS	50
II.7.1. Essais sur béton frais	50
II.7.1.1. Mesure de la consistance.....	50
II.7.1.2. Masse volumique à l'état frais.....	51
II.7.1.3. Essai teneur en air occlus.....	52
II.7.2. Essais sur béton durci	53
II.7.2.1. Propriétés physiques	53
A. Masse volumique à sec (méthode par pesée hydrostatique)	53
B. Absorption par immersion totale.....	53
C. Déformations différées : Retrait et le gonflement.....	54
II.7.2.2. Propriétés mécaniques.....	55
II.7.2.2.1. Essais destructif	55
A. Essai de compression	55
B. Résistance au fendage (ou essai brésilien)	56

C. Essai de traction par flexion.....	57
II.7.2.2.2. Essais non destructif.....	57
A. Essai par Ultra-son	58
B. Essai du scléromètre.....	59
II.7.2.3. Durabilité	60
II.7.2.3.1. Porosité accessible à l'eau.....	60
II.7.2.3.2. Absorption d'eau par capillarité.....	60
II.7.2.3.3. Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau sous pression).....	62
II.7.2.3.4. Perméabilité à gaz.....	62
II.7.2.3.5. Essai d'attaques chimiques.....	63
II.8. CONCLUSION.....	66
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES DU DEUXIEME CHAPITRE	67

CHAPITRE III.

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES

PARTIE A : ETATS FRAIS ET PERFORMANCES MECANIQUES.....	69
III.1. INTRODUCTION.....	69
III.2. RESULTATS ET INTERPRETATION.....	69
III.2.1. A l'état frais.....	69
a) Essai d'affaissement.....	69
b) Masse volumique à l'état frais.....	71
c) Teneur en air occlus.....	72
III.2.2. A l'état durci.....	74
III.2.2.1. Caractéristiques physiques	74
a) Masse volumique à sec.....	74
b) Absorption par immersion totale.....	75
c) Déformations différées.....	76

- Le retrait libre.....	76
- Gonflement.....	77
III.2.2.2. Caractéristiques mécaniques.....	78
a) Résistance à la compression à 28 jours.....	78
- Résistance à la compression à 28 jours par presse.....	78
- Résistance sclérométrique à la compression à 28 jours.....	80
b) Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton	81
- Structure interne des bétons.....	84
c) Résistance à la traction par flexion à 28 jours.....	84
d) Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du	85
béton.....	
e) Résistance au fendage à 28 jours d'âge.....	86
f) Module d'élasticité dynamique	88
PARTIE B : PARAMETRES DE DURABILITE DU BETON.....	91
III.2.1. Durabilité.....	91
III.2.1.1. La porosité accessible à l'eau.....	91
III.2.1.2. Absorption d'eau par capillarité.....	93
III.2.1.3. Perméabilité à l'eau	95
III.2.1.4. Perméabilité apparente aux gaz.....	96
III.2.1.5. Attaque à l'acide sulfurique H₂SO₄.....	97
a) Perte de masse.....	98
b) Résistance à la compression.....	99
III.2.1.6. Attaque au sulfate de sodium Na₂SO₄.....	101
a) Gain de masse.....	101
b) Résistance à la compression.....	103
c) Résistance à la traction par flexion	104
III.2.1.7. Attaque à l'eau de mer.....	105
a) Gain en masse.....	105

b) Résistance à la compression.....	106
c) Résistance à la traction par flexion.....	108
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES DU TROISIEME CHAPITRE	109
CONCLUSIONS GENERALES.....	114
PERSPECTIVES.....	117

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I.

Figure I.1. La cendre volante.....	10
Figure I.2. Les laitiers sidérurgiques.....	11
Figure I.3. Déchets de verre.....	11
Figure I.4. Déchets de pneus usagés.....	13
Figure I.5. constituants d'un pneu.....	14
Figure I.6. Différentes étapes de déchiquetage des pneus.....	16
Figure I.7. Différentes granulométrie obtenues lors de déchiquetage des pneus.....	17
Figure I.8. Variation de la masse volumique du béton incorporant des granulats en caoutchouc	18
Figure I.9. Valeurs d'affaissement par rapport à la taille du granulat de caoutchouc.....	19
Figure I.10. Variation de la teneur en air du béton incorporant des granulats en caoutchouc.....	20
Figure I.11. Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage de substitution des GN par les GC.....	21
Figure I.12. Comparaison de la résistance à la compression des bétons a différents pourcentage de substitution par des granulats de caoutchouc.....	22
Figure I.13. Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution.....	22
Figure I.14. L'effet de la substitution du sable par des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression pour les deux groups.....	23
Figure I.15. Résistance a la compression des bétons en (N/mm ²) en fonction du pourcentage du caoutchouc à 28 jours.....	24
Figure I.16. Variation résistance à la traction par fendage en fonction du taux de substitution et la taille des granulats de caoutchouc.....	25

Figure I.17. Influence du taux de substitution en granulat de caoutchouc sur le module d'élasticité.....	27
Figure I.18. Variation du retrait de séchage en fonction du temps : effets du taux de substitution en granulat de caoutchouc.....	28
Figure I.19. Influence des gnulats de caoutchouc. sur le retrait de séchage.....	28
Figure I.20. Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps mesurée sur une pâte de ciment.....	30
Figure I.21. Évolution de taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour les différents dosages en GCR.....	30
Figure I.22. Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des granulats de caoutchouc.....	31
Figure I.23. Résultats de la profondeur de perméabilité à l'eau.....	32
Figure I.24. Profondeur de perméabilité à l'eau des échantillons de mortier caoutchouté fibré.....	33

CHAPITRE II.

Figure II.1. Matériaux utilisés pour la formulation des bétons.....	41
Figure II.2. Tamiseuse utilisée pour l'essai d'analyse granulométrique.....	41
Figure II.3. Courbes granulométriques des graviers 3/8 et 5/15.....	42
Figure II.4. Courbes granulométriques du sable et de la poudrette de caoutchouc	42
Figure II.5. Mesure des masses volumiques absolue et apparente.....	43
Figure II.6. Machine d'équivalent de sable.....	45
Figure II.7. Traçage de la courbe de référence.....	48
Figure II.8. Bétonnière utilisée.....	49
Figure II.9. Mise en place du béton et la conservation des éprouvettes.....	50
Figure II.10. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	51
Figure II.11. Essai masse volumique du béton frais.....	52
Figure II.12. Essai teneur en air occlus.....	52
Figure II.13. Dispositif d'essai par pesée hydrostatique.....	53
Figure II.14. Mesure de retrait à l'aide d'un rétractomètre digital.....	54

Figure II.15. Presse utilisée pour l'essai de compression.....	55
Figure II.16. Schéma essai brésilien.....	56
Figure II.17. Réalisation essai traction par fendage.....	56
Figure II.18. essai de traction par flexion.....	57
Figure II.19. Appareil à ultrason.....	58
Figure II.20. Photo du scléromètre utilisé.....	59
Figure II.21. Dispositif essai de capillarité.....	61
Figure II.22. Photo du perméabilimètre à l'eau utilisé.....	62
Figure II.23. Photo du perméabilimètre à gaz utilisé.....	63
Figure II.24. Acide sulfurique (H_2SO_4) et sulfate de sodium (Na_2SO_4) utilisés.....	65
Figure II.25. Conservation des éprouvettes dans les différents milieux.....	65

CHAPITRE III.

Figure III.1. Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de caoutchouc.....	70
Figure III.2. Distribution des particules de caoutchouc dans une éprouvette BC25% écrasée par fendage.....	71
Figure III.3. Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution.....	72
Figure III.4. Valeurs de l'air occlus pour les quatre formulations étudiées.....	73
Figure III.5. Valeurs de la masse volumique pour les quatre formulations.....	74
Figure III.6. Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les quatre formulations.....	75
Figure III.7. Evolution du retrait de sechage dans le temps.....	76
Figure III.8. Variation du gonflement total dans le temps.....	77
Figure III.9. Résistances en compression des bétons.....	79
Figure III.10. Résistances en compression des bétons déterminées par le scléromètre.....	80
Figure III.11. Résistances à la compression à l'âge de 14, 42, 56, 72, 120 et 210 jours.....	82
Figure III.12. Evolution de la résistance a la compression dans le temps pour les quatre bétons étudiés	83

Figure III.13. Observation au MEB de la microstructure interne des bétons BO et BC25%.....	84
Figure III.14. Résistance en traction par flexion des bétons à l'âge de 28 jours....	85
Figure III.15. Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour les quatre bétons étudiés.....	86
Figure III.16. Résistances par fendage à 14 jours et 28 jours des bétons étudiés....	87
Figure III.17. Faciées de rupture des éprouvettes sous fendage.....	88
Figure III.18. Variation du module d'élasticité dynamique en fonction du type du béton.....	90
Figure III.19. Valeurs de la porosité accessible à l'eau pour les 04 formulations du béton.....	92
Figure III.20. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	93
Figure III.21. Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps.....	93
Figure III.22. Régression des valeurs d'absorption capillaire en fonction du temps.....	94
Figure III.23. Etapes de mesure de la perméabilité à l'eau.....	95
Figure III.24. Profondeur de pénétration de l'eau.....	96
Figure III.25. Coefficient spécifique de perméabilité $k(m^2)$ des bétons étudiés.....	97
Figure III.26. Variation de la masse des bétons en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4	98
Figure III.27. Variation de la résistance en compression en fonction de la période d'immersion dans 5% de H_2SO_4	100
Figure III.28. Variation de la perte en résistance en compression en fonction de la période d'immersion dans 5% de H_2SO_4	101
Figure III.29. Perte en masse des bétons immergés dans une solution de Na_2SO_4	102
Figure III.30. Résistance à la compression des différents bétons étudiés conservés dans une solution de Na_2SO_4	103
Figure III. 31. Variation du coefficient K_{fi} des différents bétons conservés dans une solution de Na_2SO_4 en fonction du temps.....	104
Figure III.32. Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps des différents bétons conservés dans la solution Na_2SO_4	105
Figure III.33. Gain en masse des bétons immergés dans l'eau de mer.....	106
Figure III.34. Résistance à la compression des différents bétons étudiés conservés dans l'eau de mer.....	107

Figure III.35. Variation du coefficient K_{fi} des différents bétons conservés dans l'eau de mer en fonction du temps.....	107
Figure III.36. Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps de conservation dans l'eau de mer.....	108

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I.

Tableau I.1 : La composition des pneus en masse	15
Tableau I.2 : Coûts potentiels de traitement et de déchiquetage des pneus en Canada	17
Tableau I.3 : Résultats de l'essai de résistance à la compression en (N/mm ²) pour les deux tailles étudiés à différents âges.....	24

CHAPITRE II.

Tableau II.1 : Résultats de l'essai des masses volumiques.....	44
Tableau II.2 : Valeurs du coefficient d'absorption d'eau des granulats.....	44
Tableau II.3 : Valeurs de l'essai de propreté des graviers	45
Tableau II.4 : Valeurs de l'essai d'équivalent de sable.....	45
Tableau II.5 : Valeurs de l'essai de dureté (Los Angeles).....	46
Tableau II.6 : Composition chimique moyenne du ciment CPJ-CEM II/A utilisé.....	46
Tableau II.7 : Formulation des bétons étudiés.....	48
Tableau II.8 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion.....	59

CHAPITRE III.

Tableau III.1 : Valeurs de l'affaissement pour les quatre formulations de bétons.....	69
Tableau III.2 : Masses volumiques des formulations étudiées.....	71
Tableau III.3 : Valeurs de l'air occlus pour les quatre formulations de bétons.....	73
Tableau III.4 : Valeurs de la masse volumique pour les quatre formulations.....	74

Tableau III.5 : Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les quatre formulations.....	75
Tableau III.6 : Résistances ultimes à la compression pour les quatre formulations....	78
Tableau III.7 : Valeurs des résistances à la compression pour les quatre formulations	80
Tableau III.8 : Valeurs des résistances à la traction par flexion pour les quatre formulations	85
Tableau III.9 : Résistances au fendage des bétons étudiés.....	86
Tableau III.10 : Vitesses de propagation pour les quatre formulations du béton.....	88
Tableau III.11 : Valeurs du module d'élasticité des différentes formulations.....	89
Tableau III.12 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau pour les quatre formulations	92
Tableau III.13 : Tableau comparatif des résultats expérimentaux avec des résultats tirés de la littérature.....	97

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau de construction universel utilisé depuis des millénaires à cause de ces nombreux avantages : il possède un excellent comportement mécanique et une bonne durabilité avec une durée de vie comprise entre 50 et 100 ans. Sa formulation est modifiable et adaptable aux contraintes de tout type de structure. Ses performances constamment améliorées rendent ce matériau prédominant dans la construction des ouvrages modernes.

La consommation annuelle de béton atteint les 6 milliards de mètres cube. En Europe, la consommation moyenne était de 528kg par habitant en 2004 et une tonne par habitant en Amérique du Nord. Le béton est la substance la plus exploitée par l'homme après l'eau et le sol. Cependant cette utilisation massive du béton s'est accompagnée d'une exploitation intensive des carrières de granulats (concassées de roche) qui à long terme provoquera un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux.

Au niveau national, la totalité de la production du béton dans le bâtiment et les travaux publics est composée essentiellement de granulats d'origine naturelle. Les contraintes liées à la croissance de la demande pour ce type de granulats, nécessitent le recours à d'autres alternatives que les granulats naturels.

Par ailleurs, l'accumulation des déchets, non dégradables, tels que les pneus usagés, devenant de plus en plus incontrôlable et occupant un espace public, non négligeable, a mis en lumière l'utilisation de ces matériaux dans plusieurs usages, à savoir, des applications dans le domaine de la construction, permettant à la fois, de préserver les ressources naturelles des granulats et d'améliorer les performances et la durabilité des composites cimentaires, sans oublier la protection de l'environnement.

En faite, le caoutchouc est une solution parfaite pour les problèmes de l'environnement. Selon leurs compositions, les pneus sont classés parmi les déchets non dangereux et non dégradables (400 ans environ), mais en raison du risque d'incendies non maitrisables dans les décharges à cause des fumées toxiques dégagées, la stagnation des eaux dans ces endroits, ainsi que les insectes, leur valorisation semble être une obligation plus qu'un choix.

Plusieurs études ont été menées à travers le monde révélant des solutions créatives pour gérer et réduire le volume de pneus usagés qui sont générées chaque année. Parmi les axes les plus étudiés, on trouve l'incorporation des granulats de caoutchouc dans les matrices cimentaires, qui a démontré la possibilité de l'utilisation des granulats de pneus en substitution volumique ou massique des granulats dans les mortiers et les bétons, particulièrement dans le cas où les résistances mécaniques, ainsi que les densités, ne sont pas les principales caractéristiques souhaitées.

Les études ultérieures sur l'incorporation des granulats de caoutchouc issus de pneus usagés dans les matériaux cimentaires ont montrées une amélioration de la ténacité, la ductilité et diminution significative de la résistance à la compression et à la traction.

Le présent travail a pour but d'étudier l'effet de l'incorporation des granulats en caoutchouc sur caractéristiques du béton. On s'est intéressé à l'aspect rhéologique à l'état frais, l'aspect mécanique, physique des bétons, ainsi que la durabilité.

STRUCTURATION DE LA THESE

Notre travail vise à étudier certaines propriétés mécaniques, physiques et de durabilité des bétons dont lesquels une partie du sable a été substituée par des granulats de caoutchouc issu de pneus recyclés. Les taux de substitution étudiés sont respectivement : 0, 10, 17, et 25%.

Cette thèse est structurée en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les déchets, les déchets utilisés en génie civil principalement dans l'élaboration des bétons et des ciments composés. Ensuite, nous avons établi une synthèse des travaux sur les matériaux cimentaire à base des granulats de caoutchouc issus de pneus usés ainsi que les propriétés des différents bétons élaborés.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques des matériaux employé pour la confection des bétons (sable, ciment, eau, granulats de caoutchouc), les formulations étudiées ainsi les procédures expérimentales adoptées pour les différents essais réalisés.

Le troisième et dernier chapitre de cette thèse est scindé en deux parties distinguées. La première partie est consacrée à la présentation et la discussion des résultats des essais rhéologiques à l'état frais ainsi que des propriétés mécaniques des bétons modifiés. La deuxième partie exposera des résultats expérimentaux obtenus sur l'étude de quelques paramètres de durabilité.

Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus ainsi que certaines perspectives envisagées pour une éventuelle poursuite de cet axe de recherche.

CHAPITRE 1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION

Le développement du secteur du bâtiment et des travaux publics réclame des quantités très importantes de granulats. L'extraction abusive et anarchique des matériaux mène à l'amenuisement des sources naturelles habituelles, notamment des gisements alluvionnaires. En plus des effets néfastes sur l'environnement.

La réduction des réserves exploitables de granulats naturels ont pour conséquence, la recherche d'autres voies d'approvisionnement en granulats pour l'industrie du béton. Notamment le recyclage. Notre objectif dans cette étude est de montrer :

- Pourquoi le recyclage est aujourd'hui une priorité incontournable dans la construction ?
- Quels sont les déchets qui sont recyclés ou valoriser dans le domaine du génie civil ?

Ainsi dans les paragraphes suivants, nous allons montrer l'intérêt du recyclage en génie civil pour ensuite faire une synthèse sur les principaux déchets recyclés dans l'industrie de la construction.

I.2. RECYCLAGE DES DECHETS

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus, dans un nouveau cycle de vie. Le recyclage a donc deux conséquences écologiques majeures :

- La réduction du volume des déchets, et donc de la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles à se dégrader),

- La préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire [1].

Les matériaux recyclables sont repérables grâce au célèbre ruban de Möbius, logo universel de ces matériaux depuis 1970 [2].

En Algérie, malgré les quantités importantes des déchets qui atteignent actuellement 4.892.000 tonnes/an (dont 184.000 tonnes sont considérés dangereux et toxiques) une gestion des déchets solides n'est pas à l'heure actuelle développée. Quelquefois la récupération de certaines matières valorisables est pratiquée, mais la qualité reste très insuffisante [3].

I.2.1. Principes du recyclage

Les trois grands principes du recyclage sont :

1. **Réduire** : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.
2. **Réutiliser** : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.
3. **Recycler** : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet [1].

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit «*chimique*» utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants ;
- Le recyclage dit «*mécanique*» est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer ou pour séparer par courants de Foucault ;
- Le recyclage dit «*organique*» consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz [4].

I.2.2. Chaîne du recyclage

La chaîne du recyclage comporte différentes étapes :

- Étape 1 - Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les ordures ménagères sont généralement incinérées ou enfouies en centres d'enfouissement pour déchets non dangereux. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence.

La collecte sélective, dite aussi «séparative» et souvent appelée à tort «tri sélectif» est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette le déchet le trie lui-même. La taxe au sac est un bon moyen pour inciter les personnes au tri sélectif, car seuls les déchets non recyclables finissent en général dans ces sacs taxés, les déchets recyclables étant eux déposés dans des lieux où il n'y a pas de taxe. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations mécanisées permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Un tri manuel, par des opérateurs devant un tapis roulant, complète souvent ces opérations automatiques.

- Étape 2 - Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

- Étape 3 - Commercialisation et conservation

Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs [1].

I.2.3. Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

Le granulat recyclé ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter l'exploitation des gisements naturels mais il peut ralentir ce processus. Par exemple, la Belgique produit annuelle environ 72 millions de tonnes par an de granulats tous types confondus.

La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante :

- granulats naturels : environ 43 millions de tonnes par an (+/- 58%), la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes ;
- granulats marins : environ 4 millions de tonnes par an (+/- 5,5%) ;
- granulats artificiels : environ 2 millions de tonnes par an (+/- 2,25%) ;
- sables/graves : environ 11 millions de tonnes par an (+/- 14,75%) ;
- granulats recyclés : 14 millions de tonnes par an (+/- 19,5%) [5].

Ainsi le recyclage des déchets comme granulats pour les routes ou la construction permet :

- Une économie de la ressource naturelle ;
- Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO_2 du fait que :

- pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO_2 attribuée au transport de granulats ;
- Le béton concassé est susceptible de piéger le CO_2 en se carbonatant [6] ;
- La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO_2 des cimenteries.

De plus le recyclage est une activité économique à part entière. Elle est le moyen de création de richesses pour les entreprises de ce secteur. Par exemple, les 205 entreprises du recyclage en Ile-de-France rassemblent près de 5000 salariés en 2015. En Algérie, on estime que le recyclage créera plus de 30000 postes d'emplois directs. En théorie, presque tous les

matériaux sont recyclables. En pratique, l'absence de filière rentable fait qu'ils ne sont pas tous recyclés.

I.3. QUELQUES DECHETS RECYCLES DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL

I.3.1. Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classées selon leurs teneurs en CaO et du type du charbon brûlé [7].



Figure I.1. La cendre volante.

I.3.2. Les laitiers sidérurgiques

Les laitiers de haut-fourneau sont des matières formées lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles :

- le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal à l'eau, qui lui confère une structure vitreuse lui permettant de développer des propriétés analogues à celles du ciment.
- le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent qui le transforme en une roche dure artificielle et chimiquement stable [8]. Ce type de laitier est approprié comme granulats pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.



Figure I.2. Les laitiers sidérurgiques.

I.3.3. Déchets de verre

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales : les granulats (taille > 4mm) et les poudres (taille < 4mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre.

Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines [9].



Figure I.3. Déchets de verre.

I.3.4. Granulats recyclés

Devant les besoins prépondérantes des granulats d'une part et les exigences environnementales d'autre part le recyclage des matériaux de démolition reste la solution meilleure et efficace

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Depuis cette date, plusieurs recherches ont été menées dans beaucoup de pays pour développer l'utilisation des déchets de démolition comme

constituants de nouveau béton. Les granulats fabriqués par ces déchets sont dits : «Granulats Recyclés», et le béton fabriqué à base de ces granulats est dits : «Béton Recyclé».

I.3.5. Ciment durci

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production [7].

I.3.6. Déchet de caoutchouc

Il existe deux grandes familles de caoutchoucs :

- les caoutchoucs naturels qui proviennent de l'hévéaculture (hévéa : arbre qui produit du latex),
- les caoutchoucs synthétiques fabriqués à partir de dérivés du pétrole.

Les caoutchoucs sont utilisés dans de nombreux secteurs : automobile/transport (pneumatiques, système de freinage, airbag, étanchéité, ..), équipement industriel, bâtiment et travaux publics (BTP), médical, colles et adhésifs....

Les déchets de caoutchouc ont quatre origines :

- Les déchets de caoutchouc industriel (8%),
- Les déchets de fabrication de pneumatiques et chambres à air (3,5%),
- Les pneumatiques usagés (86,6%),
- Les déchets du recyclage (poudrettes, copeaux) (2%).

Donc, les pneumatiques usagés représentent la part de déchets de caoutchouc la plus importante (plus de 85%) [10].

Cependant une fois usé, le pneu conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première [11].

- Elasticité
- Solidité de la structure
- Pouvoir drainant

- Pouvoir calorifique
- Haute teneur en carbone
- Durabilité
- Amortissement.

Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement avec la croissance du parc automobile. Malgré l'amélioration de la longévité des pneumatiques, le gisement de ces déchets reste très important, des centaines de millions de pneus hors d'usage, sont générés et cumulés dans des décharges à l'air libre dans des nombreux pays à travers le monde, chaque année (France, Allemagne, Etats Unis, Algérie, etc.) [12].

Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1439514 unités, soit 25918 tonnes par an (3500000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8,4 millions de véhicules, d'après les déclarations du Ministre du Transport en septembre 2016 au journal El-Moudjahid [13].



Figure I.4. Déchets de pneus usagés.

Comme les pneus usagés sont des déchets non biodégradable, leur méthode de stockage conventionnelle a un effet néfaste sur l'environnement, et plus largement sur la santé publique : ils occupent une large place dans les centres de stockage important, leur mode de stockage en vrac reste très sensible au risque incendie, ces stocks sont propices à la prolifération des rongeurs et moustiques compte tenu de la grande quantité de vide et de poches susceptibles de retenir de l'eau [12].

I.4. PRINCIPAUX CONSTITUANTS D'UN PNEU

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal (Figure I.5), sa complexité, par le nombre de constituants, apparaît avec beaucoup de netteté, on distingue alors :



Figure I.5. constituants d'un pneu [14].

1 - **la bande de roulement** : la bande de roulement est la partie du pneu qui va être en contact direct avec le sol. Elle est constituée d'une couche de gomme spécifiquement conçue pour résister à l'usure.

2 - **les nappes ceintures** : ces nappes sont situées sous la bande de roulement.

3 - **la carcasse** : elle correspond à l'ossature du pneu. Concrètement, c'est elle qui va lui permettre de mieux résister à la charge exercée par le véhicule.

4 - **les tringles** : ils permettent le maintien du pneu sur la roue. Afin d'assurer cette fonction, elles sont constituées de petits câbles métalliques inextensibles et tressés

5 - **les flancs** : Les flancs se situent entre la bande de roulement et les talons du pneu. Ils assurent la protection de la carcasse du pneu contre les frottements ou les chocs [14].

Composition d'un pneu

Les différentes matières contenues dans les pneus usagés sont présentés dans le tableau I.1

Tableau I.1 : La composition des pneus en masse [15].

Composition (% en masse)	Pneu d'automobile	Pneu d'un véhicule poids lourds
Caoutchouc naturel	14	27
Caoutchouc synthétique	27	14
Noir de carbone	28	28
Acier	14-15	14-15
Autre	16-17	16-17

I.5. ELABORATION DE GRANULES ET POUDRETTE DE PNEUS USAGES

A) Séparation :

Séparer la bande de roulement de la carcasse composée de feuille en caoutchouc synthétique (chambre à air), de toile de carcasse.

B) Laminage des parties 100% en caoutchouc :

Découpe les flancs de la carcasse et de la bande de roulement en bandelettes. La largeur de découpe est ajustable.

C) Prébroyage :

Broyer grossièrement les bandelettes de caoutchouc obtenues précédemment avec des dimensions pré définies.

D) Séparation caoutchouc câbles d'acier:

Les parties non broyer précédemment sont pressées par une machine afin de séparer le caoutchouc des câbles d'acier qui les composent. Une fois cette opération effectuée, le caoutchouc est récupéré puis broyé [16].

E) Le granulateur :

C'est une machine pour la production de poudrette de caoutchouc. Elle broie selon la granulométrie prédéfinie tous les gros morceaux obtenus précédemment. Elle peut également traiter directement les bandelettes de caoutchouc, les morceaux, des semelles de chaussures.

La figure I.6 montre les différentes étapes du déchetage des pneus.



Figure I.6. Différentes étapes de déchetage des pneus [17].

I.6. CATEGORIES ET PROPRIETES PHYSIQUES DU CAOUTCHOUC DECHIQUETE.

Les pneus recyclés qui sont déchetés pour être utilisés comme granulats de substitution dans le béton sont classés en trois catégories (Figure I.7) :

- 1- du caoutchouc décheté ou ébréché, utilisé comme granulat grossier, est produit au cours d'un processus en deux étapes au cours duquel l'étape principale déchet le caoutchouc du pneumatique à une taille de 300 à 460 mm de long par 100 à 230mm de large, suivie de l'étape secondaire qui produit des tailles de particules comprises entre 13 et 76mm.
- 2- la poudrette de caoutchouc, utilisé comme granulat fin, est produit par deux méthodes :
 - à température ambiante à l'aide de broyeurs à craquelins
 - à des températures inférieures à -80°C à l'aide d'azote liquide par un procédé cryogénique, pour produire des tailles de particules allant de 4,75mm et $>0,075\text{mm}$.
- 3- caoutchouc finement broyé, utilisé comme granulat très fin, de granulométrie allant de 0,5 mm à 0,075mm, produit par micro-broyage ou par broyage humide [18].

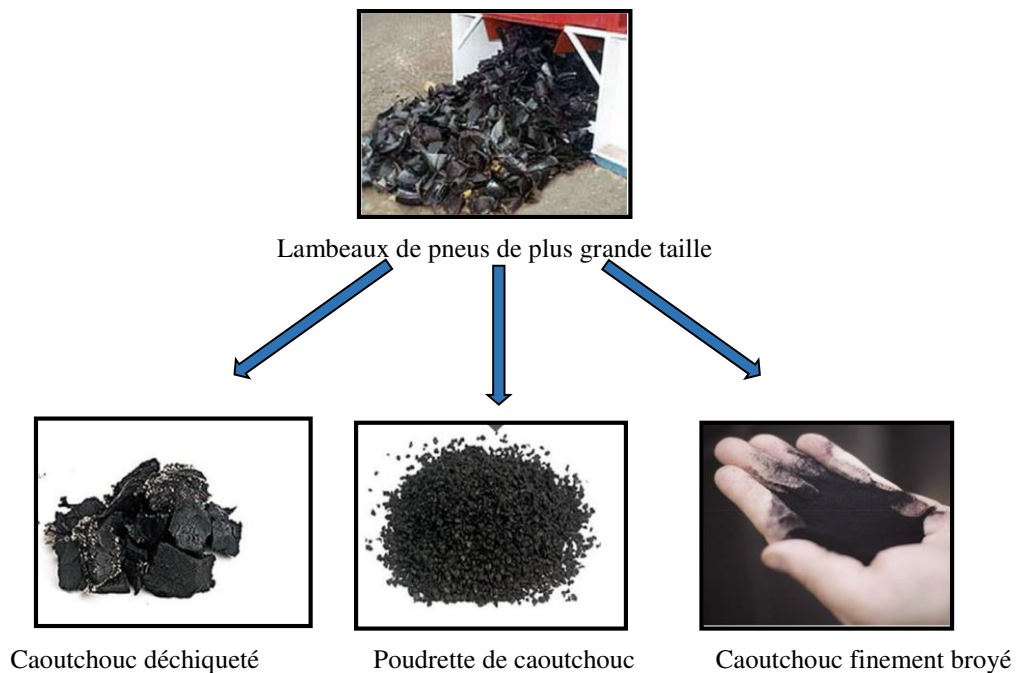


Figure I.7. Différentes granulométrie obtenues lors de déchiquetage des pneus [19].

Coût de traitement et de déchiquetage

Le coût de traitement et de déchiquetage des pneus usagés implique la main-d'œuvre, l'énergie, l'équipement et son entretien. Plus la taille des particules est petite, plus le coût associé à sa production est élevé [19]. Le tableau I.2 résume le coût potentiel de déchiquetage basé sur la taille des particules au Canada, les coûts dans d'autres pays étant probablement comparables/proportionnels.

Tableau I.2 : Coûts potentiels de traitement et de déchiquetage des pneus en Canada [19].

Taille des particules	Coûts par tonne	Taux de traitement (tonne/H)
>5cm	12 \$	10 -12
<5cm	31 \$	7
<1.25cm	31 - 68 \$	2 -3

I.7. PROPRIETES DES COMPOSITES A BASE DE DECHETS DE PNEUS USAGES

Les déchets de pneus usagés peuvent être incorporés dans les mortiers et bétons sous forme de granulats ou de poudrettes. Les performances obtenues sont présentées dans ce qui va suivre.

I.7.1. Impact des granulats en caoutchouc sur les propriétés des bétons à l'état frais

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur l'essai de la masse volumique, des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement ou par l'étalement dans le cas du béton auto-plaçant et l'essai d'air occlus.

I.7.1.1. Masse volumique

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

Malek K. Batayneh et al [20] dans leurs études, ont substitué le sable par des granulats en caoutchouc, ils ont fait varier le taux de substitution de 0 à 100% avec un incrément de 20%. Ils ont remarqué que malgré la diminution de la masse volumique du mélange (en raison de la faible masse volumique du caoutchouc), elle est restée dans la plage acceptable lorsque le taux de substitution total en granulats de caoutchouc ne dépasse pas les 20%. Les mêmes observations ont été constatées par **Ben Nakhai et Alhumoud J.M. [15]**, leurs résultats ont illustrée sur la figure I.8.

Kaloush K.E. et al [21] ont aussi indiqué que le masse volumique diminue approximativement de 102 kg/m³ pour chaque 22,7 kg de granulats en caoutchouc ajouté. Donc, en raison de la faible densité spécifique du caoutchouc qui est plus faible que celle des granulats naturels, le béton incorporant des granulats en caoutchouc peut être classé comme béton léger.

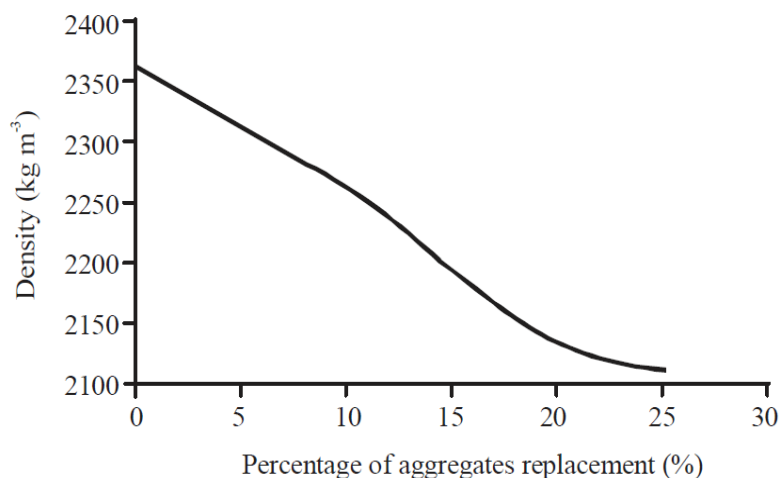


Figure I.8. Variation de la masse volumique du béton incorporant des granulats en caoutchouc [15].

I.7.1.2. Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une propriété très importante du béton à l'état frais qui a un impact significatif sur sa résistance finale. Cela dépend en grande partie des propriétés de la matière première utilisée dans la formulation du béton. L'ouvrabilité des bétons diminue avec l'augmentation du taux de substitution en caoutchouc [20, 22, 23].

Cependant des résultats contradictoires concernant l'effet de la taille des particules de caoutchouc ont été rapportés par divers chercheurs. **Khatib et Bayomy [24]** ont rapporté que l'ouvrabilité du béton de caoutchouc diminue avec la diminution de la taille des particules de caoutchouc en raison de l'augmentation de la surface des particules de taille angulaire. Des résultats similaires ont été rapportés par **Su et al [25]**.

Bjegović D. et al [26], **Eldin et Senouci [27]** et **RedaTaha et al. [22]** ont observé des résultats totalement contradictoires. Ils ont constaté que l'ouvrabilité du béton de caoutchouc diminue avec l'augmentation de la taille des particules. Cette diminution est due à l'augmentation du frottement entre les particules de caoutchouc angulaires, ce qui réduit également la fluidité des particules de caoutchouc de plus grande taille [28].

Le broyage du caoutchouc des pneus joue également un rôle important sur l'ouvrabilité du béton. Les granulats de caoutchouc broyés mécaniquement fournissent une surface spécifique et une rugosité plus élevées aux particules de caoutchouc, montrant ainsi des valeurs d'affaissement inférieures à celles du caoutchouc broyé cryogénique [23].

Cependant, la faible maniabilité du béton de caoutchouc peut être améliorée par l'ajout d'une quantité appropriée de super-plastifiant et sa quantité requise augmente avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc [29].

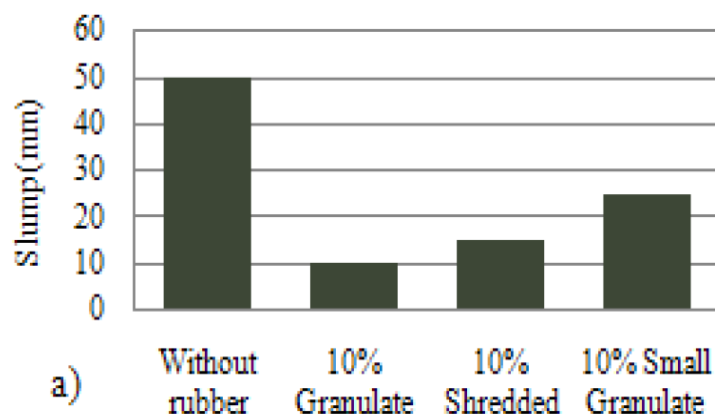


Figure I.9. Valeurs d'affaissement par rapport à la taille du granulat de caoutchouc [26].

I.7.1.3. Air occlus

Fedroff et al. [30] dans leurs études, ont remarqué une teneur en air plus élevée dans les mélanges des bétons de caoutchouc que dans les mélanges témoins, même sans l'utilisation d'un entraînant l'air (Figure I.10). Des observations similaires ont également été faites par **Khatib et Bayomy [24]**. Cela peut être dû à la nature non polaire des particules de caoutchouc et à leur tendance à piéger l'air dans leur surface rugueuse, et lorsque le caoutchouc est ajouté au mélange du béton, il peut attirer l'air car il a une tendance à repousser l'eau. De cette façon, l'air peut adhérer aux particules de caoutchouc. Par conséquent, l'augmentation de la teneur en caoutchouc entraîne une teneur en air plus élevée des mélanges des bétons.

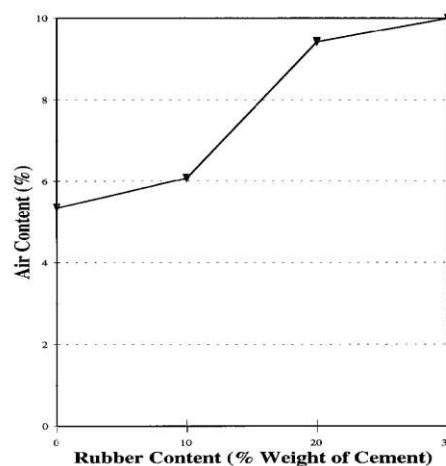


Figure I.10. Variation de la teneur en air du béton incorporant des granulats en caoutchouc [30].

I.7.2. Impact des G.C. sur les propriétés des bétons à l'état durci

I.7.2.1. Masse volumique à l'état sec

L'utilisation du béton de faible masse volumique ou léger peut aider à :

- réduire les charges permanentes dans une construction par la réduction du poids des éléments structuraux.
- réduire le coût global de la construction.

C'est le cas du béton de caoutchouc, comme la densité moyenne du caoutchouc des pneumatiques varie entre 0,6 et 1,15, ce qui est nettement inférieur à celle des granulats conventionnels qui ont une densité moyenne d'environ 2,65. Il en résulte une diminution de la densité du béton avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, comme l'ont rapporté de nombreux auteurs. Une diminution entre 1,27% et 13,14% pour des taux de substitution entre 5% et 30% avec un incrément de 5% a été remarqué par **Haddad O. et al [31]** comme le montre

la figure I.11. Les mêmes tendances ont été remarquées par [Mavroulidou M. et Figueiredo J. \[32\]](#) et [Senin M.S. et al \[33\]](#).

Outre la faible densité du caoutchouc, cette réduction est attribuée à l'augmentation de l'entraînement d'air dans la matrice, cette augmentation est liée à la nature non-polaire du caoutchouc, qui entraînerait de l'air dans la matrice.

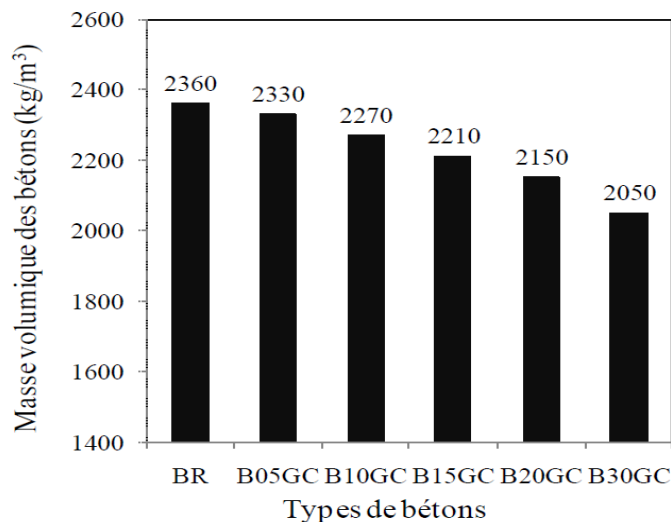


Figure I.11. Masse volumique des bétons en fonction du pourcentage de substitution des granulats naturels par les granulats en caoutchouc [31].

I.7.2.2. La résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés les plus importantes lors de la caractérisation d'un béton. Tout nouveau béton proposé ne peut être pris en considération par l'industrie de la construction que s'il satisfait à son exigence minimale de résistance à la compression requise pour un élément structurel.

Plusieurs chercheurs ont étudiés l'effet de la substitution des granulats de caoutchouc dans le béton et ils ont remarqués que l'ajout de granulats de caoutchouc en remplacement partiel des granulats conventionnels a un effet préjudiciable sur la résistance à la compression du béton. La résistance du béton de caoutchouc diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc [22,24, 27].

[Muyen Z. et al \[34\]](#) ont étudiés l'influence de la substitution de gros granulats dans un béton par des copeaux de caoutchouc de taille entre 15 et 25mm. Avec des substitutions de 5%, 10% et 15%, ils ont constaté une diminution de la résistance à la compression de 5%, 26% et 47% respectivement.

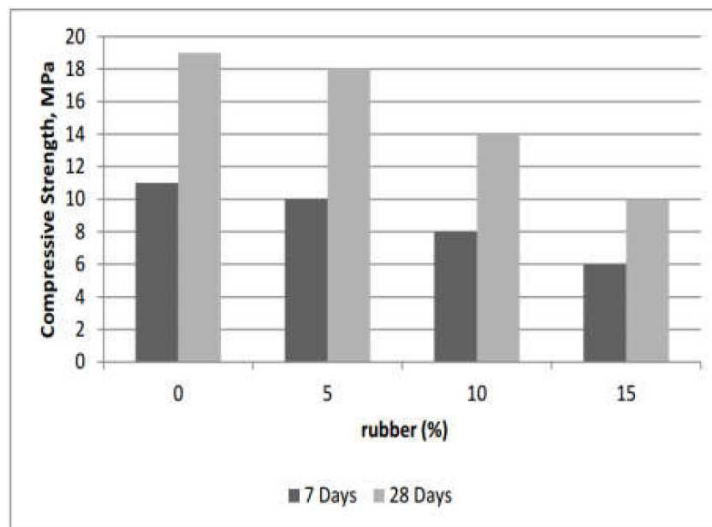


Figure I.12. Comparaison de la résistance à la compression des bétons à différents pourcentage de substitution par des granulats en caoutchouc [34].

Ben Nakhai et Alhumoud J.M. [15] dans leurs études : Properties of Concrete Containing Scrap (Recycled) Tire-Rubber, ont remplacé 10%, 15%, 20% et 25% en volume de sable par des granulats de pneu usagés. Ils ont constaté que la résistance à la compression du béton à différents âges diminuait avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Par exemple, à l'âge de 7 jours, ils ont remarqué que la résistance à la compression a diminué de 34, 50, 61 et 70% pour le remplacement de 10, 15, 20 et 25%, respectivement (Figure I.13).

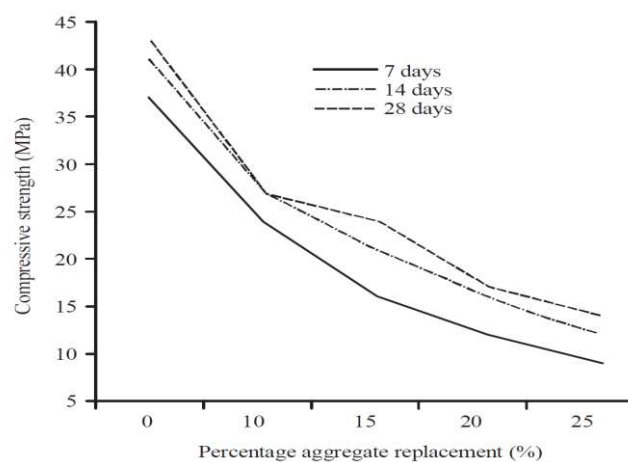


Figure I.13. Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution [15].

Essam El Tayeb et al. [35] ont étudiés l'influence de l'incorporation des granulats du caoutchouc sur la résistance à la compression du béton mousse, ils ont substitué 0%, 10%, 20% et 30% du volume de sable par des granulats en caoutchouc. Ils ont constaté que la résistance à

la compression du béton mousse à 28 jours diminuait avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Pour le premier groupe du béton mousse de rapport E/C égale 0,5 ; ils ont remarqué une diminution de la résistance à 28 jours de 19,6% ; 30,4% et 40,6% respectivement. Pour le deuxième groupe de rapport E/C égale à 0,38, ils ont remarqué une diminution de résistance à 28 jours de 10,4% ; 21,5% et 33,7%, respectivement, (Figure I.14).

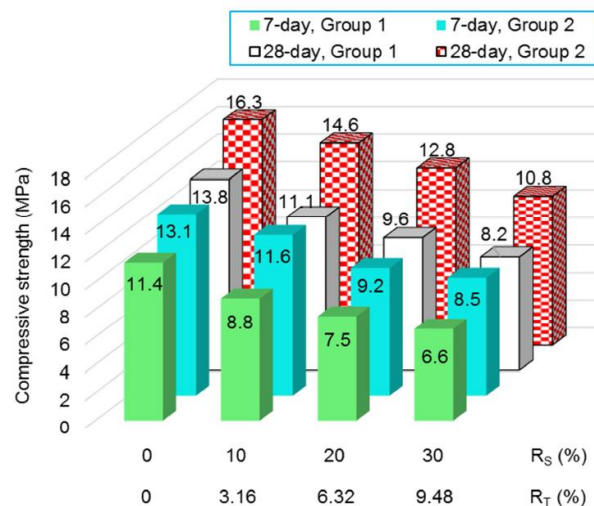


Figure I.14. L'effet de la substitution du sable par des granulats en caoutchouc sur la résistance à la compression pour les deux groupes [35].

De plus, la taille des particules de caoutchouc joue également un rôle important sur la résistance des bétons. Plusieurs recherches ont montré que la résistance à la compression du béton de caoutchouc diminue avec l'augmentation de la taille des particules [22, 24,27].

Au contraire, **Al Adnan J. [36]** dans son étude sur l'impact de la taille des granulats en caoutchouc sur la résistance du béton, où il a substitué le dosage en ciment par deux tailles différentes de granulats de caoutchouc dont les pourcentages en masse varient de 1 à 5%. Il a remarqué que la résistance à la compression des bétons avec des granulats de caoutchouc grossiers est plus élevée que celle des bétons avec des granulats de caoutchouc fin. Par exemple, à l'âge de 28 jours, il a constaté que pour une substitution de 5% de la masse du ciment par des granulats de caoutchouc fin une diminution de la résistance à la compression de 31,2% contre une diminution de 26,3% pour la substitution en granulats grossier de caoutchouc.

Tableau I.3 : Résultats de l'essai de résistance à la compression en (N/mm^2) pour les deux tailles étudiés à différents âges [36].

Compressive strength	Fine rubber (passing sieve 40)				% change	coarse rubber (retained sieve 40)				% change
	3 days	7 days	14 days	28 days		3 days	7 days	14 days	28 days	
Standard	30.1	36.2	36.4	42.9		30.1	36.2	36.4	42.9	
1%	26.9	31	34.2	36.6	-14.7	26	29.7	32.6	38.1	-11.2
2%	25.8	29.8	32.7	35.4	-3.3	25.6	28.1	29.3	36.5	-4.2
3%	22.9	26.7	31.8	34.5	-2.5	23.1	25.9	28.9	33.8	-7.4
4%	21	24.5	27.6	32.3	-6.4	22	25.3	27.4	33.1	-2.1
5%	19.8	23.6	25.9	29.5	-8.7	20.9	24.1	27.2	31.6	-4.5

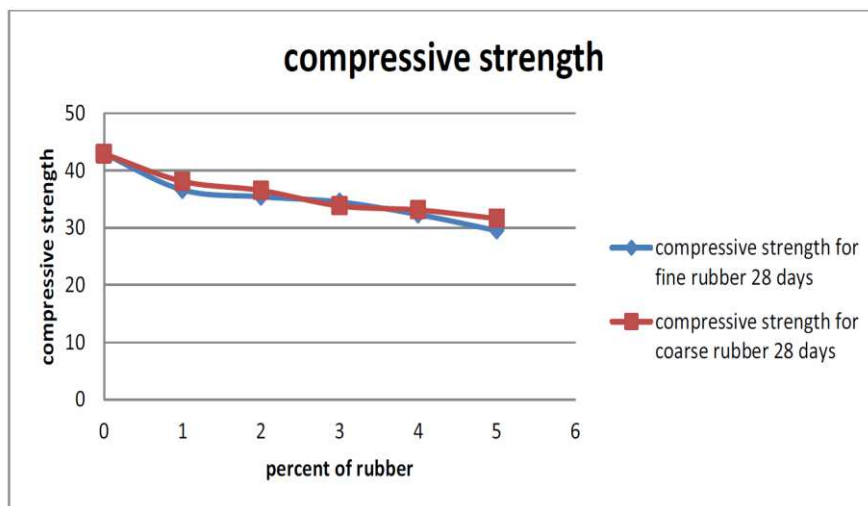


Figure I.15. Résistance à la compression des bétons en (N/mm^2) en fonction du pourcentage du caoutchouc à 28 jours [36].

La diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc est attribuée à trois raisons principales :

- déformabilité des particules de caoutchouc relative à la microstructure de ciment environnante, résultant l'initiation de fissures selon un modèle similaire à celui des pores dans le béton normal,
- une faible liaison inter-faciale entre les particules de caoutchouc de pneumatique et la matrice de ciment [37],
- une réduction de la densité de la matrice de béton qui dépend en outre de la taille, de la densité et de la dureté des granulats.

En ce qui concerne les modificateurs de surface du caoutchouc, plusieurs études ont révélé que le traitement de la surface des particules de caoutchouc avant leur introduction dans le mélange, entraîne une modification de la texture lisse de la surface de ce dernier en une surface rugueuse. Cette modification pourrait développer une meilleure adhérence entre la surface des grains de caoutchouc et la pâte de ciment [38].

I.7.2.3. Résistance à la traction par fendage.

La résistance à la traction par fendage du béton est l'une des propriétés les plus importantes du béton, car elle aide à déterminer la charge à laquelle les éléments en béton peuvent se fissurer.

Eldin N.N. et Senouci A.B. [27] ont étudié l'effet de la taille de granulat de caoutchouc (38, 25, 19, 6.4 et 2) mm avec des pourcentages de substitution en volume de (0, 25, 50, 75 et 100%) sur la résistance à la traction par fendage des bétons.

Pour les granulats grossiers, à l'âge de 28 jours, Ils ont observé une perte de résistance de 36% pour une substitution de 25% en caoutchouc contre une perte de 75% pour une substitution de 100%. Une tendance similaire a été constatée pour la substitution avec des granulats de caoutchouc fins. Mais les résistances à 28 jours avec les granulats de caoutchouc fins étaient considérablement plus élevées que celles des granulats de caoutchouc grossiers. Ils ont remarqué une perte de résistance à 28 jours de 19% pour une teneur en granulats de caoutchouc fin de 25%, contre une perte de 49% pour un taux de substitution de 100% (Figure I.16).

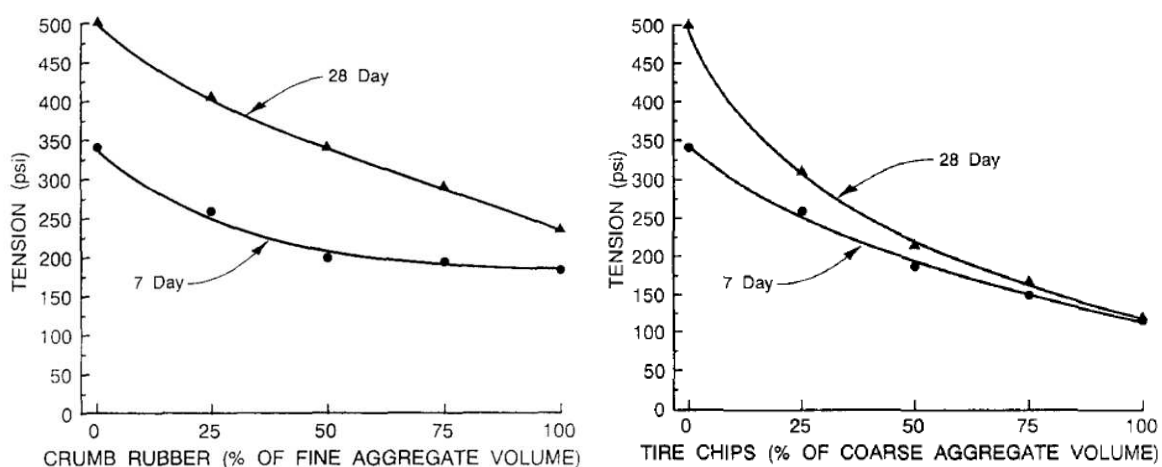


Figure I.16. Variation résistance à la traction par fendage en fonction du taux de substitution et la taille des granulats de caoutchouc [27].

Une tendance similaire a été observée par [Topcu \[39\]](#) dans son étude sur l'effet de la taille des particules de caoutchouc et du pourcentage de substitution en volume, sur la résistance à la traction par fendage.

I.7.2.4. Résistance à la traction par flexion.

[Khatib et Bayomi \[24\]](#) ont étudié l'effet de la taille des particules de caoutchouc (<2,5mm et 10–50mm) et leurs pourcentages de substitution en volume (5–100%) sur la résistance à la traction par flexion des bétons. Ils ont constaté que la résistance à la traction par flexion diminuait avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, quelle que soit la taille des particules. Cependant, ils ont remarqué des déformations beaucoup plus élevées dans le béton de caoutchouc avant la rupture, par rapport à celle du béton témoin. Les granulats en caoutchouc de petite taille ont donné de meilleurs résultats que les particules plus grossière vis à vis à la traction par flexion, bien que la différence de résistance à la traction par flexion ait diminué avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc.

[Skripkiunas et al. \[40\]](#) ont constaté une tendance similaire dans la réduction de la résistance avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Cependant, ils ont aussi observé que la résistance à la traction par flexion diminue avec la diminution de la taille des particules (0–1, 1–2 et 2–3 mm), contrairement à ce que [Khatib et Bayomi \[24\]](#) ont trouvé dans leurs études. Cette observation contradictoire sur l'effet de la taille des particules entre les deux études pourrait être due au grand écart entre les tailles des particules (<2,5 mm et 10–50 mm) étudiée par [Khatib et Bayomi \[24\]](#) contre un faible écart entre les plages de tailles des particules étudiées par [Skripkiunas et al \[40\]](#).

I.7.2.5. Module d'élasticité

Au même titre que les résistances mécaniques, de nombreux travaux confirment que l'incorporation des granulats en caoutchouc induit une chute importante du module d'élasticité. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression.

Dans une étude récente réalisée par [Irmawaty R. et al \[41\]](#), où ils ont substitué des pourcentages variant de 10 à 30% en volume des granulats naturels (sable + gravier) par des granulats en caoutchouc. Les auteurs ont montré des réductions de 28% et plus du module

d'élasticité lorsque la substitution en granulats de caoutchouc est égale à 20% et plus [41].

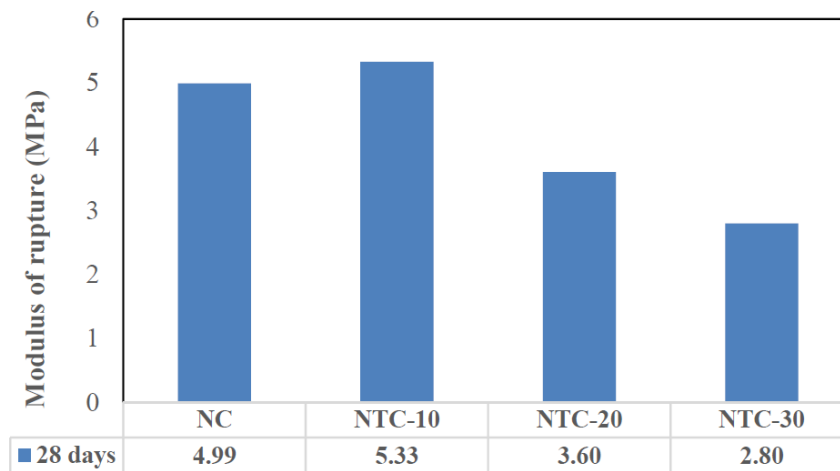


Figure I.17. Influence du taux de substitution en granulat de caoutchouc sur le module d'élasticité [41].

I.7.2.6. Retrait

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

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet des granulats en caoutchouc sur le retrait du béton. Les résultats trouvés montrent que le retrait du béton caoutchouc est plus élevé que celui du béton de référence.

Des études menées par **Bravo et Brito [23]**, **P. Sukontasukkul et al [42]**, **Adamu M. et Uche O.A.U. [43]** ont constaté que le retrait du béton de caoutchouc est plus élevé que le retrait d'un béton ordinaire et qu'il augmente avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, comme le montre la figure I-18. Ceci est justifié par que la nature flexible des granulats de caoutchouc qui leur permet d'agir comme un ressort. La perte de résistance à la compression et le module élastique des granulats entraîne la réduction des contraintes internes et conduit à un retrait plus élevé.

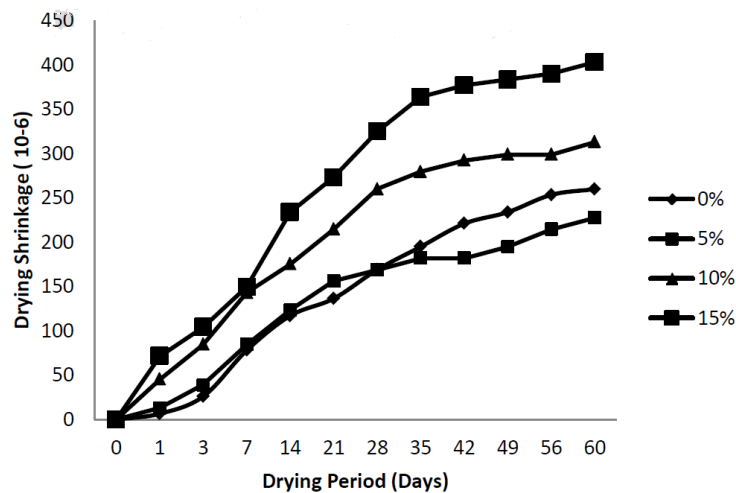


Figure I.18. Variation du retrait de séchage en fonction du temps : effets du taux de substitution en granulats de caoutchouc [43].

D'autres chercheurs [44, 45] ont constaté que l'incorporation des granulats de caoutchouc dans la composition du béton entraîne une réduction du retrait de séchage avec l'augmentation du pourcentage de granulats en caoutchouc dans le béton. Cette diminution du retrait peut améliorer la durabilité de ces composites cimentaires. Cela s'explique par le fait que ces composites avec des granulats de caoutchouc absorbent moins d'eau et conservent plus longtemps la chaleur dégagée pendant l'hydratation du ciment. Il semble également que ces granulats gênent la propagation des fissures microscopiques [45].

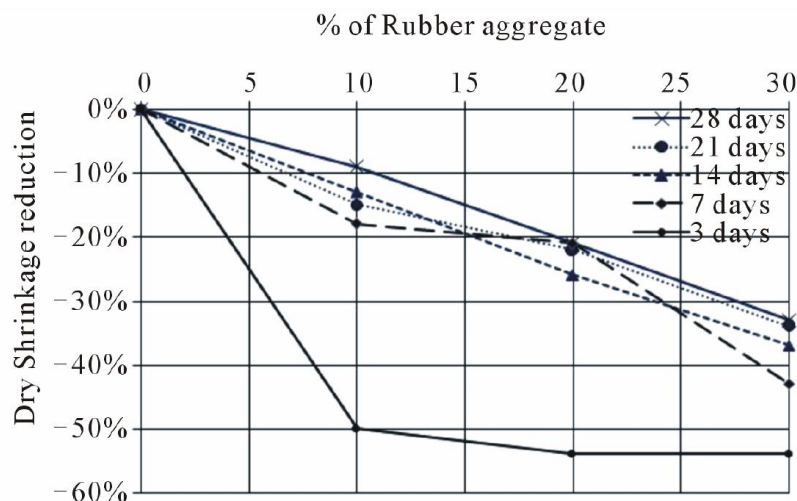


Figure I.19. Influence des granulats de caoutchouc sur le retrait de séchage [45].

I.7.3. Impact des granulats en caoutchouc sur les propriétés de durabilité des bétons

Parmi les travaux de recherche, effectués sur les composites cimentaires incorporant des déchets, l'étude de leur durabilité, l'idée d'introduire des matériaux recyclés dans des bétons ou des mortiers, afin d'améliorer leurs performances tout en gardant les qualités mécaniques, était donc séduisante [46].

Les études liées aux propriétés de durabilité du béton contenant les granulats de caoutchouc recyclés, sont peu abondants. La section suivante traite ce sujet en couvrant quelques indicateurs du durabilité.

I.7.3.1. Absorption capillaire

L'absorption d'eau est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci. C'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité.

Plusieurs chercheurs ont étudiés l'effet de la substitution des granulats de caoutchouc dans le béton sur la variation de l'absorption par capillarité et ils ont remarqués que l'ajout de ce type de granulat en remplacement partiel des granulats conventionnels a un effet favorable. L'absorption par capillarité diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc.

Benazzouk A. et al [47], ont étudiés l'effet de la substitution du ciment par des granulats en caoutchouc de taille inférieure à 1mm sur les valeurs de l'absorption capillaire des mélanges. Ils ont constaté que l'absorption capillaire diminue avec des pourcentages de 52 à 81% pour des taux de substitution varie de 10 à 50% successivement (Figure I.20). La même chose pour **Guelmine L. et al [48]**, dans leurs études sur la substitution du sable par des granulats en caoutchouc de taille inférieure à 2,5mm, ont remarqué qu'avec un taux de substitution de 9%, le mortier a subi une diminution de la capacité d'absorption de l'ordre de 48% (Figure I.21).

Ils ont justifié cette diminution par l'étanchéité des granulats de caoutchouc, qui ont un coefficient d'absorption plus faible comparativement aux granulats siliceux.

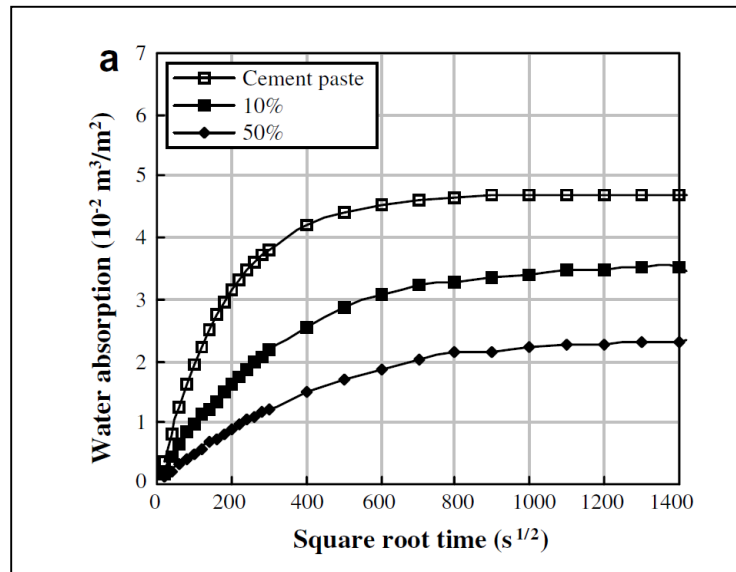


Figure I.20. Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps mesurée sur une pâte de ciment [47].

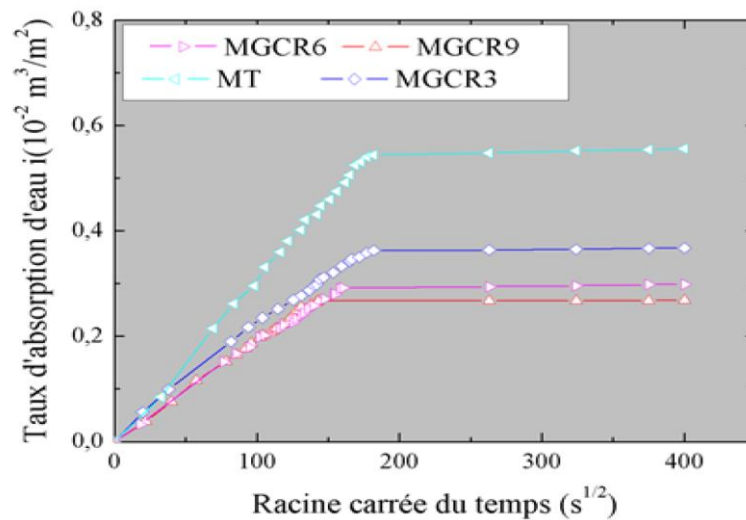


Figure I.21. Évolution du taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour les différents dosages en granulats de caoutchouc [48].

I.7.3.2. Perméabilités à l'air

La perméabilité à l'air des bétons est considérée comme un indicateur majeur de la durabilité des ouvrages en béton, car elle régit la pénétration d'agents agressifs gazeux, comme le dioxyde de carbone ainsi que le transfert de vapeur d'eau liée au séchage du matériau. Les études sur le coefficient de perméabilité à l'air sont très peu.

Pour certains auteurs, le coefficient de perméabilité à l'air diminue avec l'augmentation du taux de granulats en caoutchouc. alors que la porosité augmente. Ils justifient ces constatations a priori contradictoires par le fait que le réseau poreux du composite incorporant des granulats en caoutchouc est plus discontinu [12].

Autre auteurs, comme le montre la figure I.22, [26] qui ont travaillé sur les propriétés des bétons incorporant des granulats en caoutchouc de différentes taille (2–3,5 ; 2-4mm), avec l'ajout de la fumée de silice et de la cendre volante, ont arrivé à une conclusion opposée. La perméabilité à l'air du béton augmente avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc (figure I.22. a), celle-ci est justifiée par l'augmentation de la porosité due à ce type de granulat. Ils ont constaté aussi que la perméabilité à l'air augmente avec l'augmentation de la taille des granulats en caoutchouc (figure I.22. b).

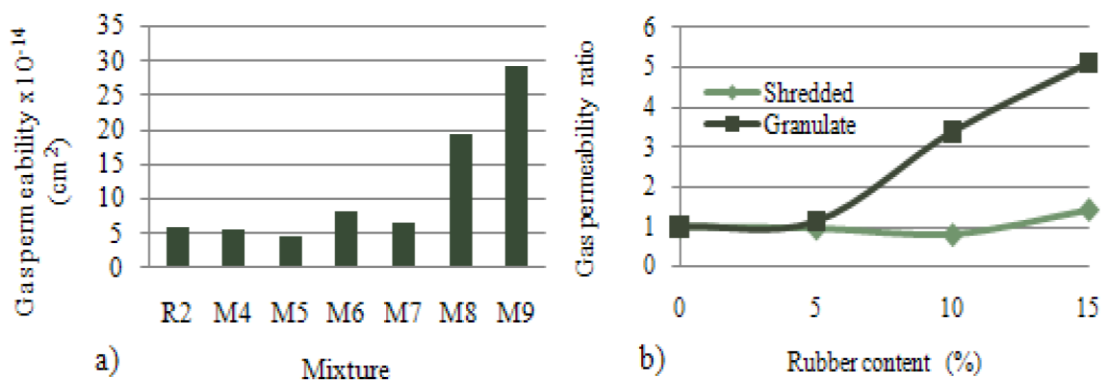


Figure I.22. Evolution de la perméabilité à l'oxygène en fonction du taux d'incorporation et de la taille des granulats de caoutchouc [26].

I.7.3.3. Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau du béton est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. Elle est définie comme étant sa capacité à être traversé par l'eau sous gradient de pression.

La substitution des granulats naturels par des granulats de caoutchouc augmente la profondeur de perméabilité à l'eau dans les mélanges de béton [Ganjian et al \[49\]](#). Celle-ci est plus élevée dans le mélange contenant des particules de caoutchouc grossier que dans le mélange contenant des particules de caoutchouc fin (Figure I.23).

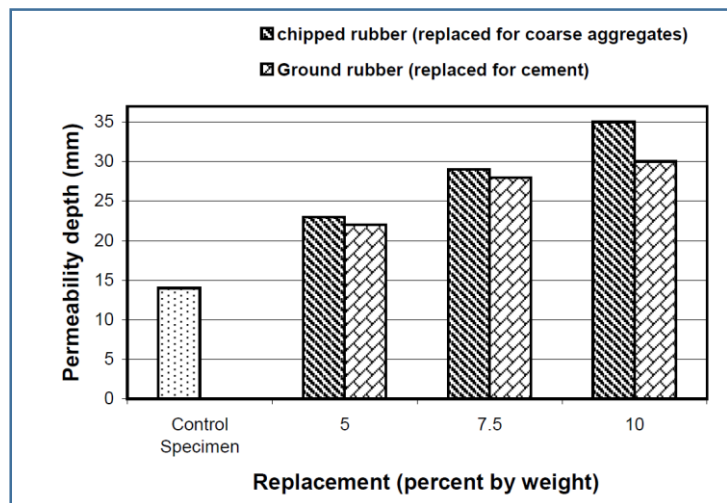


Figure I.23. Résultats de la profondeur de perméabilité à l'eau.

[Mukaddas A.M., et al \[50\]](#) ont étudié l'influence du mode de cure sur la variation de la perméabilité à l'eau des bétons de caoutchouc. Ils ont remarqué que le mode de conservation par pulvérisation entraîne une perméabilité plus élevée que la conservation par immersion.

Ils ont remarqué aussi que l'augmentation du taux de substitution des granulats en caoutchouc de 10 à 30% entraîne une profondeur de perméabilité incohérente sur les échantillons conservés par immersion. Tandis que les échantillons conservés en mode pulvérisation ont montré une augmentation de la profondeur avec l'augmentation du taux de substitution (figure I.24). Cela est dû à la mauvaise adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment.

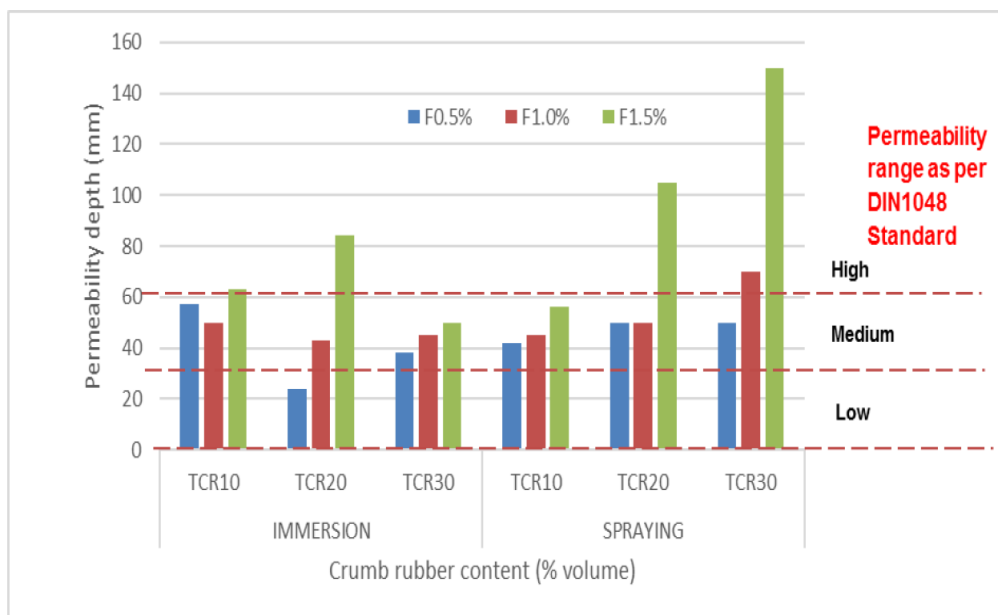


Figure I.24. Profondeur de perméabilité à l'eau des échantillons de mortier caoutchouté fibré.

I.8. CONCLUSION

L'intérêt de ce chapitre est de faire une synthèse sur les différents déchets potentiellement réutilisables dans le domaine du génie civil ainsi qu'un aperçu sur les connaissances et les résultats expérimentaux requis par différents chercheurs sur le comportement du béton à base de granulats de caoutchouc.

À la lumière de ce qui est mentionné dans ce chapitre, on peut conclure que :

- la substitution des déchets des pneus usagés dans le béton se fait généralement sous forme de granulats inertes : comme granulats fins pour la substitution du sable naturel et comme granulats grossiers pour la substitution du gravier.
- dans le cas général, l'ouvrabilité des bétons de caoutchouc diminue avec l'augmentation du taux de substitution en caoutchouc.
- Leurs masses volumiques à l'état sec diminuent également avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc mis en œuvre. Cet allègement est attribué à la faible densité du caoutchouc.
- Les composites à base de granulats de caoutchouc possèdent des résistances mécaniques faibles. Ces résistances sont systématiquement abaissées avec le taux de granulats de caoutchouc incorporés.

-
- généralement, l'incorporation des granulats de caoutchouc dans les composites cimentaires augmente le retrait de séchage avec l'augmentation de leurs teneurs. Cette augmentation est généralement attribuée à la réduction des contraintes internes causée par la perte de résistance à la compression et le module élastique des granulats.
 - Généralement, l'introduction de particules de caoutchouc réduit l'absorption capillaire des composites.
 - La perméabilité à l'eau et à l'air augmentent avec le taux d'incorporation des granulats de caoutchouc. La faiblesse de l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la matrice cimentaire semble être la raison principale.

Cette synthèse bibliographique nous permis d'orienter notre recherche sur les bétons élaborés à base de poudrette en caoutchouc en axant particulièrement sur un aspect peu étudié jusqu'à présent à savoir le comportement de ce nouveau béton innovant dans les milieux particulièrement agressifs.

Références bibliographiques du premier chapitre

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage>. Consulté le 29/03/2020
- [2] Mirakoff A., Eberlin L., Gesnel C. et Messaraa C. : *le recyclage*, Projet tutoré DUT 1ère année, 2007-2008.
- [3] Zeghichi L. : *Etude Des Betons Basiques A Base Des Différents Granulats*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie (2006).
- [4] <http://technostemariad02.eklablog.com/les-trois-principes-du-recyclage-et-leurs-principes-a106411300>. Consulté le 10/04/2019
- [5] Architectes et professionnels du secteur de la construction, Fiche 4.1 : L'utilisation de granulats issus *du recyclage*. Rapport technique - Bâtiments exemplaires. Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, (2010).
- [6] Thai-Hoa.V. : *Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires*. Spécialité Génie Civil. Université de Toulouse INSA, France (2009).
- [7] Serifou M. : *Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation*, Thèse de Doctorat, Université Felix Houphou et Boigny et l'Université de Bordeaux 1, (2013).
- [8] <http://ofrir2.ifsttar.fr/materiaux/categories-de-materiaux/co-produits-industriels/laitiers-de-haut-fourneau/>. Consulté le 12/04/2020.
- [9] Bourmatte N. : *Granulats Recyclés De Substitution Pour Betons Hydrauliques : béton de démolition - déchets de briques - déchets de verre*. Thèse de doctorat, Université des frères Metouri de Constantine, Algérie (2017).
- [10] <https://dechets.picardie.fr/spip.php?rubrique69>. Consulté le 10/04/2020
- [11] Rapport du Commissaire Enquêteur, "*Décision du tribunal administratif de Rouen du 22 septembre 2015(n° E15 000 088/76) demande d'autorisation relative à l'exploitation d'une unité de broyage de pneumatiques usagés et de caoutchoucs techniques*". Janvier (2016).
- [12] Boukour S. : *Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés*. Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie (2017).
- [13] Ait Idir A. : *Valorisation énergétique des pneumatiques usagés non réutilisables*. ERA 2017, Centre des conventions d'Oran, du 23 au 25 octobre (2017).
- [14] <https://www.1001pneus.fr/cms/FR-FR/conception-des-pneus.html>. Consulté le 10/05/2020
- [15] Ben Nakhai A., Alhumoud J. M.: *Properties of Concrete Containing Scrap (Recycled) Tire-Rubber*. Journal of Engineering and Applied Sciences, 15 (2) 653-658, (2020).

- [16] Hani A. : *Etude de Comportement d'un Béton Hydraulique Modifié (déchets des pneus)*, Mémoire de master ,université Kasdi Merbah, Université de Ouargla (2016).
- [17] Mhaya A.M., Huseien G.F., ZainalAbidin A.R., Ismail M.: *Long-term mechanical and durable properties of waste tires rubber crumbs replaced GBFS modified concretes*. Construction and Building Materials, 256 (2020).
- [18] Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A.: *Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete*, Construction and Building Materials, 23 (5) 1828–1836 (2009).
- [19] Roychand R., Gravina R.J., Zhuge Y., Ma X., Youssf O., Mills J. E.: *A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete*. Construction and Building Materials, 237 (2020).
- [20] Batayneh M.K., Marie I., Asi I.: *Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries*, Waste Manage. 28 (11) 2171–2176, (2008).
- [21] Kaloush K.E., Way G.B., Zhu H.: *Properties of Crumb Rubber Concrete*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, Volume 1914, (2005).
- [22] RedaTaha M.M., El-Dieb A. Abd El-Wahab M., Abdel-Hameed M.: *Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete*, J. Mater. Civ. Eng. 20 (10) 640–649, (2008).
- [23] Bravo M., De Brito J.: *Concrete made with used tyre aggregate: durability related performance*. J. Cleaner Prod. 25 42–50, (2012).
- [24] Khatib Z.K., Bayomy F.M.: *Rubberized Portland cement concrete*, J. Mater. Civ. Eng. 11 (3) 206–213, (1999).
- [25] Su H., Yang J., Ling T.C., Ghataora G.S., Dirar S.: *Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes*, J. Cleaner Prod. 91 288–296, (2015).
- [26] Bjegović D., Baričević A., Serdar M.: *Durability properties of concrete with recycled waste tyres*. International Conference on Durability of Building Materials and Components XII DBMC, Porto, PORTUGAL, April 12-15, (2011).
- [27] Eldin N.N., Senouci A.B.: *Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete*, Cem. Concr. Compos. 16 (4) 287–298, (1994).
- [28] Holmes N., Browne A., Montague C.: *Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement*. Construction and Building Materials. 73 195–204, (2014).
- [29] Moustafa A., ElGawady M.A.: *Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber*, Construction and Building Materials. 93 249–256, (2015).
- [30] Fedroff D., Ahmad S., Savas A.B.Z.: *Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber*. Transportation research record, Volume: 1532 66-72, (1996).

- [31] Haddad O., Hacid L., Aggoun S., Kaci S. : *Effet des granulats en caoutchouc sur les propriétés des matériaux cimentaires*. Journal of Materials, Processes and Environment, Vol.4. No 2. (2016).
- [32] Mavroulidou M., Figueiredo J.: *Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres*. Global NEST Journal, Vol 12, No 4, pp 359-367, (2010).
- [33] Senin M.S. Shahidan S., Leman A.S.: NurulIzzati R.R.H., *Properties of Cement Mortar Containing Rubber Ash as Sand Replacement*. International Engineering Research and Innovation Symposium (IRIS), (2016).
- [34] Muyen Z., Mahmud F., Hoque MN.: *Application of waste tyre rubber chips as coarse aggregate in concrete*. Progressive Agriculture, 30 (3) 328-334, (2019).
- [35] Eltayeb E., Ma X., Zhuge Y., Youssf O.: Mills J. E., *Influence of Rubber Particles on the Properties of Foam Concrete*. Journal of Building Engineering Vol 30, (2020),
- [36] Al Adwan J.: *Impact of rubber crumb fraction and grain size on concrete strength*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 14, NO. 13, (2019).
- [37] Lee H.S., Lee H., Moon J.S., Jung H.W.; *Development of tire added latex concrete*, Mater. J. 95 (4) 356–364 (1998).
- [38] Ramdani S. : *Etude de l'influence de l'incorporation dans le béton des déchets recyclés issus du broyage des pneus usagés et verre broyé sur leurs caractéristiques et comportement*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider– Biskra, Algérie. (2019).
- [39] Topcu I.B., *The properties of rubberized concretes*. Cement and Concrete Research, 25 (2) 304–310, (1995).
- [40] Skripkiunas G., Grinys A., Miskinis K.: *Damping properties of concrete with rubber waste additives*, Materials science. (Medz'iagotyra) 15 (3) 266–272 (2009).
- [41] Irmawaty R., Parung H., Md Noor N.: *Experimental study of rubber particles from recycle tires as concrete aggregates*. Earth and Environmental , 473, (2020).
- [42] Sukontasukkul P., Tiamlom K.: *Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size*. Construction and Building Materials 29, 520–526, (2012).
- [43] Adamu M., Uche O.A.U.: *Durability Properties of Concrete Containing Scrap Tire as Fine & Coarse Aggregate In Concrete*. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 11, (2014).
- [44] Canova J.A., De Angelis Neto G., Bergamasco R.: *Mortar with unserviceable tire residues*. Journal of Urban and Environmental Engineering, 3(2) 63-72 (2009).
- [45] Boudaoud Z., Beddar M. : *Effects of Recycled Tires Rubber Aggregates on the Characteristics of Cement Concrete*. Open Journal of Civil Engineering, 2, 193-197, (2012).

-
- [46] Medine M. : *Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés*. Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, Algérie. (2018).
- [47] 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*. *Cement & Concrete Composites*, 29 732–740, (2007).
- [48] Guelmine L., Hadjab H., Benazzouk A. : *Effet des granulats de caoutchouc recyclés de pneus usagés sur les propriétés physiques et mécaniques de mortier de ciment*. Séminaire international de Génie Civil, « SIGC 2018 ».Oran les 27 & 28 Novembre (2018).
- [49] Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A. : *Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete*. *Construction and Building Materials*, Vol 23, 1828-1836, (2009).
- [50] Mukaddas A.M., AbdAziz F.N.A., Mohd. Nasir N.A., Mohamed Sutan N.: *Water Permeability And Chloride And Sulphate Resistance Of Rubberised Fibre Mortar*. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, Vol 10, Issue 2, (2019).

CHAPITRE II.
**CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES
ET METHODES EXPERIMENTALES**

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

II.1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau de construction, composé du ciment, gravier, sable, d'eau et éventuellement d'adjuvant pour modifier ces propriétés. Afin de formuler un béton qui doit répondre aux exigences demandées, il est souhaitable que ses constituants soient convenables aux normes en vigueur.

Le but de ce chapitre est de présenter la démarche expérimentale adoptée dans notre travail. On décrira les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes par l'exécution de quelques essais d'identification préliminaires dont les résultats nous aident au choix des matériaux ainsi que la formulation du béton.

II.2. MATERIAUX UTILISES

Nous avons utilisé pour la confection du béton des matériaux locaux dont les caractéristiques mécaniques et physiques ont été déterminées expérimentalement. Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de Guelma. Les matériaux utilisés présentés dans la figure II.1 sont :

- ✓ Un sable (0/3) roulé issu de la région de Tébessa
- ✓ Un gravier (3/8) issu de la carrière d'EL Fedjoudj
- ✓ Un gravier (5/15) issu de la carrière de Héliopolis
- ✓ Un ciment CPJ42.5 provenant de la cimenterie de Hdjar Soud
- ✓ Eau de gâchage : Eau potable du laboratoire
- ✓ Poudrette de caoutchouc : récupérée auprès de l'entreprise DOUIB RECYCLAGE CAOUTCHOUC-Sétif.

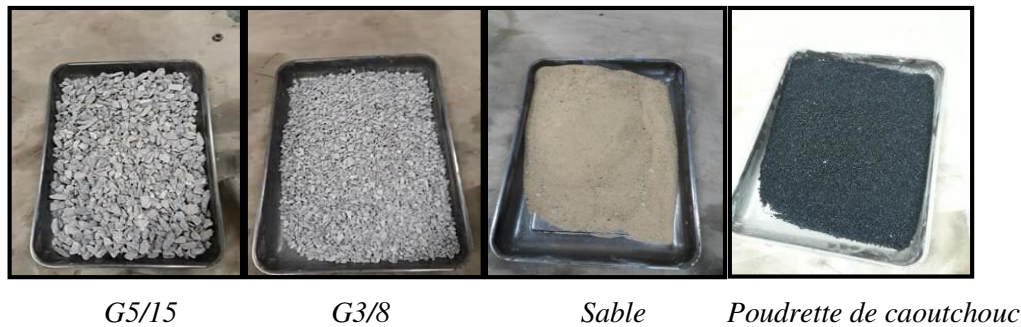


Figure II.1. Matériaux utilisés pour la formulation des bétons.

II.3. ESSAIS PRELIMINAIRES SUR LES GRANULATS

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent entre 60 à 80% du volume du béton. Ils sont d'origines géologiques assez diverses, et leur caractérisation constitue une étape importante dans la suite du protocole expérimental fixé.

II.3.1. Analyse Granulométrique (Norme NA 2607) [1]

Le tracé de la courbe granulatoire des granulats est une étape nécessaire pour pouvoir étudier la composition des bétons.



Figure II.2. Tamiseuse utilisée pour l'essai d'analyse granulométrique.

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différents granulats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Graviers

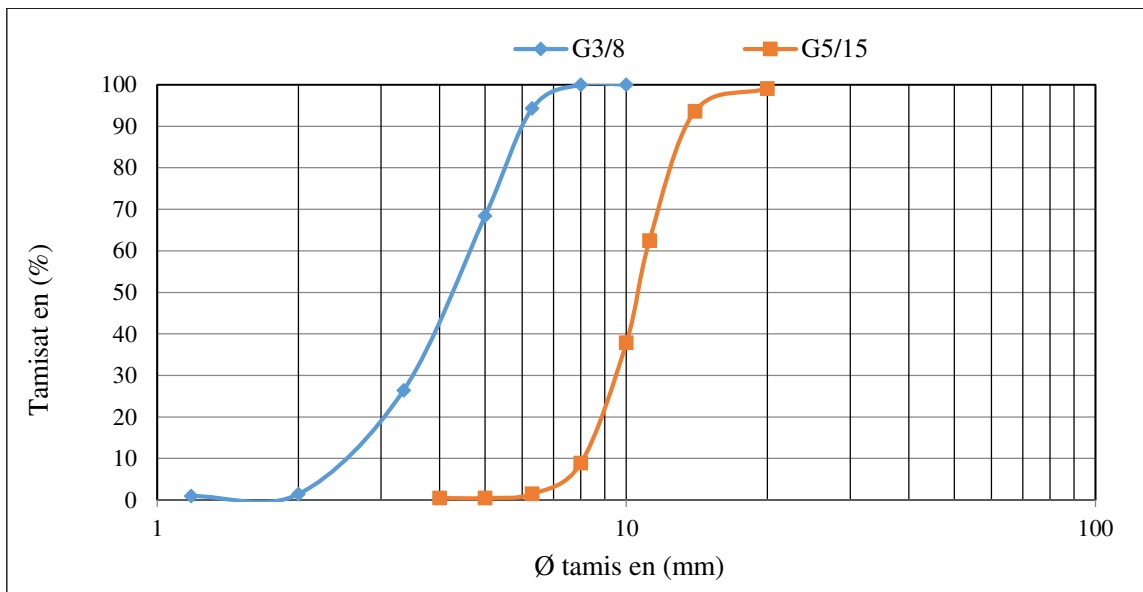


Figure II.3. Courbes granulométriques des graviers 3/8 et 5/15.

Sable et poudrette de caoutchouc

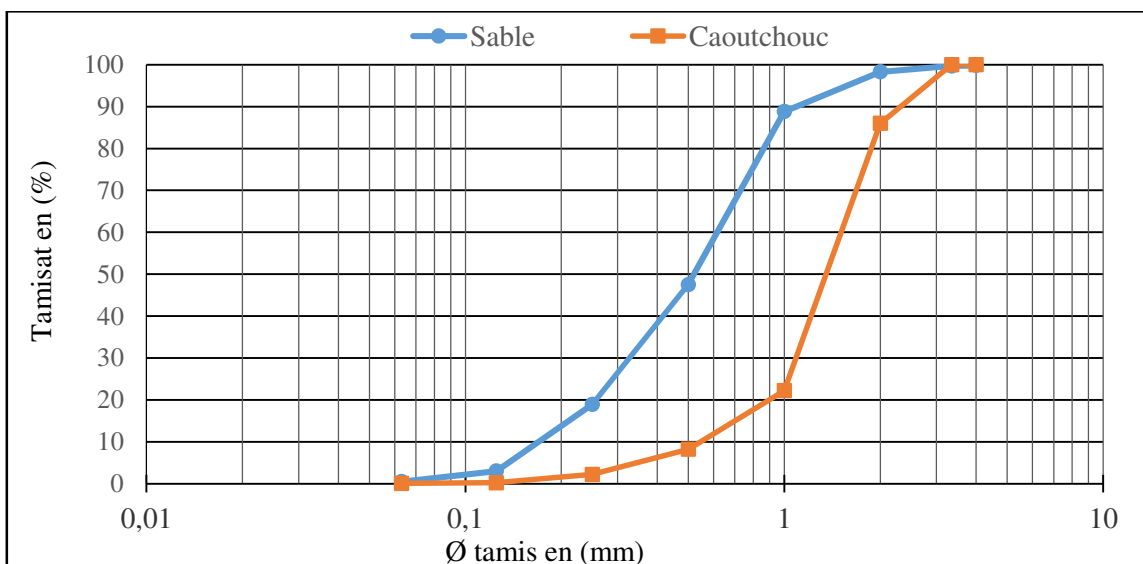


Figure II.4. Courbes granulométriques du sable et de la poudrette de caoutchouc.

Module de finesse (Norme NA 2607) [1]

Le module de finesse est égal au $1/100^{\text{ième}}$ de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 – 5 mm.

A partir de la valeur du module de finesse, on classe les sables selon les trois catégories suivantes :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Dans notre cas :

$$M_f = \frac{94 + 82 + 31 + 5,8 + 2 + 0}{100} = 2,15$$

Dans notre cas, on est en présence d'un sable fin, et cette caractéristique est retrouvée un peu partout au niveau national concernant les sables naturels.

II.3.2. Masse Volumique (Norme NA 255) [2]

Les masses volumiques absolues ou apparentes, ont été mesurées conformément à la norme NA 255, cette dernière a été appliquée sur les granulats naturels et recyclés.



Figure II.5. Mesure des masses volumiques absolue et apparente.

Le tableau II.1 résume les résultats de l'essai des masses volumiques pour les différents matériaux utilisés :

Tableau II.1 : Résultats de l'essai des masses volumiques.

Les matériaux	Gravier (3/8)	Gravier (5/15)	Sable (0/5)	caoutchouc
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1390	1410	1600	470
Masse volumique absolues (kg/m ³)	2650	2760	2544	870

Commentaire

Concernant les masses volumiques apparentes et absolues des granulats naturels, les valeurs obtenues correspondent aux valeurs moyennes des granulats courants utilisés dans la fabrication des bétons. Ainsi pour ce matériau, les sables et graviers présentent des masses volumiques absolues variant dans la fourchette [2500 ÷ 2700] kg/m³, et des masses volumiques apparentes variant dans les limites de [1400 ÷ 1600] kg/m³.

Concernant le caoutchouc, selon les valeurs trouvées des masses volumiques ; on peut le classé comme granulat léger.

II.3.3. Coefficient d'absorption d'eau (Norme NA 255) [2]

Le coefficient d'absorption d'eau A_b représente la capacité d'un granulat à absorber de l'eau. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

Un coefficient d'absorption est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 48 heures.

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau sont présentés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Valeurs du coefficient d'absorption d'eau des granulats.

Les matériaux	Gravier (5/15)	Gravier (3/8)	S
Coefficient d'absorption (%)	0,88	1,95	2,62

II.3.4. Mesure de la propreté des granulats

✓ Cas des graviers (Norme NA 463) [3]

L'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments de taille inférieurs à 0,5mm. Le principe général est de faire débarrasser le gravier de cette classe fine uniquement par un lavage répété.

Tableau II.3 : valeurs de l'essai de propreté des graviers.

	G 3/8	G 5/15
Propreté P (%)	3,70	2,20

Pour les deux gravillons testés le taux de propreté est inférieur à 5%, ils peuvent être considérés comme des granulats propres.

✓ Cas du sable

Essai équivalent de sable (Norme NA 455) [4]

Pour les sables, la propreté peut être contrôlé à travers l'essai de l'équivalent de sable.



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

Tableau II.4 : Valeurs de l'essai d'équivalent de sable.

ESV (%)	79
ES (%)	75

Selon la classification de la norme NF P18-589, le sable testé correspond à un sable propre à faible teneur en fines.

II.3.5 Mesure de la dureté des graviers (NA 458) [5]

Afin de mesurer la dureté des graviers, nous avons eu recours à l'essai Los Angeles dont le but est de quantifier la résistance des graviers aux chocs. Le Principe consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

Le tableau II.15 présente les résultats trouvés de cet essai.

Tableau II.5 : Valeurs de l'essai de dureté (Los Angeles).

	G3/8	G5/15
LA (%)	34	27

Les deux granulats présentent un *coefficient LA* < 40%, les granulats utilisés dans notre étude sont correspondants à des granulats courants qui conviennent parfaitement bien pour la confection de bétons ordinaires ayant de bonnes performances mécaniques.

II.4. LE CIMENT

Pour la confection des bétons d'étude, nous avons utilisé un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42,5, provenant de la cimenterie de Hdjar Soud implantée dans la commune de Azzaba (Wilaya de Skikda).

Les différentes caractéristiques du ciment utilisé sont indiquées sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément à la norme NA 442-2008 [6], et dont la composition chimique moyenne est présentée dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Composition chimique moyenne du ciment CPJ-CEM II/A utilisé [7].

Composants	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	PAF	MnO
(%)	58.6	24.92	6.58	3.65	1.21	0.85	0.08	2.17	1.7	--

II.5. EAU DE GACHAGE

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle du robinet disponible au réservoir de laboratoire de génie civil et hydraulique de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

II.6. FORMULATION DES BETONS

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir un mélange optimal des granulats, où l'on dispose le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage désiré.

Plusieurs méthodes de formulations ont été élaborées : Caquot, Faury, Dreux-Gorisse, Baron-Lesage, etc. Chacune de ces méthodes reposent sur des propres hypothèses.

Dans notre cas, nous avons optée pour la méthode Dreux-Gorisse parce que c'est une méthode dont l'utilisation est relativement simple et ces résultats donnent satisfaction.

II.6.1. Dosages des bétons

Pour les besoins de notre étude expérimentale nous avons préparé quatre bétons :

- **Un béton de référence désigné par BO** : il correspond à un mélange ordinaire formulé à partir de trois classes granulaires : sable, gravillon (3/8) et gravillon (8/15).
- **Trois bétons modifiés désignés respectivement par BC10% ; BC17,5% et BC25%** : c'est des mélanges formulés à partir de trois classes granulaires: sable, gravillon(3/8) et (8/15), en plus de la poudrette de caoutchouc qui intervient avec des pourcentages couvrant la plage de 10 à 25%. La substitution a été faite au niveau du sable et elle est traduite en volume.

Objectifs visés par l'étude

Nous visons un béton de référence de résistance caractéristique à la compression $f_{c28} = 30MPa$ et un affaissement au cône d'Abram's entre 6 et 9cm, la dimension maximale des granulats utilisé est $D_{max} = 15mm$ et le dosage en ciment est fixé à $400kg/m^3$.

La figure II.7 présente le traçage de la courbe de référence, et le tableau II.7 présente les résultats des calculs relatifs à cette étude

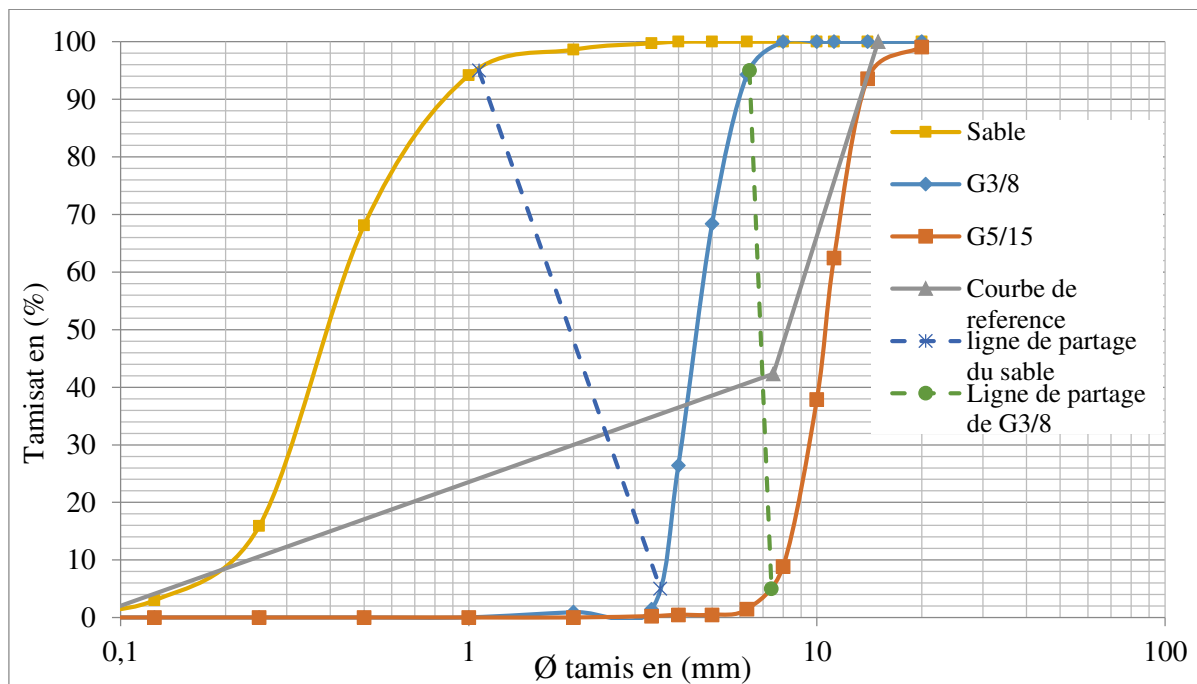


Figure II.7. Tracé de la courbe de référence.

Tableau II.7 : Formulation des bétons étudiés.

FORMULATIONS (kg/ m³)				
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
<i>Ciment</i>	400	400	400	400
<i>Sable</i>	591	531,9	487,6	443,3
<i>Gravier 3/8</i>	337	337	337	337
<i>Gravier 5/15</i>	834	834	834	834
<i>Eau</i>	242	242	242	242
<i>Caoutchouc</i>	00	20,6	36	51,4
<i>E/C</i>	0,6	0,6	0,6	0,6
<i>G/S</i>	1,98	2,12	2,24	2,37

II.6.2. Confection des éprouvettes

Conformément à la norme NA 2600 [8], et pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé respectivement pour la confection des éprouvettes des

moules cubiques $(10 \times 10 \times 10) \text{cm}^3$, $(15 \times 15 \times 15) \text{cm}^3$, des moules prismatiques $(7 \times 7 \times 28) \text{cm}^3$ et $(8 \times 8 \times 30) \text{cm}^3$ et des moules cylindrique $(\text{Ø}16 \times 32)$ et $(\text{Ø}15 \times 5) \text{cm}^3$.

Le malaxage a été exécuté à l'aide d'une bétonnière de 120 litres de capacité, et les étapes de malaxage sont :

- Introduction des granulats dans le malaxeur (sable, gravillon et granulats en caoutchouc), faire le malaxage pendant 3min afin d'assurer une bonne dispersion des granulats de caoutchouc parmi les éléments traditionnels du béton
- Introduction du ciment et faire un malaxage pendant 1min
- Introduction de l'eau et faire le malaxage pendant 2min.



Figure II.8. Bétonnière utilisée.

II.6.3. Moulage et démoulage

Après l'opération de malaxage, le béton est prêt à l'emploi. Le béton est introduit dans des moules préalablement graissés par de l'huile afin de faciliter le démoulage après 24 heures de leur coulage.

Le remplissage des moules est exécuté en deux couches, pour chaque couche on a appliqués 25 coups afin d'assurer un remplissage parfait du moule. A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une truelle selon les normes NA 2610 [9]. La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse est bien finie.

Après démoulage, les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau jusqu'au moment de l'essai.



Figure II.9. Mise en place du béton et la conservation des éprouvettes.

II.7. PRESENTATION DES ESSAIS

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton témoin et des bétons modifiés par la poudre de caoutchouc.

II.7.1. Essais sur béton frais

II.7.1.1. Mesure de la consistance (Norme NA 431) [10]

Les indices décrivant la rhéologie des mélanges cimentaires à l'état frais, sont multiples, l'affaissement au cône d'Abrams, a été choisi pour évaluer l'ouvrabilité des bétons testés. Cet

essai, est connu universellement, il permet de mesurer la consistance. Dans cette étude, il a été effectué conformément aux prescriptions de la norme citée ci-dessus.

Le cône tronconique à une hauteur de 30cm, placé sur une surface métallique lisse, serrée avec des écrous, la petite ouverture vers le haut. Le remplissage du moule a été effectué en trois couches d'égal volume. Chaque couche, a été piquée 25 fois avec une tige métallique ayant des dimensions standard. Une fois le cône rempli, le béton en excès à la surface a été arasé, en se servant de la même tige. A la fin, le cône est relevé lentement, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône, est appelée l'affaissement, exprimé en cm.



Figure II.10. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

II.7.1.2. Masse volumique à l'état frais (Norme NA 436) [11]

La masse volumique, est un paramètre important pour les composites cimentaires, caractérisés par leurs faibles masses volumiques, sa détermination est donc essentielle. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NA-436.

Pour déterminer la masse volumique d'un béton frais, il faut suivre les étapes suivantes :

- Remplir en béton frais un récipient de volume V et de masse M . Le remplissage est exécuté en deux couches.
- Araser le haut du récipient.
- Peser le récipient rempli du béton, soit M_1 .

La masse volumique du béton frais ρ_f est donnée par l'équation (II.1) suivante :

$$\rho_f = \frac{M_1 - M}{V} \quad \dots \text{ [Eq. II. 1]}$$



Figure II.11. Essai masse volumique du béton frais.

II.7.1.3. Essai teneur en air occlus (Norme NA434) [12]

Lors d'un essai de gâchage, il est intéressant de mesurer la teneur en air d'un béton frais, pour avoir une première indication sur la compacité.

La teneur en air se mesure à l'aide d'un aéromètre. La méthode se base sur la compressibilité de l'air contenu dans le béton frais. Un volume déterminé de béton est mis en communication avec un volume d'air en surpression. La valeur de la pression résultante permet de déterminer la teneur en air du béton.

L'essai a été réalisé à l'aide d'un Aéromètre, qui indique directement le pourcentage de la teneur en air occlus. Les procédures de cette méthode, consiste essentiellement à observer la diminution de volume d'un échantillon de béton comprimé, lorsqu'il est soumis à une pression connue.



Figure II.12. Essai teneur en air occlus.

II.7.2. Essais sur béton durci

II.7.2.1. Propriétés physiques

A. Masse volumique à sec (méthode par pesée hydrostatique) Norme NA 435 [13]

La masse volumique à sec a été mesurée par pesée hydrostatique, les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes cubiques (10x10x10)cm³ dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours

Après séchage des éprouvettes jusqu'à une masse constante, On mesure le masse de l'éprouvette dans l'air, puis dans l'eau, la différence des deux pesées correspond au volume de l'éprouvette et la masse volumique égale à :

$$\rho_b = \frac{P_{air}}{P_{air} - P_{imm}} \quad \dots[\text{Eq.II.2}]$$

avec :

ρ_b : masse volumique

P_{air} : masse de l'éprouvette dans l'air

P_{imm} : masse de l'éprouvette dans l'eau



Figure II.13. Dispositif d'essai par pesée hydrostatique.

B. Absorption par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion totale est déterminée selon la norme NBN B 15-215 :1989 [14]

Le principe de l'essai consiste à déterminer la variation de la masse d'un échantillon de béton immergé dans un bac d'eau jusqu'à une masse constante, soit la masse M_I

Après séchage à 105°C, soit la masse M_2 , l'absorption d'eau par immersion A_w est exprimée en pourcentage de la masse sèche et est calculée par l'équation (II.3) :

$$A_w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100\% \quad \dots \text{ [Eq. II.3]}$$

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque type du béton sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

C. Déformations différées : Retrait et le gonflement (Norme NA440) [15]

Le retrait est un paramètre important car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton et du mortier.

L'essai de retrait a été effectué conformément à la norme NA-440. L'essai a été réalisé sur trois échantillons de dimensions $(8 \times 8 \times 30) \text{cm}^3$. La longueur des échantillons a été mesurée au bout de 24 heures ce qui équivaut à $t=0$, puis les éprouvettes ont été conservées dans deux milieux différents, certaines à l'air libre et les autres dans l'eau.

Le retrait a été mesuré à l'aide d'un appareil « rétractomètre » munie d'une tige d'étalonnage et d'un comparateur digital de précision $\pm 0,001 \text{mm}$. Un suivi continu a été réalisé afin d'évaluer les variations dimensionnelles à l'âge de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 60 et 90 jours après le démoulage.



Figure II.14. Mesure de retrait à l'aide d'un rétractomètre digital.

II.7.2.2. Propriétés mécaniques

II.7.2.2.1. Essais destructif :

A. Essai de compression : (Norme NA 427) [16]

La résistance à la compression, est l'un des facteurs essentiels, pour juger la réussite de la valorisation, puisque elle est une exigence principale, pour la stabilité des structures, cette propriété doit être définie et spécifiée attentivement.

Selon la norme NA-427, l'essai consiste à effectuer un effort de chargement sur une éprouvette jusqu'à rupture dans une presse d'essai de compression.

La presse utilisée est une machine de type CONTROLS ayant une capacité maximale de 3000kN. Les éprouvettes doivent être bien centrées entre les deux plateaux, afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.

Dans notre étude, nous avons utilisé des éprouvettes cubiques de dimensions $(10 \times 10 \times 10) \text{cm}^3$. Après conservation des éprouvettes dans l'eau, elles sont séchées à atmosphère libre du laboratoire pendant 24h avant l'âge d'essai.

L'essai de compression a été réalisé aux échéances de 14, 28, 45, 56, 71, 120 et 210 jours de façon à observer l'évolution progressive des performances. Pour chaque échéance, trois éprouvettes ont été testées.



Figure II.15. Presse utilisée pour l'essai de compression.

B. Résistance au fendage (ou essai brésilien) (Norme NA 430) [17]

Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de fendage, par application de forces de compression radiales suivant deux génératrices diamétralement opposées (figure II.16).

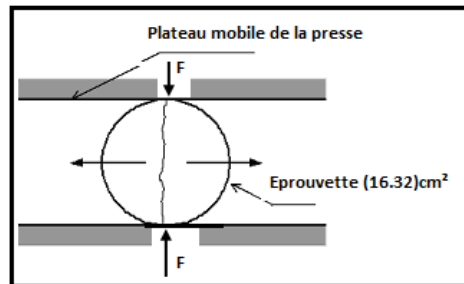


Figure II.16. Schéma essai brésilien.

L'essai de traction par fendage a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16x32)cm² en utilisant un dispositif convenable. La résistance à la traction du béton se déduit de la force appliquée «F» par la formule empirique suivante :

L'essai de traction par fendage a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm² en utilisant un dispositif convenable. La résistance à la traction du béton se déduit de la force appliquée «F» par la formule empirique suivante :

$$\sigma = 0,55 \left(\frac{F}{d \times l} \right) \quad \dots[\text{Eq. II.4}]$$

Où :

F représente la charge de compression transversale provoquant la rupture par fendage, d et l étant respectivement le diamètre (16cm) et la longueur (32cm) de l'éprouvette testée.



Figure II.17. Réalisation essai traction par fendage.

C. Essai de traction par flexion (Norme NA 428) [18]

L'essai de flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28)cm³ selon la norme NA428, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de l'équation (II.5) :

:

$$\sigma_t = \frac{1,5FL}{B^3} \quad [\text{Eq. II.5}]$$

σ_t : résistance à la traction par flexion en (MPa)

F : charge à la rupture en (N)

L : distance entre appuis (= 210mm)

B : dimension transversale de l'éprouvette ($B = 70\text{mm}$)



Figure II.18. Essai de traction par flexion.

II.7.2.2.2. Essais non destructif :

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton, est de fournir une évaluation correcte de la qualité de la structure du matériau, quelque soient son âge et son état de dégradation. Ainsi, elle fournit, un moyen fiable, rapide, sûre, peu coûteux et non invasif, permettant l'estimation des propriétés et offre la possibilité de contrôle direct de la qualité, pour

des constructions en béton saines ou endommagées par le séisme, la fatigue, l'incendie ou d'autres scénarios catastrophiques, en raison de la simplicité de son emploi et de son coût raisonnable.

A. Essai par Ultra-son : (Norme NA 5027) [19]

Evidemment, cette méthode est applicable aussi au laboratoire, elle nécessite des mesures de la vitesse d'impulsion du son. Pour évaluer les propriétés d'isolation acoustique des bétons, les vitesses d'impulsion ont été mesurées par la méthode de transmission directe. L'appareil utilisé, est composé de trois parties comprenant, un transducteur, un récepteur et un écran digital, pour noter les mesures au moment de leurs stabilisations (figure II.19).

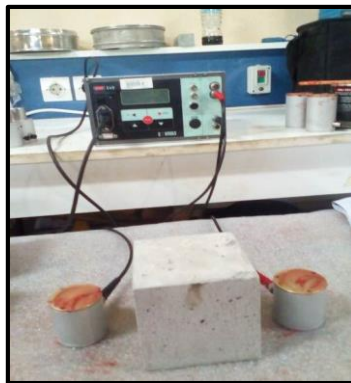


Figure II.19. Appareil à ultrasons.

Cet essai consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son dans le béton à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure, et deux têtes (une émettrice et l'autre réceptrice).

Les essais ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes cubiques $(10 \times 10 \times 10) \text{cm}^3$. Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microseconde ainsi La vitesse de propagation V en m/sec ;

Avec l'essai d'ultrason on peut calculer le module d'élasticité dynamique E_d et la résistance à la compression

$$E_d = \rho_b V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \dots [\text{Eq. II.6}]$$

Tels que :

ρ_b : masse volumique du béton (t/m^3)

V : vitesse de propagation de son (km/s);

ν : coefficient de poisson du béton (pris égal à 0,2).

Tableau II.8 : Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion.

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

B. Essai du scléromètre (NF EN 12504-2) [20]

Il s'agit sans aucun doute de l'instrument le plus utilisé dans le diagnostic des ouvrages déjà bâtis. Le scléromètre est composé d'une tige en acier, sortant d'un cylindre (figure II.20), qui est appuyée sur le béton et comprime un ressort. En fin de course, ce ressort projette une masse sur la tige, sur laquelle elle rebondit ; ce rebondissement, d'autant plus important que le béton est dur, est mesuré soit par un index (sur les anciens modèles) soit sur un cadran digital pour les modèles récents.

Il existe une relation directe entre la dureté superficielle et la résistance du béton à la compression.



Figure II.20. Photo du scléromètre utilisé.

II.7.2.3. Durabilité

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers...etc.) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible. Dans ce travail, on va étudier les indicateurs de la durabilité les plus déterminants.

II.7.2.3.1. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de durabilité au sens du document publié par l'AFGC en 2004.

Parmi les méthodes à disposition, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique.

Après conservation des éprouvettes (10x10x10)cm³ dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours, et en utilisant une balance hydrostatique, soit:

- M_{eau} : la masse de l'éprouvette immergée dans l'eau
- M_{air} : la masse de l'éprouvette dans l'air alors qu'il est encore imbibé (masse saturée dans l'air)
- M_{sec} : la masse de l'éprouvette après séchage a une température $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.

$$P_0 = \frac{V_0}{V_a} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad \dots[\text{Eq. II.7}]$$

II.7.2.3.2. Absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes du béton non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Il est utilisé en complément à d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton et du mortier.

Conduite de l'essai

Après démoulage, les éprouvettes cubique du béton (10x10x10)cm³ sont conservées jusqu'à l'âge de 28 jours dans l'eau. Elles sont ensuite extraites de l'eau et conservées dans une

étuve ventilée à 60°C jusqu’à une masse constante. Ensuite les faces latérales des éprouvettes sont imperméabilisées par la résine dont le but de forcer l'eau à adopter un cheminement uni-axial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces.

Après le séchage complet de la résine, les éprouvettes sont immergées dans une nappe d'eau de hauteur 3mm durant 48 h.

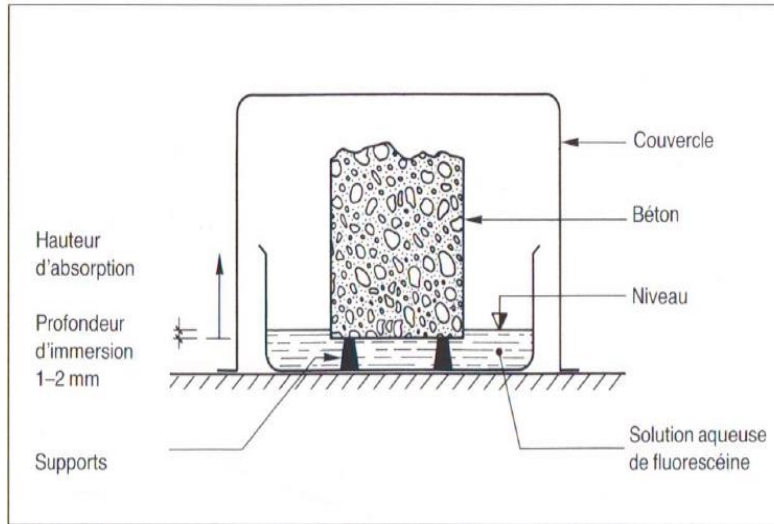


Figure II.21. Dispositif de l'essai de capillarité.

L’essai d’absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme NA 255 [2] et consiste à déterminer la quantité d’eau absorbée par le béton en fonction du temps (1min, 4min, 9min, 16min, 25min, 36min, 49min, 64min, 2h, 4h, 8h, 24h, 48h) À chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l’aide d’un chiffon humide, pesées puis replacées dans le récipient.

Pour une échéance donnée, l’absorption capillaire «CA» est exprimée en grammes par millimètre carré (g/mm²), par l’équation (II.8) :

:

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S_2} \quad [\text{Eq. II.8}]$$

Avec :

M_0 : masse sèche de l’éprouvette avant immersion dans l’eau en gramme.

M_j : masse de la même éprouvette après le temps requis d’absorption en grammes.

S_2 : section de la base de l’éprouvette en millimètre c’est-à-dire 100mm.

II.7.2.3.3. Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau sous pression)

La présente norme européenne NFP18-436 [21] spécifie une méthode de détermination de la profondeur de pénétration d'eau sous pression dans un béton durci conservé dans l'eau de diamètre supérieur à 150 mm.

Le principe de l'essai consiste à appliquer de l'eau sous pression de 500 ± 50 KPa sur la surface du béton durci pendant 72 heures. Après les 72 heures les éprouvettes sont écrasées par fendage, et on mesure la profondeur de pénétration d'eau.

Le dispositif permet de placer l'éprouvette, de dimension donnée, de telle façon que la pression d'eau peut s'exercer sur la zone d'essai. L'éprouvette doit être cubique, cylindrique ou prismatique. La dimension de l'arête ou du diamètre ne doit pas être inférieur à 150mm. Pour notre travail on a utilisé des éprouvettes cubiques $(15 \times 15 \times 15) \text{cm}^3$. La surface de l'éprouvette qui reçoit la pression d'eau est rendue rugueuse à l'aide d'une brosse métallique, immédiatement après le démoulage, puis elles sont conservées dans l'eau pendant 28 jours. Elles ont ensuite desséchées dans une étuve ventilée à 60°C jusqu'à masse constante.



Figure II.22. Photo du perméabilimètre à l'eau utilisé.

II.7.2.3.4. Perméabilité à gaz

La perméabilité au gaz a été mesurée à l'aide d'un perméabilimètre à charge constante de type Cembureau (Figure II.23).

Le coefficient de perméabilité apparent $K(\text{m}^2)$ est calculé à partir de l'équation II.9 qui est une adaptation de la relation de Hagen Poiseuille, pour un fluide visqueux compressible en écoulement laminaire à travers un milieu poreux.

$$K = \eta \frac{2QP_0h}{A(P^2 - P_a^2)} (m^2) \quad \dots[\text{Eq. II.9}]$$

Avec :

K : le coefficient de perméabilité (m^2)

h : hauteur du spécimen de test dans le sens du flux (en m)

A : La zone en coupe de spécimen de test (en m^2)

η : la viscosité dynamique du gaz de test : air à 20°C $\eta = 1.82 \times 10^{-5}$ (Ns/ m^2)

Q : le débit du gaz de test dans le sens du flux (m^3/s)

P : la pression d'entrée absolue (N/ m^2)

P_a : la pression de sortie (pour ce test, cela correspond à la pression atmosphérique N/ m^2)

P_0 : la pression à laquelle le débit est mesuré en (N/ m^2), ici elle est équivalente à la pression d'entrée atmosphérique ($P_0 = P_a$).

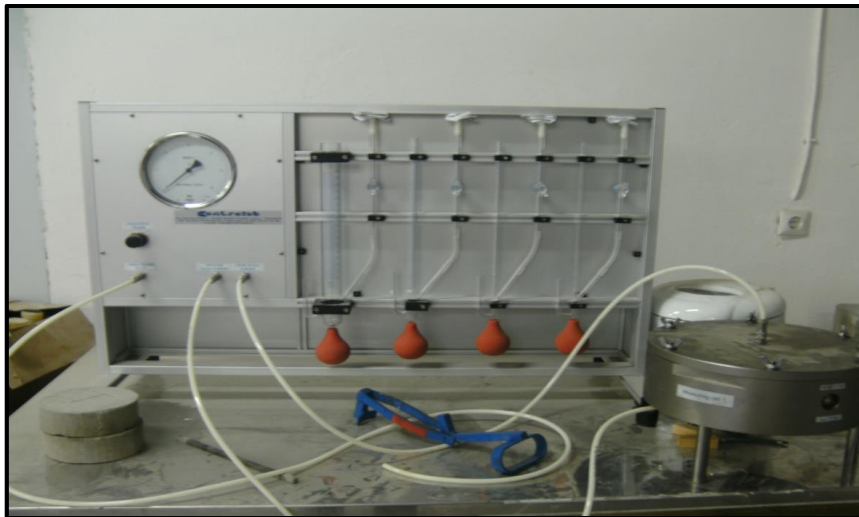


Figure II.23. Photo du perméabilimètre à gaz utilisé.

II.7.2.3.5. Essai d'attaques chimiques

Les altérations chimiques du béton, observées en présence d'agents agressifs, qu'ils soient minéraux organiques ou biologiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines. Elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation des composés nouveaux dont les conséquences sont des ordres macroscopiques : Mécaniques – chimiques : Affaiblissement des propriétés liantes, modification de la porosité et des propriétés de transport du gaz et du liquide.

Après une cure dans l'eau de 28 jours (temps zéro), les éprouvettes de béton de $(10 \times 10 \times 10) \text{cm}^3$ et $(7 \times 7 \times 28) \text{cm}^3$ ont été pesées pour déterminer la masse (M_1) avant d'être soumises à l'immersion durant 14, 28, 45, 90 et 180 jours dans trois différents types de solutions d'attaque :

- une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 concentrée à 5% et de $\text{pH} = 1$,
- une solution de sulfate de sodium Na_2SO_4 concentrée à 5% et de $\text{pH} = 11$,
- de l'eau de mer provenant de la mer méditerranéenne, son pH est de 8 et sa salinité est de 38,4 - 41,2g/L [22].

Les solutions d'attaque ont été renouvelées chaque 15 jours. Pour évaluer la durabilité des bétons vis-à-vis de l'attaque des sulfates de sodium Na_2SO_4 , de l'acide sulfurique, de l'eau de mer, l'évolution des éléments suivants a été suivie :

- Le gain ou la perte en masse en fonction de la durée d'exposition selon l'équation (II.10) :

$$\text{Perte en masse}(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad \dots[\text{Eq. II.10}]$$

Où :

M_2 : la masse en (gr) à l'âge i

M_1 : la masse initiale en (gr) avant immersion dans le milieu agressif.

Les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau distillée pour éliminer le béton altéré. Après une demi-heure, une pesée est enregistrée.

- La résistance à la compression en fonction de la durée d'exposition.
- La résistance à la traction par flexion fonction de la durée d'exposition.



Figure II.24. Acide sulfurique (H_2SO_4) et sulfate de sodium (Na_2SO_4) utilisés.



Eau de mer



solution basic(Na_2SO_4)



Solution acide

Figure II.25. Conservation des éprouvettes dans les différents milieux.

II.8. CONCLUSION

- Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés physiques
- Les essais de caractérisation de la phase inerte : sable + gravier laissent apparaître que les granulats utilisés dans notre travail se sont des granulats courant utiliser pour les bétons hydrauliques.
- Le projet expérimental associe des essais de caractérisation à l'état frais des différentes compositions du béton ainsi des essais de caractérisation à l'état durci : physique, mécanique et de durabilité.

Les résultats expérimentaux de ce programme d'essai sont présentés dans le chapitre suivant.

Références bibliographiques du deuxième chapitre

- [1] Norme NA 2607 : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.
- [2] Norme NA 255 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.
- [3] Norme NA 463 : Granulats - Détermination de la propreté superficielle.
- [4] Norme NA 455 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines - Equivalent de sable.
- [5] Norme NA 458 : Granulats - Essai de Los Angeles.
- [6] Norme NA 442 : Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.
- [7] <http://www.gica.dz/fiche-technique-ciments>. Consulté le 25-03-2019.
- [8] Norme NA 2600 : Bétons - Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques.
- [9] Normes NA 2610 : Bétons - Mise en place par piquage.
- [10] Norme NA 431 : Béton frais - Détermination de la consistance - Essai d'affaissement.
- [11] Norme NA 436 : Béton frais compacté - détermination de la masse volumique.
- [12] Norme NA 434 : Béton - Détermination de la teneur en air du béton frais - Méthode de la compressibilité.
- [13] Norme NA 435 : Béton durci - Détermination de la masse volumique.
- [14] Norme NBN B 15-215 : Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion.
- [15] Norme NA 440 : Ciments - Essais de retrait et de gonflement.
- [16] Norme NA 427 : Bétons - Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes.
- [17] Norme NA 430 : Bétons - Détermination de la résistance à la traction par fendage des éprouvettes.
- [18] Norme NA 428 : Bétons - détermination de la résistance à la flexion des éprouvettes.
- [19] Norme NA 5027 : Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton.
- [20] Norme NF EN 12504-2 : Essais pour béton dans les structures - Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement.
- [21] Norme NF P18-436 Essai pour béton durci- Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression perméabilité à l'eau.
- [22] <http://doc.lerm.fr/salinite-l'eau-mer>. Consulté le 23-12-2018.

CHAPITRE III.
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSES

PARTIE A :

ETATS FRAIS ET PERFORMANCES MECANIQUES

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter et interpréter l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre du programme expérimental élaboré. La première partie sera consacrée à l'étude des propriétés des bétons reformulés à l'état frais. Nous analysons ensuite l'influence des granulats de caoutchouc sur les propriétés physiques et les résistances mécaniques des bétons modifiés.

III.2. RESULTATS ET INTERPRETATION

III.2.1. A l'état frais

a) Essai d'affaissement

Pour la formulation des bétons étudiés, nous avons choisi de confectionner des mélanges ayant un rapport Eau/Ciment fixe, comme indiqué au deuxième chapitre, et ce dans le but d'obtenir une consistance comparable refluant l'effet de la teneur en granulats de caoutchouc dans les mélanges.

Le tableau III.1 et la figure III.1 présentent les valeurs de l'essai d'affaissement au cône d'Abram's en fonction du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc pour les différentes compositions retenues.

Tableau III.1 : Valeurs de l'affaissement pour les quatre formulations de bétons.

Désignation des bétons				
	BO	BC 10%	BC 17,5%	BC 25%
Affaissement (cm)	6	8,5	9	14

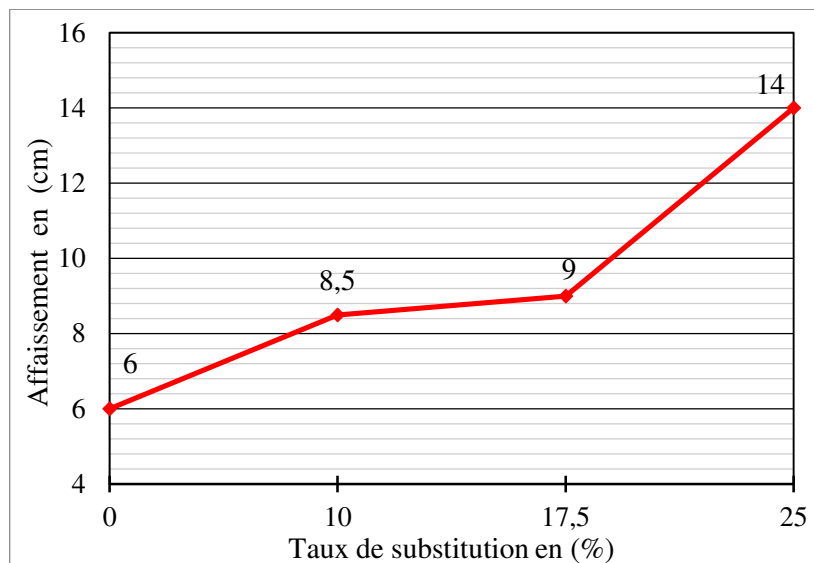


Figure III.1. Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de caoutchouc.

D'après la figure III.1, on remarque que l'ouvrabilité des bétons représenté à travers l'affaissement au cône d'Abram's augmente de manière concomitante avec l'augmentation du taux de substitution du sable par les granulats de caoutchouc. En effet l'affaissement passe de 6cm pour le béton ordinaire à 8,5cm pour un béton contenant 10% de substitution et 9cm pour un taux de substitution de 17,5%. Par ailleurs, on constate que le béton BC25% présente la plus grande ouvrabilité (affaissement =14cm). Cette augmentation de l'ouvrabilité s'explique par la nature hydrophobe (caractérise les surfaces qui semblent repousser l'eau) des granulats de caoutchouc qui conduit à une diminution de la quantité d'eau absorbée dans les mélanges causée par le remplacement des granulats de sable naturel. Ce constat expérimental a été observé par [Kotresh K. M. et Belachew M.G \[1\]](#).

Pour le béton BC25% à cause de sa grande fluidité (14cm ce qui le classe selon la norme NF EN 206 dans la catégorie des bétons très plastique, très humide et à maniabilité élevée) le risque de ségrégation se trouve accru. Et dans le but de mieux cerner ce risque pour cette composition nous avons entrepris un essai d'écrasement par fendage sur des éprouvettes cubiques afin de constater de visu l'état de répartition des granulats au sein de la matrice.



Figure III.2. Distribution des particules de caoutchouc dans une éprouvette BC25% écrasée par fendage.

D'après la photo III.2, on peut constater que le béton de caoutchouc reste homogène avec une répartition relativement uniforme des granulats et aucun signe de ségrégation n'est constaté.

b) Masse volumique à l'état frais

Dans le tableau III.2 et la figure III.3 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la masse volumique pour les quatre formulations du béton d'étude. Ces résultats représentent la moyenne de trois essais par série de mesures.

Tableau III.2 : Masses volumiques des formulations étudiées.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
Masse volumique (kg/m ³)	2395	2377	2350	2298

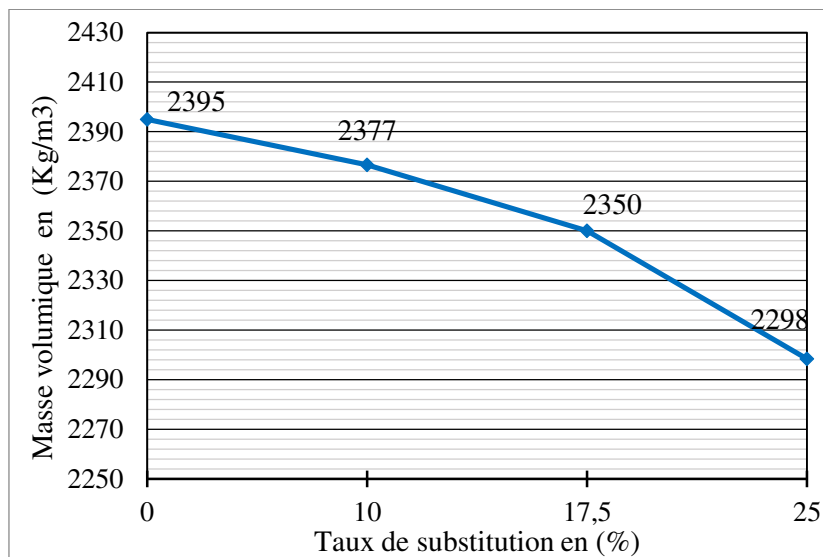


Figure III.3. Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution.

La masse volumique à l'état frais des bétons diminue avec l'augmentation du taux de substitution en granulat de caoutchouc. Avec des taux de substitution entre 10% et 25% de caoutchouc, on obtient des diminutions variant entre 0,8 et 4,0%. Cette baisse bien que peu significative de la masse volumique s'explique assez logiquement par le fait que le produit de substitution (granulats de caoutchouc) est beaucoup plus léger que le sable naturel (masse volumique de 2650kg/m^3 pour le sable contre 870kg/m^3 pour les granulats de caoutchouc).

Cette constatation a été signalée dans plusieurs études entreprises sur des composites cimentaires caoutchoutés, où il a été conclu que l'incorporation du caoutchouc granulaire, en particulier à des teneurs en caoutchouc élevées, réduit la masse volumique. Cette réduction, est d'autant plus significative pour des teneurs en caoutchouc plus élevées [2].

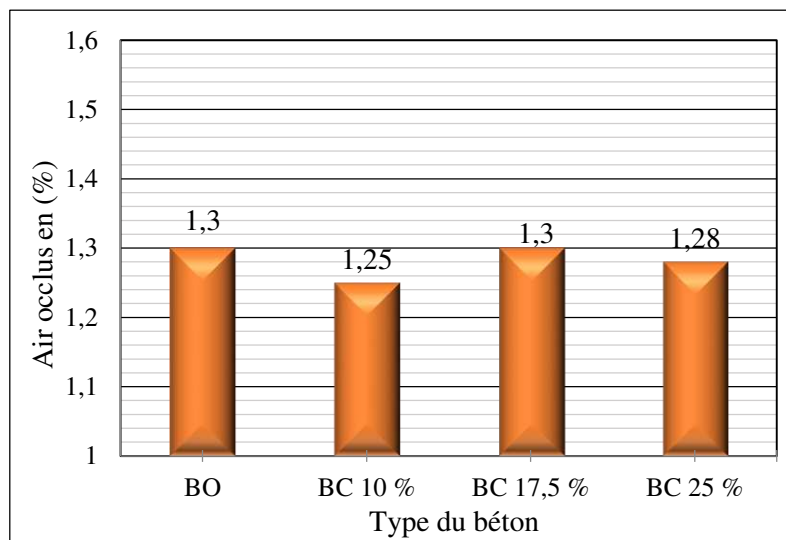
c) Teneur en air occlus

L'air occlus dans le béton est le résultat d'une consolidation incomplète, généralement, il peut atteindre 0,6 à 2,5% dans un béton ne contenant pas d'agent entraîneur d'air. Sa présence est indésirable car elle s'accompagne d'une baisse des performances mécaniques du béton durci, mais malheureusement il est souvent inévitable [2].

Dans le tableau III.3 et la figure III.4 nous avons reporté les résultats des mesures de l'air occlus pour les quatre formulations de bétons d'étude.

Tableau III.3 : Valeurs de l'air occlus pour les quatre formulations de bétons.

Désignation des bétons				
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
Air occlus (%)	1,3	1,25	1,3	1,28

**Figure III.4.** Valeurs de l'air occlus pour les quatre formulations étudiées.

D'après la figure III.4 on peut constater que les écarts, exprimés en pourcentage, de l'air occlus pour les quatre formulations étudiées sont très faibles et varient entre 1,6 et 4%. Ainsi l'effet de la substitution sur la compacité du mélange est presque insignifiant.

Ce résultat n'est pas en accord avec les autres études qui ont observés que la quantité d'air occlus dans les bétons de caoutchouc augmente avec l'augmentation du taux de substitution [3, 4, 5]. Par exemple **Medine M. et al [3]** dans son étude sur les bétons légers caoutchoutés et pour des taux de substitutions du gravier de 5% ; 7,5% et 10% a constaté que les valeurs de l'air occlus ont été augmentées par rapport au béton léger ordinaire de [16,7 ÷ 24,8] %.

III.2.2. A l'état durci

III.2.2.1. Caractéristiques physiques

a) Masse volumique à sec

Dans le tableau III.4 et la figure III.5 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la masse volumique à sec en fonction du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc pour les différentes compositions.

Tableau III.4 : Valeurs de la masse volumique pour les quatre formulations.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
Masse volumique (kg/m ³)	2353	2281	2274	2236

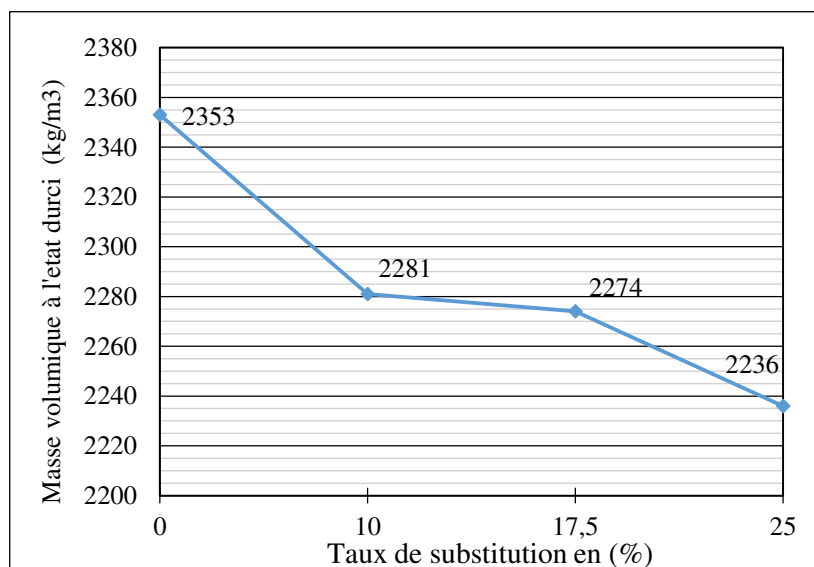


Figure III.5. Valeurs de la masse volumique pour les quatre formulations.

Comme il été prévue, la substitution d'une partie du sable par de la poudre de caoutchouc s'accompagne d'une baisse de la masse volumique du béton durci. Cette baisse s'explique par le fait que la poudrette de caoutchouc utilisée présente une masse volumique de 870 kg/m³, contre une masse volumique de 2650 kg/m³ pour le sable, l'opération de substitution s'accompagne ainsi d'une baisse des masses volumiques. Par ailleurs cette baisse croît de

manière concomitante avec le taux de substitution. Par rapport au béton témoin, on remarque une baisse de la masse volumique de 3,1% pour le BC10% contre une baisse de 5% pour le béton BO25%. Plusieurs recherches, réalisées sur des bétons caoutchoutés, ont abouti aux mêmes résultats [6, 7].

b) Absorption par immersion totale

La quantité d'eau absorbée par un matériau composite lors de son immersion dans l'eau pendant une durée déterminée est appelée eau d'absorption. Cette propriété est utilisée pour déterminer la susceptibilité aux infiltrations d'eau à travers les pores du composite insaturé lors de son immersion dans l'eau. Selon **Dodoo-Arhin D. et al [8]** cette grandeur est affectée notamment par les pores (vides) présents dans le composite.

Dans le tableau III.5 et la figure III.6 nous avons regroupé les résultats des mesures de la absorption par immersion totale pour les quatre formulations du béton d'étude.

Tableau III.5 : Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les quatre formulations.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
$A_w(\%)$	6,5	7,66	7,72	7,73

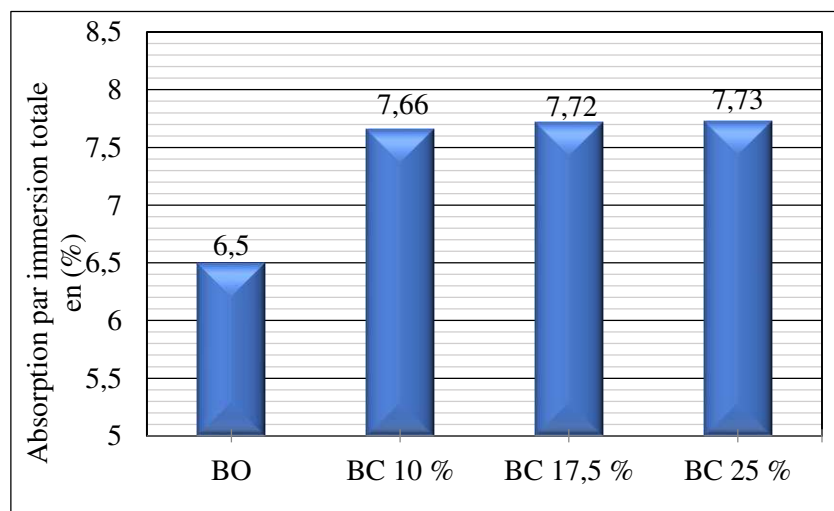


Figure III.6. Valeurs de l'absorption par immersion totale pour les quatre formulations.

D'après la figure III.6, on peut remarquer que l'absorption d'eau par immersion totale du béton ordinaire est plus faible que celle des bétons de caoutchouc, et elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution.

Par rapport au béton ordinaire, on observe une augmentation de 17,8% pour le BC10% contre une augmentation de 19% pour le béton BC25%. Ce résultat pourrait être lié aux pores générés par les granulats de caoutchouc en raison de leurs natures non polaire et de leur tendance à piéger l'air en surface. L'air piégé dans le béton contenant des granulats de caoutchouc rend le béton plus poreux, devenant ainsi plus perméable et permettant ainsi une absorption accrue d'eau [9]. **Onuaguluchi O. et Panesar D.K. [10]** et **Gesoglu M. et al [11]**, ont remarqué la même tendance dans leurs résultats, relatifs à l'étude des bétons contenant du caoutchouc granulaire.

c) Déformations différées

Le retrait libre

Le résultat des essais du retrait libre sont illustrés dans la figure III.7.

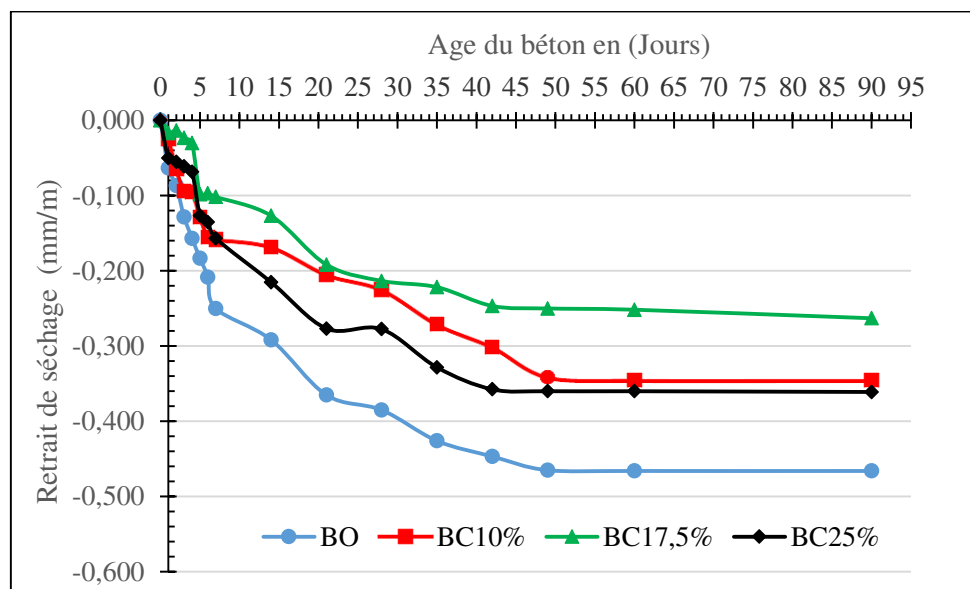


Figure III.7. Evolution du retrait de séchage dans le temps.

D'après la figure III.7, on remarque que pour les quatre types du béton, le retrait augmente avec l'augmentation du temps de séchage, ceci est dû à la perte continue d'eau capillaire du béton.

On remarque également que le retrait de séchage du béton de référence est plus grand que celui des bétons de caoutchouc. Le retrait diminue avec l'augmentation du taux de substitution jusqu'à le pourcentage 17,5%, au-delà, le retrait de séchage commence à augmenter. Cette diminution de retrait est expliquée par le fait que les bétons à base de granulats de caoutchouc absorbent moins d'eau conservant ainsi plus longtemps la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment [12]. Des résultats similaires sont remarqués par **Boudaoud Z. et Beddar M. [12]**.

A l'âge de 90 jours le retrait de séchage atteint les valeurs de -0,345mm/m (BC10%), 0,263mm/m (BC17,5%) et -0,361mm/m (BC25%), soit une diminution d'environ 26%, 44% et 23% respectivement par rapport à celui du béton de référence (BO) qui était de -0,466mm/m.

Gonflement

Pour l'essai de gonflement, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau jusqu'à l'âge de mesure. Les résultats sont présentés dans la figure III.8.

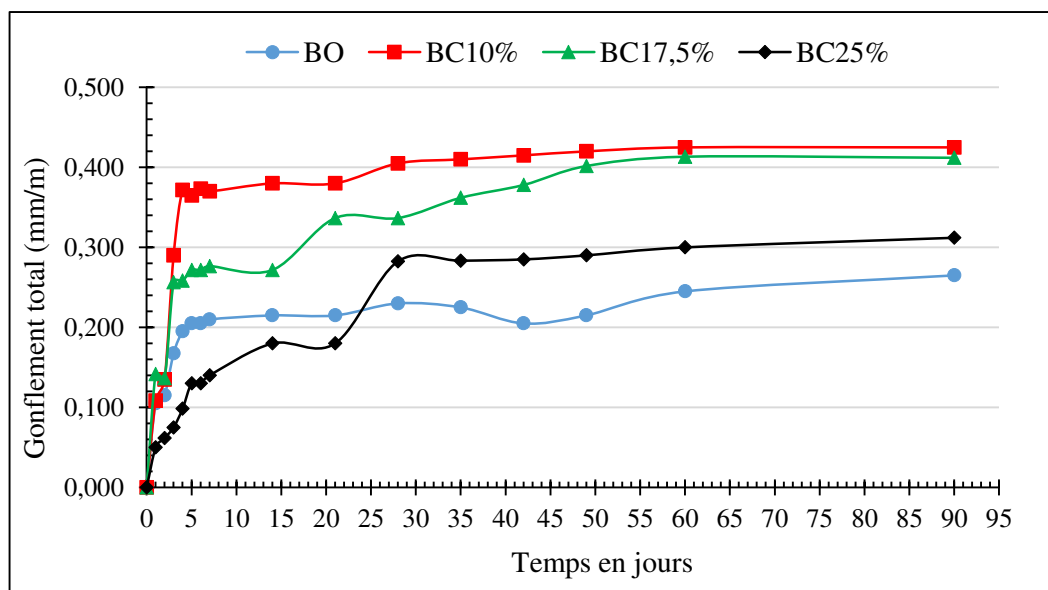


Figure III.8. Variation du gonflement total dans le temps.

On remarque que pour les quatre types de bétons, un accroissement du gonflement dans le temps, on constate également que le gonflement du béton de référence est plus faible que celui des bétons de caoutchouc, et que le gonflement du béton de caoutchouc diminue avec l'augmentation du taux de substitution. Sur le même sujet, **Sukontasukkul P. et**

Tiamlom K. [13] ont étudié l'influence de la taille des granulats de caoutchouc sur l'expansion, il ont remarqué que le béton ordinaire présente une expansion plus faible que le béton de caoutchouc, et ceci pour les deux tailles de caoutchouc étudiés, surtout pour des immersions prolongés (notamment après 20 jours).

En terme de ration, à l'âge de 90 jours le gonflement atteint les valeurs de 0,425mm/m (BC10%) ; 0,412 mm/m (BC17,5%) et 0,312 mm/m (BC25%), soit une augmentation d'environ 60% ; 55% et 18% respectivement par rapport à celle du béton de référence (BO) qui était de -0,265mm/m.

III.2.2.2. Caractéristiques mécaniques

a) *Résistance à la compression à 28 jours*

La détermination des valeurs des résistances à 28 jours des bétons étudiés est obtenue par un essai destructif sur presse traditionnelle et par un essai non destructif à l'aide d'un scléromètre digital.

Résistance à la compression à 28 jours par presse

Les moyennes des résistances mécaniques obtenues à 28 jours pour les différentes formules de bétons testées, sur trois éprouvettes, sont données dans le tableau III.6 et présentées sur la figure III.9.

Tableau III.6 : Résistances ultimes à la compression pour les quatre formulations.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
résistance à la compression en (MPa)	29,15	28,31	21,95	19,14

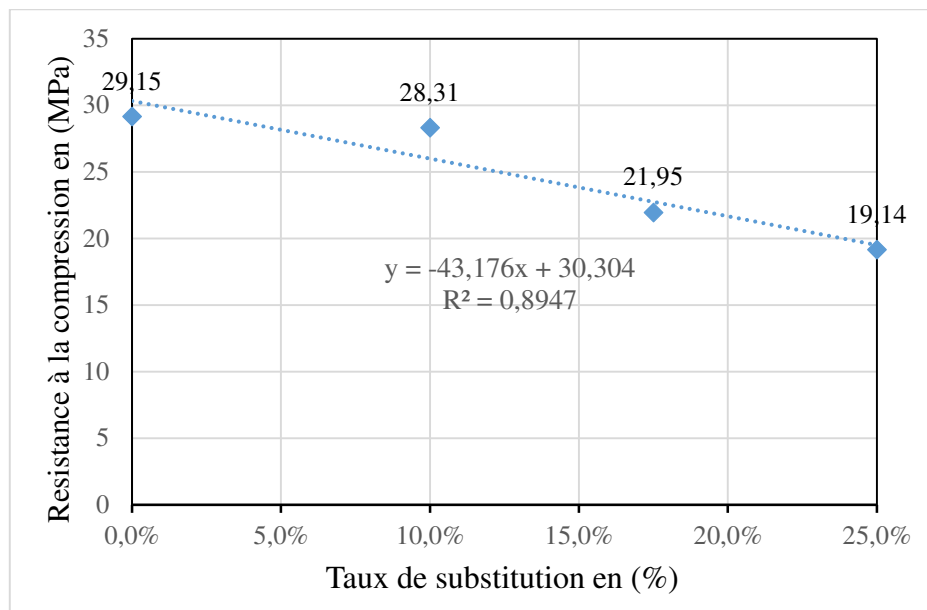


Figure III.9. Résistances en compression des bétons.

D'après la figure III.9 on remarque que la substitution d'une partie du sable par des granulats en caoutchouc s'accompagne d'une baisse de résistance à la compression, cette baisse croît avec l'augmentation du taux de substitution. Au bout de 28 jours de conservation des éprouvettes, la résistance à la compression du béton de référence (BO) s'élève 29,15MPa pour le béton de référence (BO) contre des résistances de 28,31 ; 21,95 et 19,14MPa pour les bétons de caoutchouc BC10%, BC17,5% et BC25%. Les écarts constatés varient ainsi entre 2,9 à 34,3%. Cette même tendance à la baisse des performances mécaniques des bétons contenant des granulats de caoutchouc a été observée par d'autres chercheurs dont notamment [14], [15] et [16].

Une opération de régression des valeurs nous a permis d'établir une relation entre le module d'élasticité dynamique et le taux de substitution en caoutchouc.

$$\text{Résistance (\%)} = 30 - 43,18 \times (\%) \quad \dots [\text{Eq. 3.1}]$$

Avec :

Résistance (%) : la résistance du béton de caoutchouc pour un taux de substituant (%)

30 : la résistance du béton souhaitée à 28 jours en (MPa).

(%) : taux de substitution en caoutchouc en (%)

Donc :

Dans le cas général, la résistance d'un béton de caoutchouc avec un taux de substitution donné est :

$$\text{Résistance (\%)} = \text{résistance de référence (BO)} - 43,18 \times (\%) \dots [\text{Eq. III.2}]$$

Résistance sclérométrique à la compression à 28 jours

Les valeurs de la résistance à la compression obtenues à 28 jours par l'utilisation de scléromètre pour les différentes formules de bétons testées, sont données dans le tableau III.7 et présentées sur la figure III.10.

Tableau III.7 : Valeurs des résistances à la compression pour les quatre formulations.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
Résistance à la compression en (MPa)	33,4	27,4	29,4	29,3

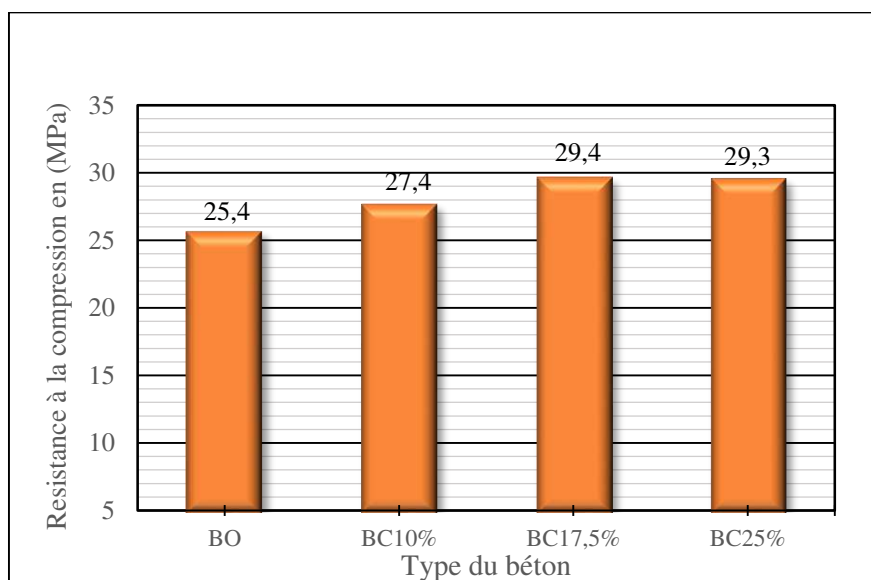


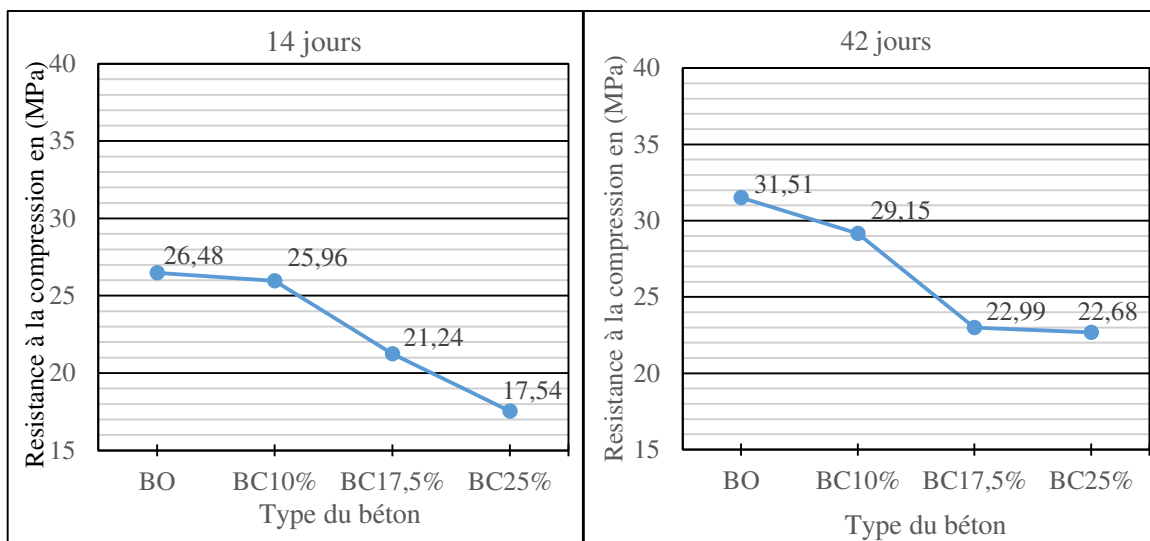
Figure III.10. Résistances en compression des bétons déterminées par le scléromètre.

Les résultats de l'essai sclérométrique donnent des valeurs optimistes pour la résistance en compression des bétons. Pour le béton ordinaire, l'écart constaté est de 15%, et intègre ainsi la précision de cet essai. En effet, et selon les résultats de la littérature spécialisée, la précision

du scléromètre est d'environ 30%. Cependant concernant les bétons à base de poudrette de caoutchouc, les écarts observés sont nettement plus élevés pour les deux taux 17,5 et 25%. A titre d'exemple pour le BC17,5%, nous avons eu un écart entre résistance réelle et sclérométrique de 34%, et un écart de 53% pour le béton BC25%. Ce qui laisse à penser l'inadaptation d'un tel essai pour ce type de béton. En effet le principe du scléromètre se base sur la mesure d'un rebond et la présence de caoutchouc, matière réputée pour son absorption des vibrations et chocs atténue considérablement le rebond.

b) Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton

Afin d'observer l'évolution de la résistance à la compression des bétons testés dans le temps, nous avons procédé à des mesures respectivement à 14, 28, 45, 56, 71, 120 et 210 jours d'âges des éprouvettes. Les résultats obtenus sont rassemblés dans les figures III.11 et III.12.



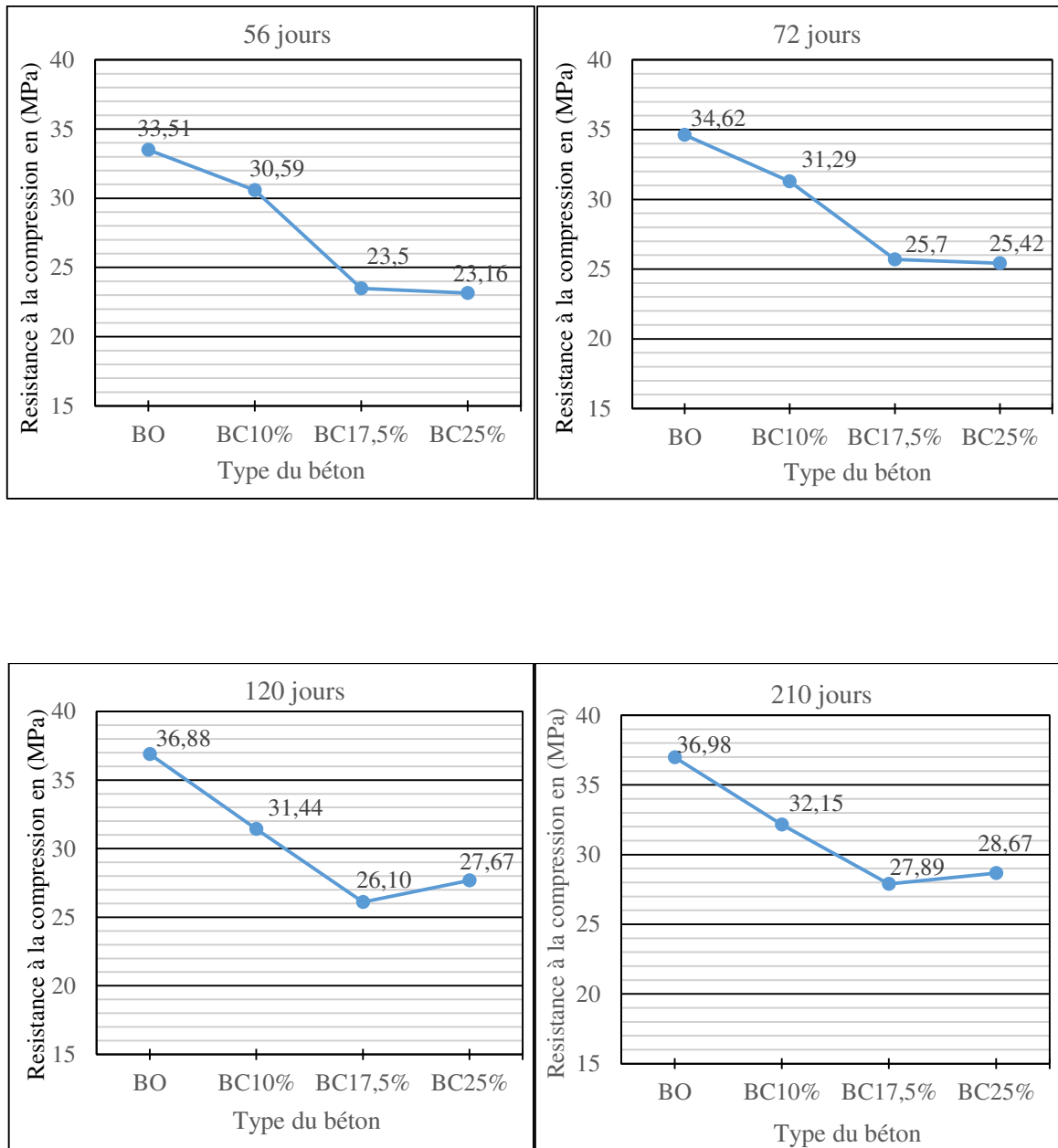


Figure III.11. Résistances à la compression à l'âge de 14, 42, 56, 72, 120 et 210 jours.

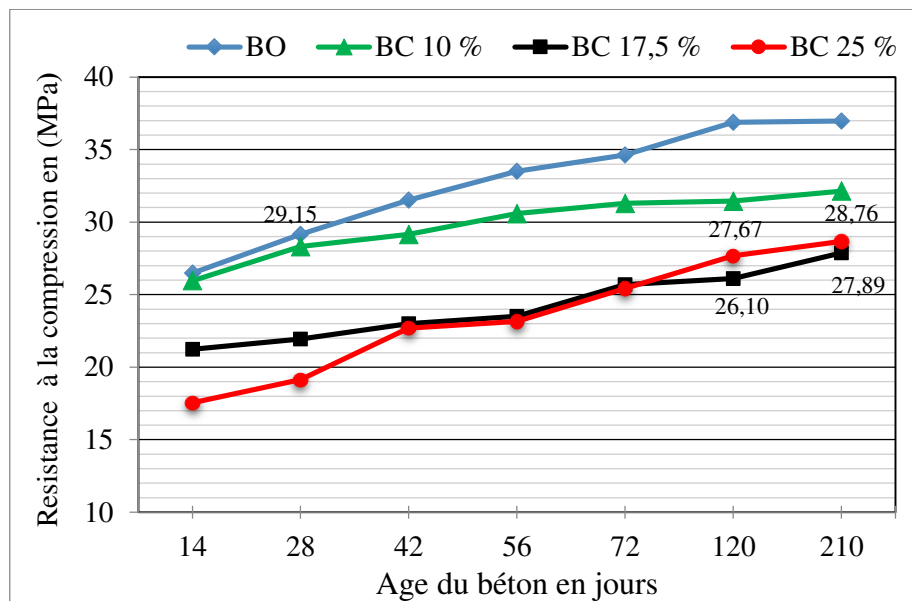


Figure III.12. Evolution de la résistance à la compression dans le temps pour les quatre bétons étudiés.

L'incorporation des granulats de caoutchouc réduit la résistance à la compression d'une façon considérable avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc comme le montre la figure III.11, les résistances les plus faibles sont obtenues avec la composition BC25%.

D'après la figure III.12, on remarque la résistance à la compression continue toujours augmentée dans le temps et ça pour les quatre bétons étudiés, en raison de la poursuite de cristallisation du ciment (durcissement). Pour les bétons de caoutchouc, et à l'exception de la composition BC10%, l'augmentation de la résistance dans le temps (120 et 210 jours) reste inférieure à la résistance à 28 jours du béton de référence BO (29,15MPa).

A l'âge de 210 jours, la résistance à la compression été de 36,98MPa pour le béton de référence (BO) contre une résistance à la compression de 27,89MPa pour le BC17,5% et de 28,76MPa pour le béton BC25%, donc des baisses de résistance de 24,6 et 22,5% respectivement.

Les résultats trouvés confirment les études réalisées précédemment sur l'évolution caractéristiques mécaniques dans le temps par [Boukour S. \[17\]](#), [Gupta T. et al \[18\]](#) et [Ramdani S. et al \[19\]](#), et. Certains auteurs ont expliqués cette baisse de résistance par la faible rigidité des granulats de caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels [\[20\]](#). D'autre l'ont expliquée par la faible adhérence entre la matrice du ciment et les granulats de caoutchouc [\[21\]](#).

Pour ces raisons, certains auteurs [22] et [23] ont étudié les possibilités d'améliorer l'adhérence entre ces deux matériaux différents (caoutchouc et pâte de ciment), jusqu'à présent, leurs résultats ne sont pas convaincants [24].

Structure interne des bétons

La structure interne des bétons a fait l'objet d'une étude au Microscope électronique à balayage (MEB) dont les résultats sont représentés à travers les deux photos suivantes :

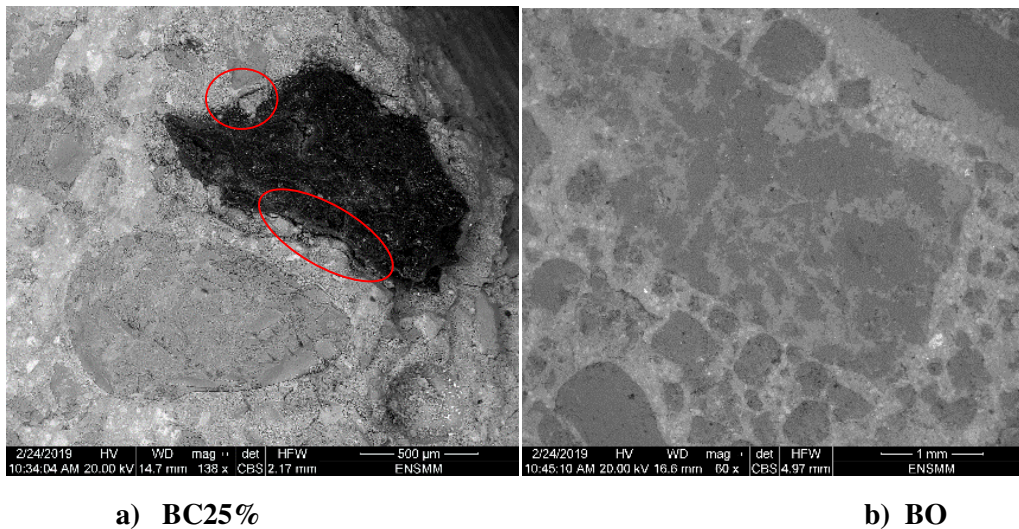


Figure III.13. Observation au MEB de la microstructure interne des bétons BO et BC25%.

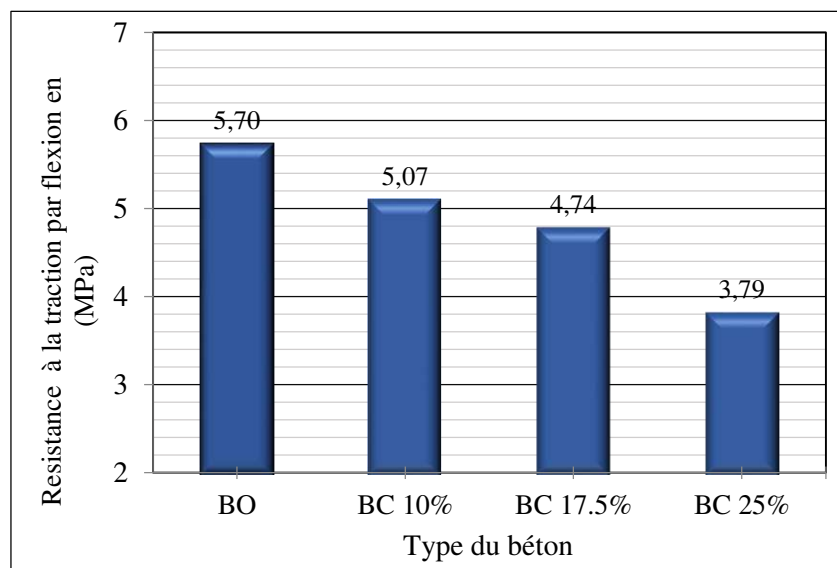
Les deux photos montrent des microcavités présentes dans le béton de caoutchouc (BC25%) en comparaison au béton de référence représenté dans la figure III.13(b). La présence de ces microcavités dans la pâte de ciment, indique une faible adhérence entre la matrice et les particules de caoutchouc. Cette faible zone inter-faciale pourrait jouer le rôle de microfissure entraînant la formation de fissures à l'interface des matériaux, accélérant la rupture de la matrice du béton, ce qui pourrait expliquer en partie les baisses de résistances à la compression et à la traction par flexion observées.

c) Résistance à la traction par flexion à 28 jours

Les résultats de la résistance à la traction par flexion à l'âge de 28 jours de conservation dans l'eau sont présentés dans le tableau et la figure suivants :

Tableau III.8 : Valeurs des résistances à la traction par flexion pour les quatre formulations.

		Désignation des bétons			
		BO	BC 10%	BC 17,5%	BC 25%
28 jours	F (kN)	6,21	5,52	5,16	4,13
	Résistance à la flexion (MPa)	5,70	5,07	4,74	3,79

**Figure III.14.** Résistance en traction par flexion des bétons à l'âge de 28 jours.

Pour la résistance à la traction par flexion à l'âge de 28 jours, le constat est le même que pour la résistance à la compression, une baisse de la résistance à la traction par flexion des bétons de caoutchouc par rapport au béton de référence. Cette baisse chute encore avec l'augmentation du dosage du caoutchouc. A l'âge de 28 jours, on a constaté une résistance de 5,70MPa pour le béton de référence (BO) contre une résistance de 5,07MPa pour le béton BC10%, une résistance de 4,74MPa pour le béton BC17,5% et une résistance de 3,79MPa pour le béton de caoutchouc (BC25%), donc une diminution de 11,2 % ; 16,8 % et 33,6% respectivement. Des résultats similaires sont trouvés dans des études antérieures [25], [26].

d) Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du béton

L'évolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour les quatre bétons est présentée dans la figure suivante :

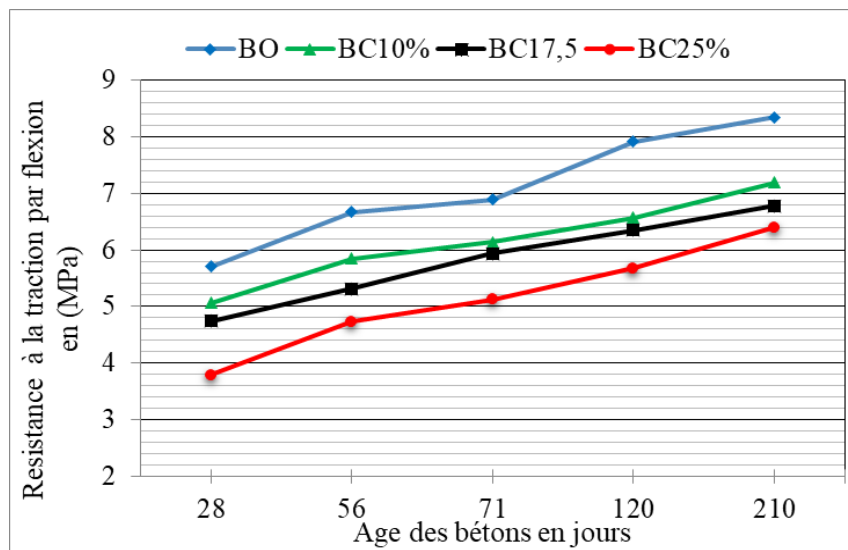


Figure III.15. Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour les quatre bétons étudiés.

D’après la figure III.15 on remarque que la résistance a la traction par flexion continue à augmenter dans le temps et ça pour les quatre bétons étudiés mais toujours avec des valeurs plus faible des bétons de caoutchouc par rapport au béton ordinaire. Une constatation similaire a été observée par [17]. On remarque aussi qu’à l’âge de 210 jours la résistance à la traction par flexion pour les trois bétons du caoutchouc est de 7,19MPa pour le BC10%, 6,78MPa pour le BC17,5% et 6,40MPa pour le BC25%, c.-à-d. elle dépasse celle du béton ordinaire à l’âge de 28 jours qui est 5,7MPa.

e) Résistance au fendage à 28 jours d’âge

Les résultats de la résistance en fendage à 28 jours de conservation dans l’eau sont présentés dans le tableau et la figure suivants :

Tableau III.9 : Résistances au fendage des bétons étudiés.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
Résistances au fendage en (MPa)	1,94	1,97	1,92	1,6

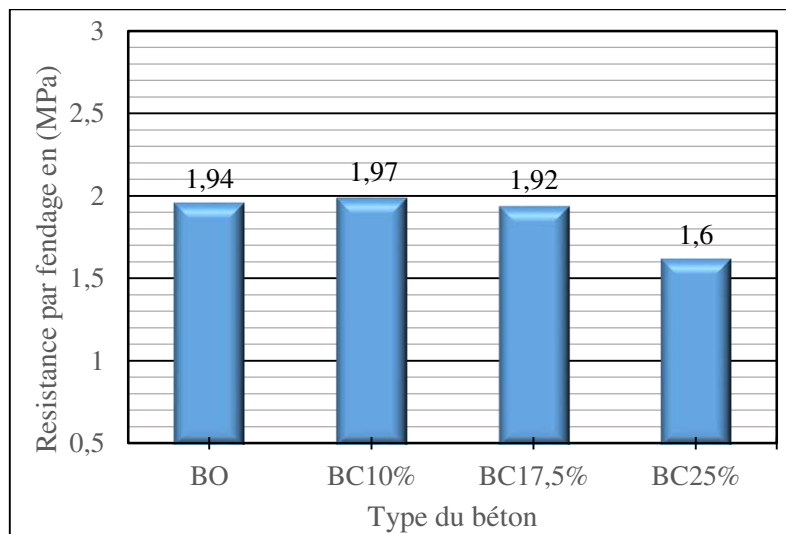


Figure III.16. Résistances par fendage à 14 jours et 28 jours des bétons étudiés.

Au niveau des résistances des bétons par fendage, les écarts de résistances sont minimes pour le béton ordinaire et les deux bétons contenant respectivement 10 et 17,5% de substitution, Cependant pour le taux de substitution, la chute est notable et s'élève à plus de 17,5%. Des résultats similaires ont été observés par [Eldin N.N. et Senouci A.B. \[27\]](#) et [Topcu I.B. \[28\]](#).

Faciès de rupture des éprouvettes

Les faciès de rupture des éprouvettes soumises au fendage sont illustrés à travers les quatre photos suivantes :



BO

BC10



BC17,5

BC25

Figure III.17. Faciées de rupture des éprouvettes sous fendage.

La figure III.17 montre des photos des échantillons des quatre bétons après écrasement en compression. La totalité des éprouvettes se sont rompues en se cassant en deux parties pratiquement similaires. On voit nettement que les surfaces de rupture épousent le contour des granulats. Ceci est dû à une séparation entre le mortier et les granulats par rupture de l'aurole de transition le long des surfaces latérales des granulats. Par ailleurs aucune différence notable au niveau des faciès de rupture n'est observée.

f) Module d'élasticité dynamique

La détermination du module d'élasticité dynamique du béton passe par la mesure la vitesse de propagation des ondes sonores à travers les éprouvettes de béton. Nous avons pour cela utilisé un appareillage à ultrasons 'CONTROLS'.

Tableau III.10 : Vitesses de propagation pour les quatre formulations du béton.

	Désignation des bétons			
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
Vitesse de propagation (m/s)	3922	3757	3596	3509

Selon le tableau II.10 qui donne la relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion, et d'après les résultats trouvés illustrés dans le tableau III.10, on peut dire que les vitesses obtenues pour les différentes formulations indiquent que les quatre bétons étudiés sont de bonne qualité.

On remarque que la vitesse de propagation des ultrasons diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable par les granulats de caoutchouc. Le béton ordinaire (BO) présente

une vitesse de propagation des ondes ultrasoniques 3922m/s contre une vitesse de 3757 pour le béton BC10%, 3596m/s pour le béton BC17,5% et 3509m/s pour le BC25%. Exprimée sous forme de ratio, on constate des pourcentages allant de 4,2 à 10,5%. Le même constat a été observé par [24] et [25].

Cette diminution est due au comportement du caoutchouc qui absorbe les ondes ultrasonores. Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Cela augmente le temps de propagation de l'onde ultrasonore et réduit ainsi sa vitesse de propagation. Ces résultats montrent que le composite à base de caoutchouc possède des capacités d'atténuation des ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations [24] et [25].

Le module dynamique est directement relié au carré de la vitesse de propagation des ultrasons comme l'illustre la relation suivante :

$$E_d = \rho_b V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad \dots[\text{Eq. III.3}]$$

Les valeurs du module d'élasticité E_d sont calculées à partir de l'équation [III.3] sont directement présentés dans le tableau III.11 et la figure III.18

Tableau III.11 : Valeurs du module d'élasticité des différentes formulations.

Désignation des bétons				
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
E_d (GPa)	32,08	29,96	28,41	26,16

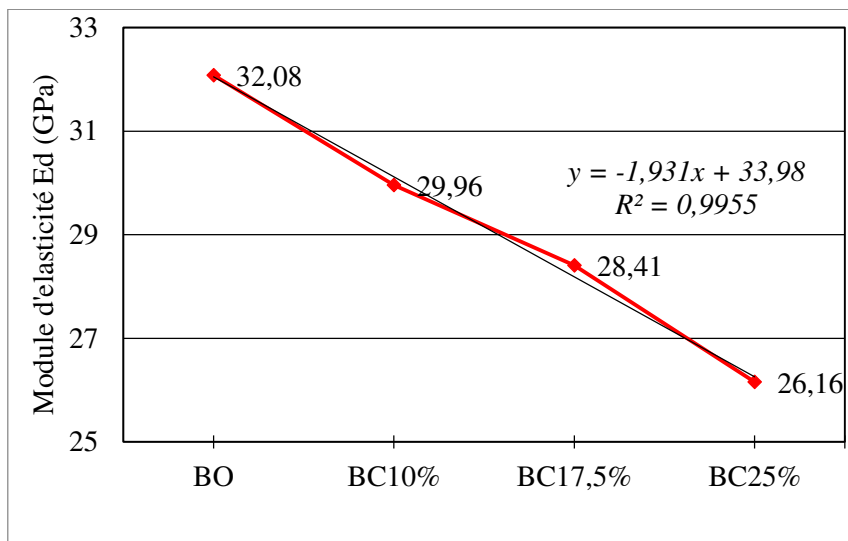


Figure III.18. Variation du module d'élasticité dynamique en fonction du type du béton.

Une opération de régression des valeurs nous a permis d'établir une relation entre le module d'élasticité dynamique et le taux de substitution en caoutchouc.

$$E_d(GPa) = -0,931 (\% \text{ de caoutchouc}) + 33,98 \quad \dots[\text{Eq.III.4}]$$

PARTIE B :

Paramètres de durabilité du béton

III.2.1. Durabilité

La durabilité caractérise la capacité qu'a un ouvrage à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

Plusieurs chercheurs ont observés que la valeur de la résistance en compression, indicateur traditionnel de la performance des bétons, n'est plus suffisante pour évaluer la durabilité potentielle des bétons et pour sélectionner une formule devant satisfaire des critères relatifs à la durabilité.

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres qui permettent d'évaluer et de déterminer la durabilité des bétons. Comme un béton d'enrobage fournit, dans un premier temps, une barrière physique (la porosité, l'absorption, la perméabilité et la diffusivité), et dans un deuxième temps, une protection chimique (la réactivité et la solubilité), les indicateurs de durabilité sont destinés à évaluer ces barrières au travers de tests spécifiques [29].

Donc, cette partie, portera sur l'étude de quelques indicateurs de durabilité des nouveaux bétons. Leurs résultats sont présentés dans ce que suit :

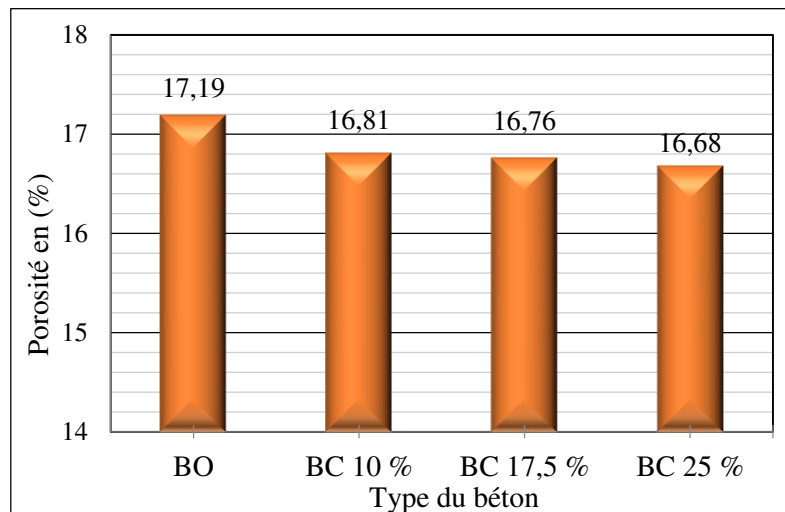
III.2.1.1. La porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation de la durabilité du béton. Une faible porosité accessible à l'eau améliore plusieurs caractéristiques du béton, y compris leur durabilité contre des conditions environnementales.

Dans le tableau III.12 et la figure III.19 nous avons rassemblé les résultats des mesures de la porosité accessible à l'eau pour les différentes formulations du béton d'étude.

Tableau III.12 : Valeurs de la porosité accessible à l'eau pour les quatre formulations.

Désignation des bétons				
	BO	BC10%	BC17,5%	BC25%
P_0 (%)	17,19	16,81	16,76	16,68

**Figure III.19.** Valeurs de la porosité accessible à l'eau pour les 04 formulations du béton.

Contrairement aux résultats rapportés par [17], qui ont constatés que la porosité des bétons de caoutchouc augmente avec l'augmentation du taux de substitution, on a remarqué que la porosité accessible l'eau des bétons testés est peu influencée par la présence de granulats de caoutchouc pour des taux de substitution allant jusqu'à 25% du volume du sable. On a remarqué une légère diminution de la porosité des bétons de caoutchouc par rapport du béton témoin. On enregistre ainsi une porosité de 17,19% pour le béton ordinaire contre des porosités de 16,81 ; 16,76 et 16,68% pour les bétons de caoutchouc BC10% ; BC17,5% et BC25% respectivement, soit des diminutions de 2,2 ; 2,5 et 3% respectivement. Ces écarts sont de l'ordre de précision des mesures et ne permettent donc pas de dégager une tendance. Ainsi les granulats de caoutchouc jouent pratiquement le même rôle de remplissage que le sable et n'affecte que très faiblement sur la présence des pores accessibles.

III.2.1.2. Absorption d'eau par capillarité

La porosité capillaire est une caractéristique micro-structurale qui influe sur les propriétés de transfert [30]. Les valeurs de l'essai d'absorption d'eau par capillarité pour les différentes compositions sont présentées sur la figure suivante :



Figure III.20. Essai d'absorption d'eau par capillarité.

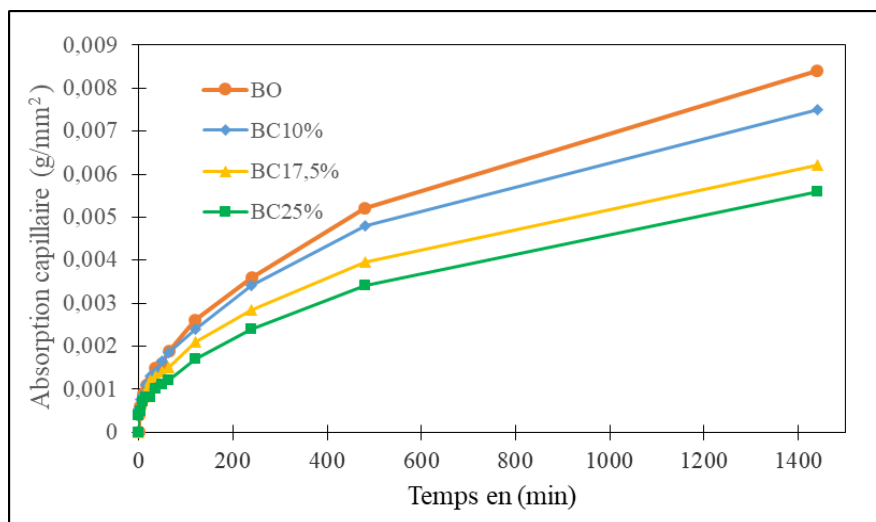


Figure III.21. Variation de l'absorption capillaire en fonction du temps.

D'après la figure III.21, on remarque que les granulats de caoutchouc réduisent la quantité d'eau absorbée au fur et à mesure que le taux de granulats de caoutchouc augmente. Après 24 heures la quantité d'eau absorbée par les bétons BC10%, BC17,5% et BC25% a diminué respectivement de 10,7% ; 26,2% et 33,3% par rapport à celle du béton de référence BO. L'incorporation de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire tend à limiter l'absorption d'eau du composite [6], l'ajout de particules de caoutchouc diminue la quantité d'eau

absorbée, car les particules de caoutchouc n'absorbent pas l'eau. Des résultats similaires ont été trouvés par [31] et [32].

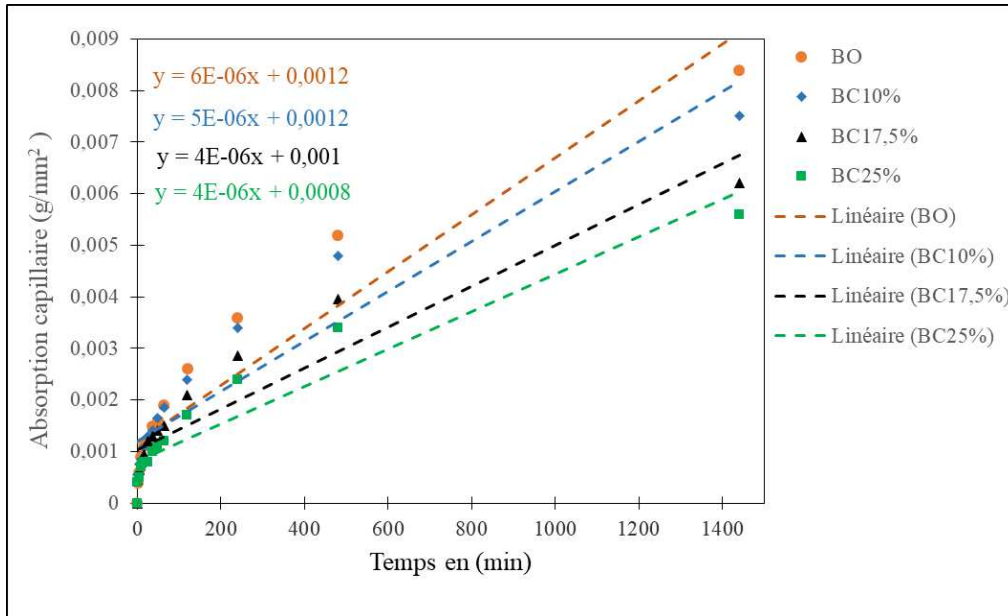


Figure III.22. Régression des valeurs d'absorption capillaire en fonction du temps.

On constate également que la loi donnant la variation de l'absorption en fonction de la racine carrée du temps est pratiquement linéaire pour les quatre compositions testées.

Une opération de régression des valeurs nous a permis d'établir une relation entre le absorption capillaire et le temps.

Donc :

Pour le BO : $Absorption = 6 \times 10^{-6} t + 0,0012$... [Eq.III.5]

Pour le BC10% : $Absorption = 5 \times 10^{-6} t + 0,0012$... [Eq.III.6]

Pour le BC17,5% : $Absorption = 4 \times 10^{-6} t + 0,001$... [Eq.III.7]

Pour le BC25% : $Absorption = 4 \times 10^{-6} t + 0,0008$... [Eq.III.8]

III.2.1.3. Perméabilité à l'eau

La perméabilité représente la capacité d'un matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression. Leur mesure en utilisant l'eau comme fluide sont souvent considérées comme « plus fiables » pour évaluer les propriétés de transport du béton [33].

Les variations de la profondeur de pénétration de l'eau pour les quatre bétons étudiés à 28 jours sont indiquées dans la figure III.24.



Figure III.23. Etapes de mesure de la perméabilité à l'eau.

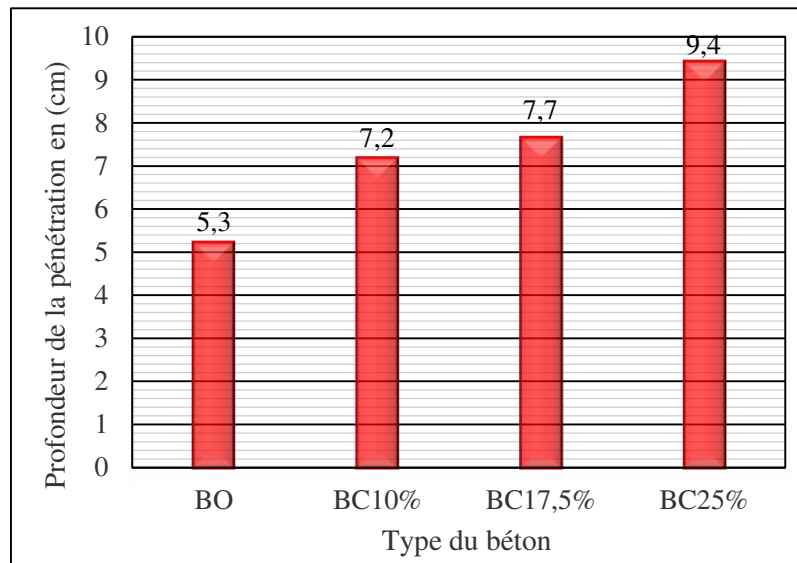


Figure III.24. Profondeur de pénétration de l'eau.

On remarque que la profondeur de pénétration de l'eau des bétons contenant des granulats de caoutchouc est supérieure à celle du béton ordinaire, et qu'elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution. Elle passe de 5,3cm pour le béton ordinaire à 7,2cm ; 7,7cm et 9,4cm pour les bétons de caoutchouc BC10% ; BC17,5% et BC25% respectivement. Exprimée en pourcentage, les taux d'accroissement constatés sont de 27,1% ; 31,5% et 44,3% lors de la substitution volumique du sable par 10% ; 17,5% et 25% respectivement. Des résultats similaires ont trouvés par [34] et [35].

La raison principale de l'augmentation de la perméabilité du béton contenant des granulats de caoutchouc revient à la faiblesse de la liaison entre les granulats de caoutchouc et la pâte de ciment. D'après Erhan Güneyisi et al. [36], cette augmentation est due à la caractéristique de surface des particules de caoutchouc et à la faible adhérence entre ces particules et la matrice ; qui provoque de nombreuses porosités. Par conséquent, l'augmentation des vides avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc a entraîné une augmentation progressive des valeurs d'absorption d'eau.

III.2.1.4. Perméabilité apparente aux gaz

La perméabilité aux gaz est un indicateur majeur pour évaluer la capacité du matériau à résister à la pénétration d'espèces chimiques agressives. Les valeurs de l'essai de la perméabilité aux gaz pour les différentes compositions sont présentées sur la figure III.25, Cette perméabilité est caractérisée par le coefficient spécifique k .

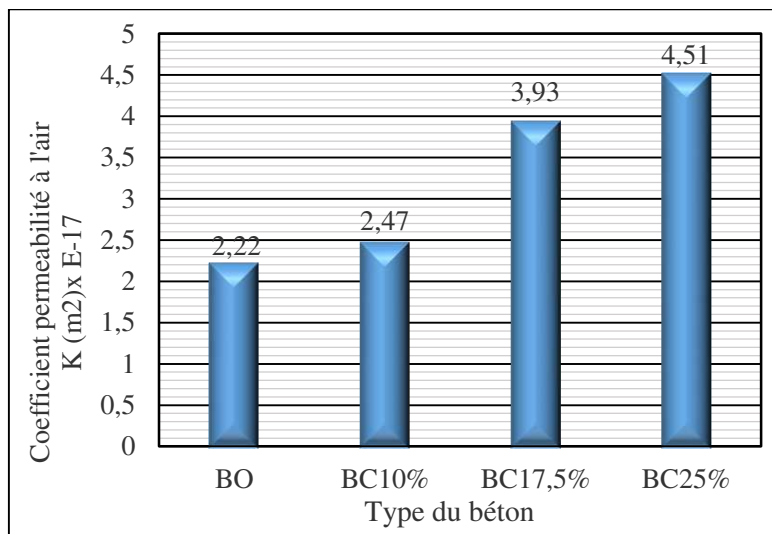


Figure III.25. Coefficient spécifique de perméabilité $k(m^2)$ des bétons étudiés.

On remarque que la perméabilité des bétons contenant des granulats de caoutchouc est supérieure à celle du béton ordinaire, et qu'elle augmente avec l'augmentation du taux de substitution. Les taux d'accroissement varient entre 11,3 et 103,2% lors de la substitution volumique du sable par 10% ; 17,5% et 25%. Cela est dû à la forte porosité des composites à base de granulats de caoutchouc, qui permet un flux très rapide de l'air à travers les bétons caoutchoutés [36]. Plusieurs recherches, réalisées sur des bétons caoutchoutés, ont trouvés les mêmes tendances des résultats [34], [36].

Tableau III.13 : Tableau comparatif des résultats expérimentaux avec des résultats tirés de la littérature.

(%) de substitution	Güneyisi E. et al [33]	Dubravka B. et al [34]	Nos résultats
0%	$1,35 \times 10^{-15} (m^2)$	$5,8 \times 10^{-14} (cm^2)$	$2,2 \times 10^{-17} (m^2)$
5%	$2,35 \times 10^{-15}(m^2)$	$6,4 \times 10^{-14} (cm^2)$	
10%		$19,6 \times 10^{-14} (cm^2)$	$2,47 \times 10^{-17} (m^2)$
15%	NA	$29,2 \times 10^{-14} (cm^2)$	
17.5%			$3,93 \times 10^{-17}(m^2)$
25%	NA		$4,51 \times 10^{-17} (m^2)$

III.2.1.5. Attaque à l'acide sulfurique H_2SO_4

L'acide sulfurique est un acide minéral fort et peu volatil dont la formule chimique est (H_2SO_4). Certains types de structures en génie civil peuvent être pendant leur phase de services

exposés à l'acide sulfurique par la pluie acide issue de l'émission de gaz de dioxyde de soufre, qui se transforme en acide sulfurique dans la présence de l'eau [37].

a) Perte de masse

Les pertes de masses constatées au bout de 14, 28, 45, 90 et 180 jours pour les quatre compositions ont été reportées sur le graphique suivant :

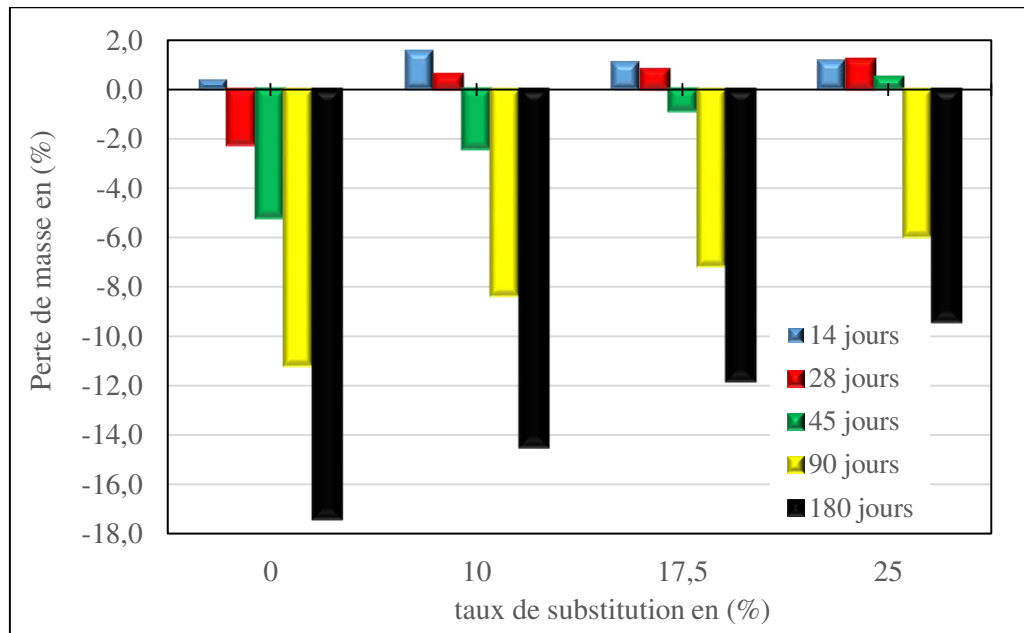


Figure III.26. Variation de la masse des bétons en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 .

D'après les résultats de l'essai de perte de masse présentés sur la figure III.26, on constate qu'après 14 jours de conservation dans la solution d'acide sulfurique, les bétons de caoutchouc subissent un gain en masse plus important que celui constaté sur le béton ordinaire. Ce gain traduit un début de gonflement des bétons, en conséquence à des réactions chimiques se produisant entre les hydrates et l'acide sulfurique engendrant la formation d'étringite. Ce gain est dû au dépôt du gypse, qui se forme suite à la réaction entre la portlandite et l'acide sulfurique [38]. Ces résultats confirment les résultats trouvés par Bisht K. et Ramana P.V. [39].

A partir de 28 jours de conservation, on a constaté une perte de masse assez importante pour le BO de 2,2% en comparaison aux bétons de caoutchouc qui subissaient toujours un gain de masse de 0,6% pour BC10% ; 0,8% pour le BC17,5% et 1,2% pour le BC25%.

Après 90 jours de conservation dans l'acide, on a remarqué une perte de masse pour les quatre bétons, cette perte diminue avec l'augmentation du taux de substitution de caoutchouc.

Cette tendance a été observée par d'autres chercheurs comme [Gupta T et al \[40\]](#) et [Thomas B.S. \[38\]](#).

Après 180 jours d'immersion dans la solution, on a constaté une perte de masse de 17,37% pour le BO contre une perte de masse de 14,5% ; 11,8% et 9,4% pour les bétons de caoutchouc BC10% ; BC17,5% et BC25% respectivement.

Cette diminution en perte de masse pour les bétons contenant des particules de caoutchouc est justifiée par la nature chimiquement résistante à la pénétration d'acide de ces particules. La caractéristique hydrophobe des particules de caoutchouc fournit également un facteur de soutien pour résister à la nature corrosive de l'acide sulfurique [\[41\]](#). D'autre part, la présence de vides et de microfissures autour des particules de caoutchouc constitue un facteur de retard dans la destruction du CSH, du fait que l'ettringite se développe d'abord dans les vides et les fissures de la matrice du béton [\[42\]](#).

b) Résistance à la compression

Les valeurs absolues et les variations en pourcentage de la résistance à la compression des mélanges de béton à base de caoutchouc après 14, 28, 45, 90 et 180 jours d'immersion dans l'acide H_2SO_4 à 5% de concentration en poids sont indiquées sur les figures III.27 et III.28. La variation en pourcentage de chaque mélange a été déterminée en comparant la résistance à la compression des échantillons après 14, 28, 45, 90 et 180 jours d'exposition à la solution de H_2SO_4 avec celle des échantillons conservés dans l'eau potable aux mêmes âges cités auparavant.

Comme le montre la figure III.27, la résistance à la compression de tous les mélanges de béton exposés à la solution de H_2SO_4 diminue. Cependant, le taux de diminution dépend du temps d'exposition. On remarque aussi que les échantillons contenant de caoutchouc présentent des résistances à la compression plus élevées que celle du béton ordinaire à partir de l'âge de 45 jours d'exposition à la solution H_2SO_4 .

Comme prévu, la perte maximale de résistance à la compression de tous les mélanges de béton a été observée après 180 jours d'exposition à la solution de H_2SO_4 . Cette perte représente plus de 43,2% pour l'ensemble des mélanges de béton.

Cette diminution de la résistance à la compression pourrait être due à la dépolymérisation des produits d'hydratation CASH (hydrate de silicate d'aluminate de calcium) et CSH (hydrate de silicate de calcium), ce qui entraîne l'apparition de fissures ainsi que l'érosion des couches superficielles [40].

Les échantillons contenant 25% de granulats de caoutchouc ont présenté une perte de résistance à la compression inférieure à 89,9% ; 70,6% ; 62,8% ; 46,5% et 45,0% respectivement après 14 ; 28 ; 45 ; 90 et 180 jours d'exposition à la solution de H_2SO_4 , et ce comparativement au mélange témoin. Cela pourrait être justifié par que la présence de granulats de caoutchouc qui retardent la propagation des fissures en empêchant les particules de béton de se déplacer pour ainsi offrir une meilleure résistance de compression. La nature durable des particules de caoutchouc résiste à la nature corrosive de l'acide sulfurique en maintenant leur structure intacte, ce qui contribue à limiter la propagation des fissures à travers la matrice de béton. De plus, la présence de granulats de caoutchouc ajoute une certaine tortuosité dans la matrice de béton, ce qui limite la pénétration de la solution acide [40]. Des résultats similaires ont été remarqués par Gupta et al [40] et Thomas et al [38].

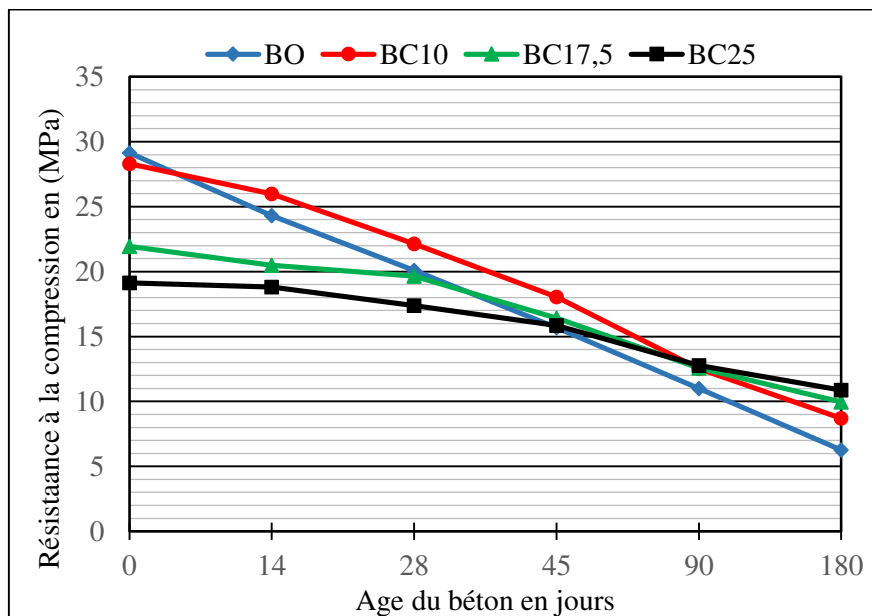


Figure III.27. Variation de la résistance en compression en fonction de la période d'immersion dans 5% de H_2SO_4 .

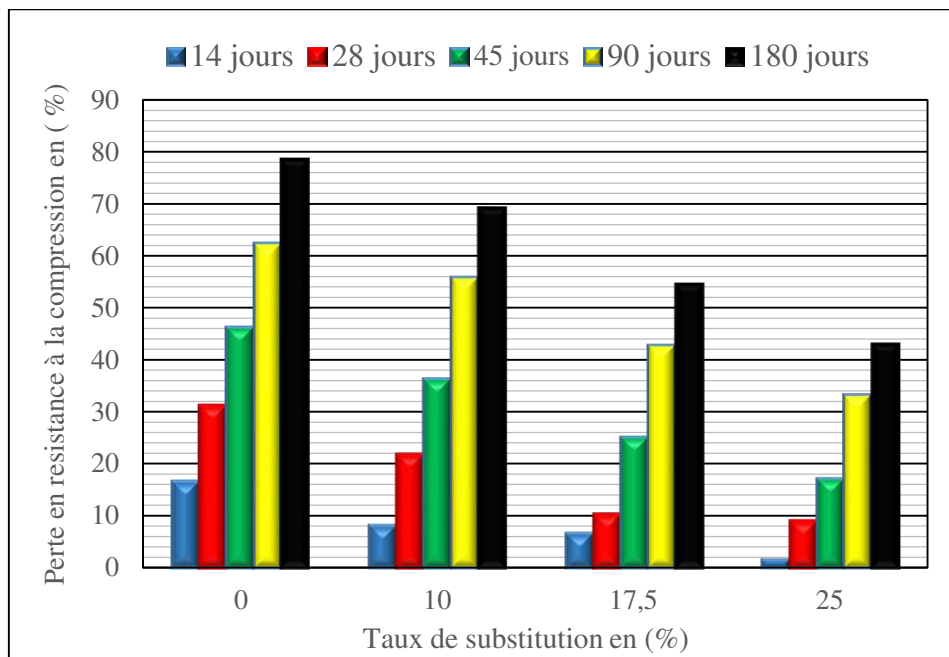


Figure III.28. Variation de la perte en résistance en compression en fonction de la période d'immersion dans 5% de H₂SO₄.

III.2.1.6. Attaque au sulfate de sodium Na₂SO₄

Nous étudions dans ce paragraphe la durabilité des différents bétons soumis à une attaque au sulfate de sodium Na₂SO₄ a été discutée.

a) Gain de masse

D'après la figure III.29 on remarque que la conservation des bétons dans une solution contenant 5% de Na₂SO₄ conduit à une augmentation de la masse. Ce gain de masse diminue avec l'augmentation du taux de substitution de sable par le caoutchouc. Cette même tendance a été observée par [Medine M. \[2\]](#), [Boukour S. \[17\]](#).

Après 28 jours de conservation dans la solution, on a constaté un gain en masse de 0,1% pour le béton de référence contre un gain en masse entre 0,2 et 0,1% pour les bétons contenant 10 à 25% de caoutchouc.

Ainsi qu'un gain en masse de 0,3% pour le béton de référence contre un gain entre 0,2% et 0,1% pour les bétons de caoutchouc après 90 jours de conservation.

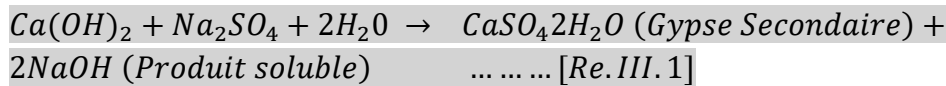
Après 180 jours, on a remarqué un gain en masse de 0,8% pour le béton de référence contre un gain entre 0,2 et 0,5% pour les bétons de caoutchouc. Généralement, ce gain de masse

est attribué à l'absorption de la solution et à la formation de gypse ou d'ettringite, suite à la réaction du sulfate avec les aluminates de calcium hydratés pour former des sulfo-aluminates de calcium et les hydroxydes de calcium libres dans le ciment pour former les sulfates de calcium [2].

L'action du sulfate de sodium peut être résumée comme suit [43] :

- Formation du gypse secondaire :

La formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate, et ceci selon la relation ci-dessous :



- Formation de l'ettringite secondaire :

La formation de l'ettringite secondaire peut résulter de la réaction chimique entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium anhydres (C₃A) ou hydratés (C₄AH13) selon la réaction suivante :

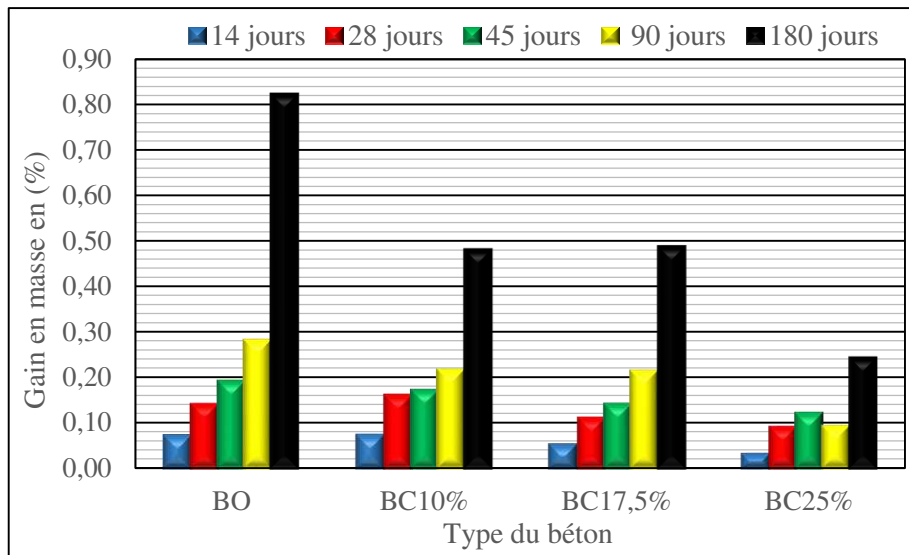


Figure III.29. Perte en masse des bétons immergés dans une solution de Na₂SO₄.

b) Résistance à la compression

La figure III.30 présente la variation de la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion. On remarque que jusqu'à l'âge de 45 jours, la résistance à la compression continue à augmenter, et cela pour les quatre bétons. Après l'âge de 45 jours la résistance à la compression commence à diminuer pour le béton de référence, on observe une perte de 15,6% entre l'âge de 45 jours et 180 jours, par contre elle continue d'augmenter pour les bétons de caoutchouc, la diminution commence à partir de l'âge de 90 jours pour les deux bétons BC10% et BC17,5% où on a observé une diminution de 3% pour les deux bétons entre l'âge de 90 jours et 180 jours. Pour le béton BC25% la résistance à la compression continue toujours à augmenter. Cette augmentation de résistance dans les bétons de caoutchouc est justifiée par la nature élastique du caoutchouc. En effet, il peut absorber l'énergie d'expansion provoquée par l'ettringite et, de cette manière, éviter la défaillance de la structure [44].

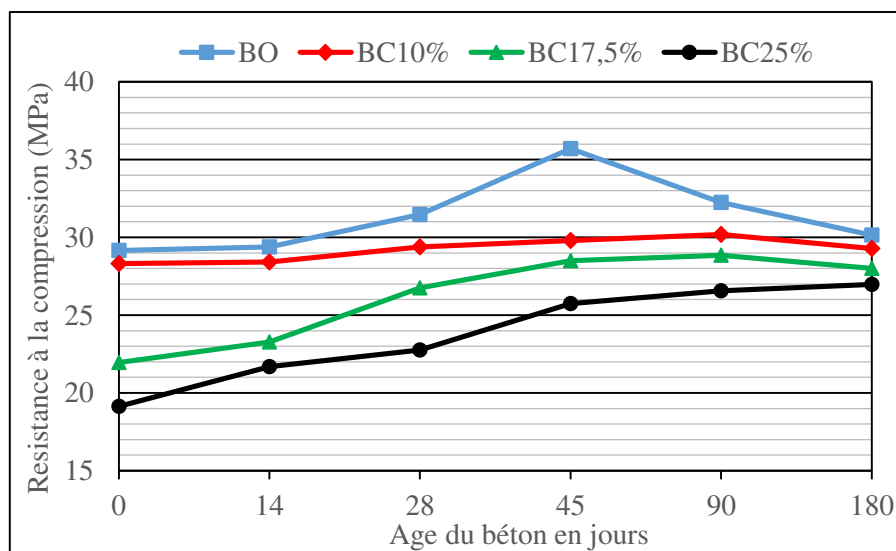


Figure III.30. Résistance à la compression des différents bétons étudiés conservés dans une solution de Na₂SO₄.

Afin de mieux analyser l'effet de l'attaque du sulfate sur la résistance à la compression du béton de caoutchouc, un coefficient anticorrosion de la résistance à la compression K_{fi} proposée et exprimée par l'équation III.9 [44].

$$K_{fi} = \left(\frac{f_{ci}}{f_{co}} \right) \times 100 \quad \dots [Eq.III.9]$$

Avec :

- K_{fi} : coefficient de résistance à la corrosion de la résistance à la compression à l'âge i
- f_{ci} : résistance à la compression à l'âge i
- f_{c0} : résistance à la compression à 28 jours.

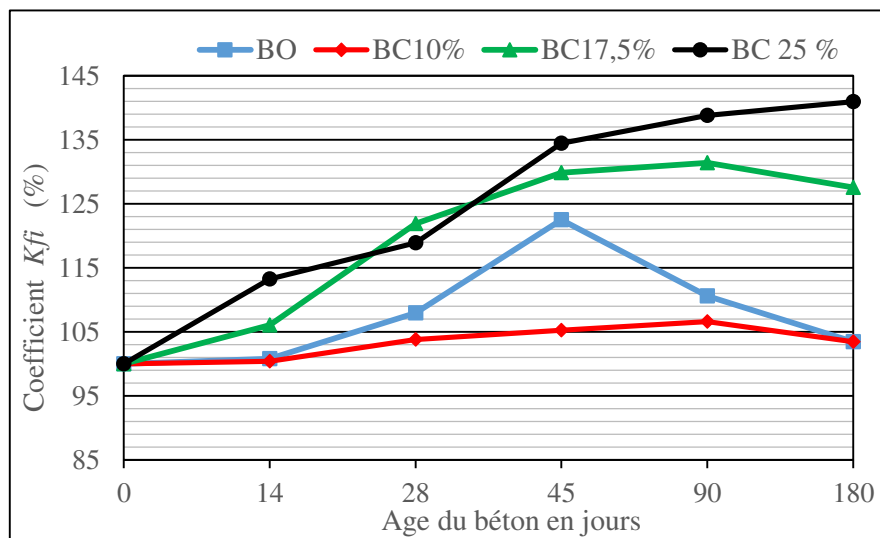


Figure III.31. Variation du coefficient K_{fi} des différents bétons conservés dans une solution de Na_2SO_4 en fonction du temps.

De la figure III.31, on peut clairement voir que le coefficient anticorrosion a progressivement augmenté avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc, la valeur maximale a été enregistrée à l'âge de 180 jours : (141%) pour le béton BC25% ; (127%) pour le béton BC17,5% et (103,5%) pour le béton BC10% contre 103,4% pour le béton de référence.

Des résultats semblables avaient été notés dans des travaux similaires de [Boukour S. \[17\]](#) et [Xu J. et al \[44\]](#).

c) Résistance à la traction par flexion

La figure III.32 présente la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du la durée d'immersion.

Les mêmes observations que celles faites au sujet de la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion continue à augmenter pour les quatre types du béton jusqu'à l'âge de 90 jours. Après l'âge de 90 jours le béton de référence commence à perdre de la

résistance, ce qui équivaut à une perte de 27% de résistance entre l'âge de 90 et 180 jours, par contre la résistance continue à augmenter pour les bétons de caoutchouc.

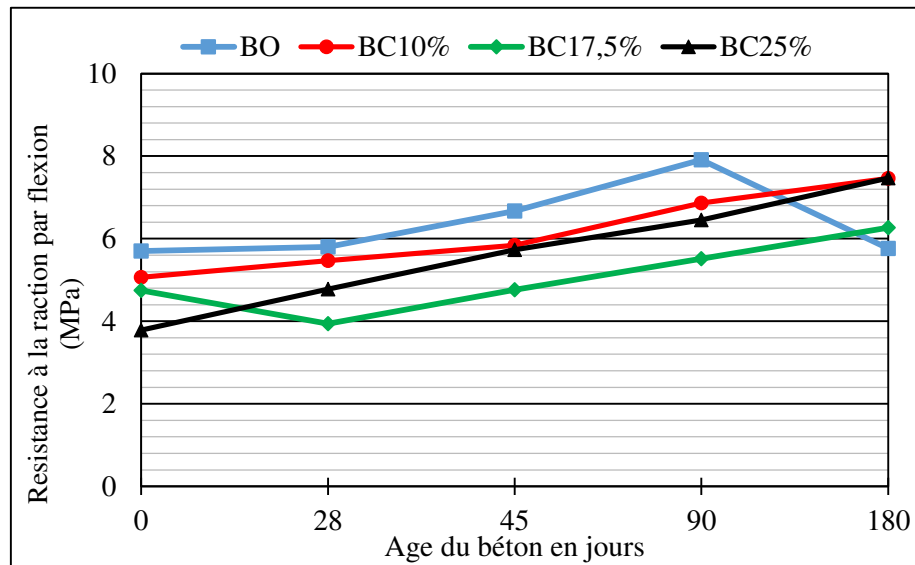


Figure III.32. Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps des différents bétons conservés dans la solution Na_2SO_4 .

III.2.1.7. Attaque à l'eau de mer

a) Gain en masse

On a observé la même chose que lors de la conservation dans la solution Na_2SO_4 . D'après la figure III.33, les bétons conservés dans l'eau de mer ont eu un gain en masse mais avec des vitesses différentes, ce gain de masse augmente avec l'augmentation de la durée d'immersion et diminue avec l'augmentation du pourcentage en caoutchouc. A titre d'exemple à l'âge de 28 jours, on note un gain en masse de 0,4% pour le béton de référence et de 0,1% pour BC25%, tandis qu'à l'âge de 180 jours, on note 1% pour le béton de référence et 0,7% pour BC25%. Généralement, ce gain en masse est attribué à l'absorption de l'eau et à la formation de gypse, d'ettringite et la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$, suite à la réaction entre les hydrates en particulier la portlandite et les sulfates de magnésium contenus dans l'eau de mer. Des résultats similaires ont été observés par [17].

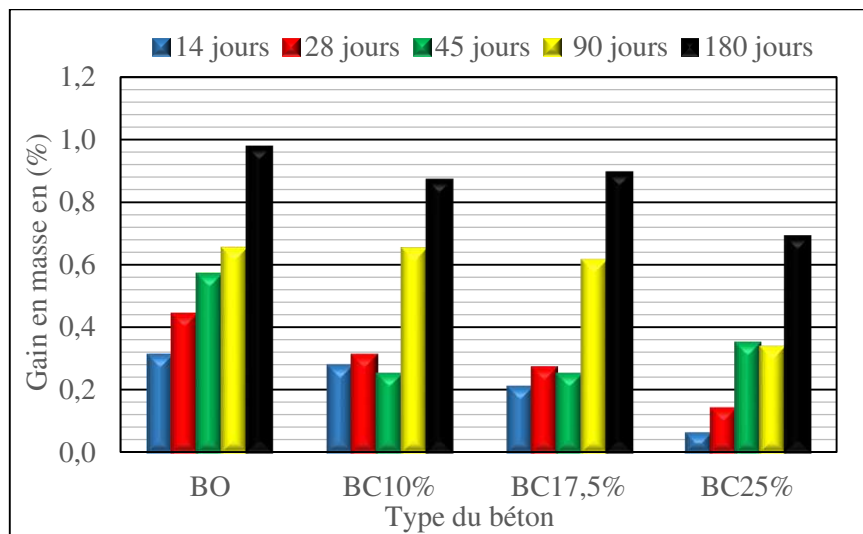


Figure III.33. Gain en masse des bétons immergés dans l'eau de mer.

b) Résistance à la compression

La figure III.34 présente la variation de la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion. On remarque que jusqu'à l'âge de 45 jours, la résistance à la compression continue à augmenter, et ceci pour les quatre bétons. Après l'âge de 45 jours la résistance à la compression commence à diminuer pour le béton de référence et le béton BC10%, il y a une perte de 10,7% pour le béton de référence contre une perte de 7,6% pour le béton BC10%, et cela entre l'âge de 45 et 180 jours. Des résultats semblables avaient été notés dans les travaux similaires de [Abdelmonem A. et al \[45\]](#).

Par contre pour les bétons de caoutchouc BC17,5% et BC25%, la résistance à la compression continue toujours à augmenter. Donc comme on a dit précédemment cette augmentation de résistance dans les bétons de caoutchouc est justifiée par l'élasticité du caoutchouc. Ce dernier peut absorber l'énergie d'expansion provoquée par l'ettringite et de cette manière éviter la défaillance de la structure.

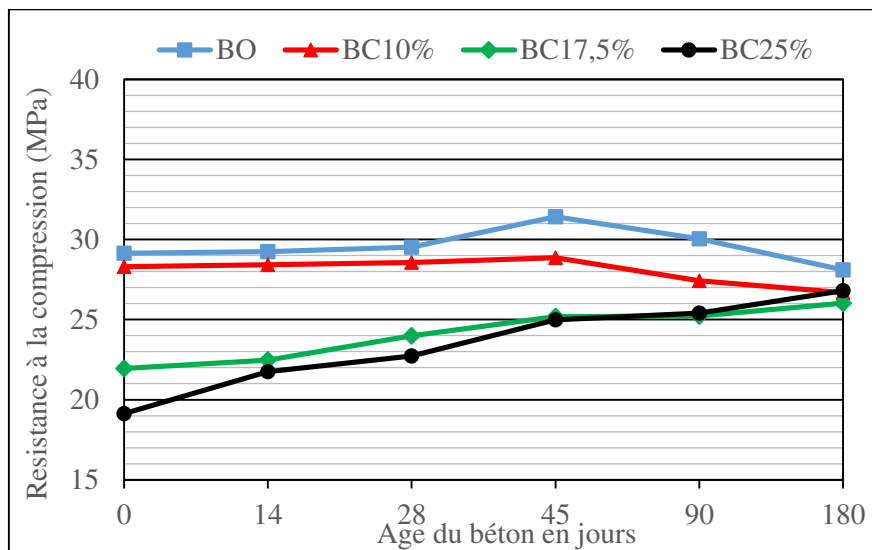


Figure III.34. Résistance à la compression des différents bétons étudiés conservés dans l'eau de mer.

Pour le coefficient anticorrosion K_{fi} concernant les éprouvettes conservées dans l'eau de mer, on peut clairement voir qu'il augmente avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc (voir figure III.35), les valeurs maximales sont été enregistrée à l'âge de 180 jours : (140,1%) pour le béton BC25%, (118,6%) pour le béton BC17,5% et (94,2%) pour le béton BC10% contre (96,4%) pour le béton de référence. Des résultats semblables avaient été notés dans les travaux similaires de Boukour S. [17].

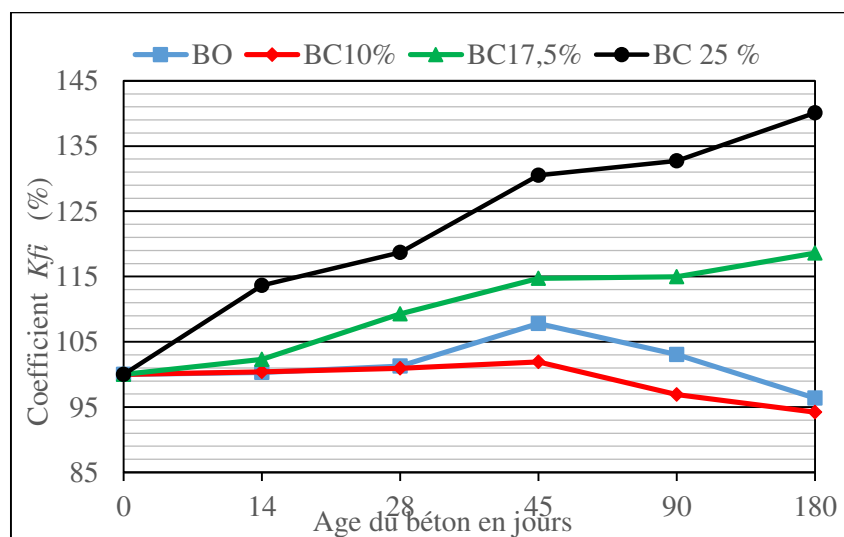


Figure III.35. Variation du coefficient K_{fi} des différents bétons conservés dans l'eau de mer en fonction du temps.

c) Résistance à la traction par flexion

Les courbes présentées dans la figure III.36 représentent la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du la durée d'immersion dans l'eau de mer.

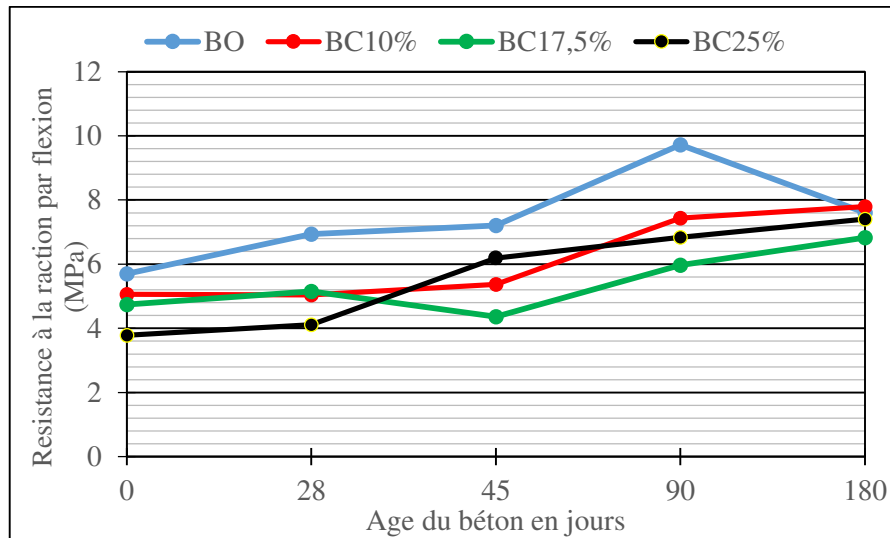


Figure III.36. Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du temps de conservation dans l'eau de mer.

On remarque les mêmes faits observés sur la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion continue d'augmenter pour les quatre types du béton jusqu'à l'âge de 90 jours. Au-delà le béton de référence commence à perdre en résistance, en effet, il y a une perte de 21,7% de résistance entre l'âge de 90 et 180 jours, par contre la résistance continue d'augmenter pour les bétons de caoutchouc.

Références bibliographiques du troisième chapitre

- [1] Kotresh K. M., Belachew M.G.: *Study on waste tyre rubber as concrete aggregates*. International Journal of Scientific Engineering and Technology. Volume 3, 433-436, (2014).
- [2] Medine M. : *Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés*. Thèse de doctorat, Université DjillaliLiabès, Sidi Bel Abbes, Algérie. (2018).
- [3] Medine M., Trouzine H., De Aguiar J.B. : *Fresh State Properties of Concrete Incorporating Scrap Tire Rubber*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 60(4), pp. 611–617, (2016).
- [4] Fedroff D., Ahmad S., Savas B.Z. : *Mechanical Properties of Concrete with Ground Waste Tire Rubber*. Transportation Research Record. (1996).
- [5] Zimmermann A., Yang S., Koenders E. A. B. : *Crumb Rubber as a Concrete Additive: Effect of Specific Surface on Air Void Content*. 3rd International RILEM Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, Nanjing, China. 24-26 October (2016),
- [6] Grdic Z., Toplicic-Curcic G., Ristic N., Grdic D., Mitkovic P.: *Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete*. GRADEINAR, Vol. 66, No. 1, PP. 11–20. (2014).
- [7] Mohellebi S. : *Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites*, Thèse de doctorat. Université Tizi Ouzou, Algérie (2014).
- [8] Dodoo-Arhin D., Mensah S.A, Yaya A., Agyei-Tuffour B. : *Application of discarded rubber car tyres as synthetic coarse aggregates in light weight pavement concretes*. American Journal of Materials Science. 5(4), 75-83. (2015).
- [9] Adamu, M., Uche, O.A.U. : *Durability properties of concrete containing scrap tyre as fine and coarse aggregate in Concrete*. International Journal of Scientific and Engineering Research. 5(11), 628-634. (2014).
- [10] Onuaguluchi O., Panesar D.K. : *Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume*. Journal of Cleaner Production, Vol. 82, 125– 131. (2014).
- [11] Gesoglu M., Guneyisi E., Khoshnaw G., Ipek S. : *Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers*. Construction and Building Maters, Vol. 73, 19-24. (2014).
- [12] Boudaoud Z., Beddar M. : *Effects of Recycled Tires Rubber Aggregates on the Characteristics of Cement Concrete*. Open Journal of Civil Engineering, 2, 193-197, (2012).
- [13] Sukontasukkul P., Tiamlom K. : *Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size*. Construction and Building Materials 29, 520–526, (2012).

- [14] Hanbing L., Guobao L., Yafeng G., Haibin W. : *Mechanical Properties, Permeability, and Freeze-Thaw Résistance of Pervious Concrete Modified by Waste Crumb Rubbers*. Applied sciences, (2018).
- [15] Parung H., Irmawaty R., Wijaya D.M. : *Utilization of tire chips as a substitute for coarse aggregate in concrete*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (2020).
- [16] Banerjee S., Rooby J. : *Strength Properties of Tyre Rubber Concrete*. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Volume-8 Issue-4, November (2019).
- [17] BOUKOUR S. : *Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés*. Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie. (2017).
- [18] Gupta T., Chaudhary S., Sharma R. K. : *Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate*. Construction and Building Materials 73, 562–574, (2014).
- [19] Ramdani S., Guettala A., Benmalek M.L., Aguiar J. B. : *Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder*. Journal of Building Engineering 2, 302–311, (2019).
- [20] Lia G., Stubblefield M.A., Garrick G., Eggers J., Abadie C., Huang B. : *Development of waste tire modified concrete*. Cement and Concrete Research. Volume 34, (12), 2283-2289 December (2004).
- [21] Najim K.B., Hall M.R. : *A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC)*. Construction and Building Materials 24, 2043–2051, (2010).
- [22] Segre, N., Joekes, I. : *Use of tire rubber particles as addition to cement paste*. Cement and Concrete Research. 30, 1421–1425, (2000).
- [23] Xi, Y., Li, Y., Xie, Z., Lee J.S. : *Utilization of solid wastes (waste glass and rubber particles) as aggregates in concrete*. Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 45–54, 20–21, May (2004).
- [24] Sakami S., Elabbassi F.E. : *Durability of Rubber Concrete: Resistance to Heating and Cooling Cycles*. Proceedings of the 2nd International Congress on Engineering and Sustainability in the XXI Century INCREaSE, October 9–11, (2019).
- [25] Valadares F., Bravo M., de Brito J. : *Concrete with used tire rubber aggregates: mechanical performance*, ACI Mater. J. 109 (3) 283–292, (2012).
- [26] Xie J.H., Guo Y.C., Liu L.S., Xie Z.H. : *Compressive and flexural behaviours of a new steel fibre-reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber*, Construction and Building Materials. 79, 263–272, (2015).
- [27] Eldin N.N., Senouci A.B. : *Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete*. Cement and Concrete Composites. 16 (4) 287–298, (1994).

- [28] Topcu I.B. : *The properties of rubberized concretes*. Cement and Concrete Research. 25 (2) 304–310, (1995).
- [29] Chadli M. : *Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider– Biskra, Algerie. (2019).
- [30] BELKADI A. A. : *Contribution à l'étude de la durabilité et les performances des bétons autoplaçants (fibres végétales, milieu agressif, formulation, modélisation)*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider– Biskra, Algerie. (2018).
- [31] Segre N., Joekes I. : *Use of tire rubber particles as addition to cement paste*, Cement and Concrete Research. Volume 30, 1421–1425, (2000).
- [32] 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*. Cement and Concrete Composites 29, 732–740, (2007).
- [33] Kenai S., Debieb F. : *Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés*. Materials and Structures, May (2011).
- [34] Bjegović D., Baričević A., Serdar M. : *Durability properties of concrete with recycled waste tyres*. International Conference on Durability of Building Materials and Components XII DBMC, Porto, PORTUGAL, April 12-15, (2011).
- [35] Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A.A. : *Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete*. Construction and Building Materials, volume 23 (5), 1828- 1836, (2009).
- [36] Güneyisi E., Gesoğlu M., Mermerdaş K., İpek S.: *Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete*. Advances in Concrete Construction. 2(3), 193-207, (2014).
- [37] Murhaf H. : *Optimisation et durabilité des micro-bétons à base d'époxyde*. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, (2011).
- [38] Bisht K., Ramana P.V. : *Waste to resource conversion of crumb rubber for production of sulphuric acid resistant concrete*. Construction and Building Materials, 194 276–286,(2019).
- [39] Gupta T., Siddique S., Sharma R. K., Chaudhary S.: *Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment*. Construction and Building Materials 217, 283–291, (2019).
- [40] Thomas B. S., C. Gupta R. et Panicker V. J.: *Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance*. Journal of Cleaner Production, 112, 504-513, (2016).
- [41] Angelin A.F., Lintz R.C.C., Gachet-Barbosa L.A., Osório W.R. : *The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber*. Construction and Building Materials, 151 534–545, (2017).

-
- [42] Gupta T., Tiwari A., Siddique S., Sharma R.K. et Chaudhary S.: *Response assessment under dynamic loading and microstructural investigations of rubberized concrete*, J. Mater. Civ. Eng., 29 (8), (2017).
- [44] Xu J., Chen S., Yu H., Wang Y. : *Crumb Rubber Concrete Deterioration Caused by Sulphate Attack. d3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015)*.
- [43] Drissi M. : *Comportement des bétons : expérimentation et modélisation des paramètres technologiques influant les propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques des bétons frais et durcis*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie. (2018).
- [45] Abdelmonem A., El-Feky M.S., Nasr E. A.R., Kohail M. : *Performance of high strength concrete containing recycled rubber*. Construction and Building Materials, 227, (2019).

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

La valorisation des sous-produits et autres déchets est devenue un enjeu stratégique pour l'ensemble des pays. Notre pays est lui-même confronté à des défis de développement considérables et ses besoins immenses en logements et en infrastructure de bases nécessitent une optimisation de la consommation en matières premières particulièrement les granulats et les ciments.

Ce travail présente une étude expérimentale réalisée pour évaluer les propriétés d'un béton à base de granulat de caoutchouc en remplacement partiel d'un granulat fin. Le granulat de caoutchouc servant à remplacer partiellement le sable à 0, 10, 17,5 et 25% du volume. A partir des résultats obtenus, on peut tirer les principales conclusions suivantes :

- La substitution du sable naturel par des granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés augmente l'ouvrabilité du béton.
- La masse volumique des bétons modifiés varie en sens inverse. On notera que cette baisse de la masse volumique est due à la faible densité des granulats en caoutchouc.
- L'absorption d'eau par immersion totale augmente de manière concomitante avec la teneur en poudrette de caoutchouc.
- L'incorporation de granulats en caoutchouc diminue la résistance à la compression, à la traction par fendage et à la traction par flexion. Plus le taux de substitution en granulats de caoutchouc est élevé plus les valeurs des propriétés mécaniques diminuent. Des taux de substitution en granulats de caoutchouc de moins de 17,5% ont donné des caractéristiques mécaniques acceptables. Ce résultat est intéressant. Comme ces bétons sont plus légers que le béton de référence, ils sont prometteurs pour certains aspects de la construction où la résistance élevée n'est pas exigée.
- Le retrait de séchage des bétons diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats de caoutchouc dans le béton. Cette diminution du retrait représente un effet favorable sur l'amélioration de la durabilité des bétons.

-
- En ce qui concerne le gonflement, le béton de caoutchouc a un gonflement plus important que le béton ordinaire. Un gonflement plus faible que celui du béton ordinaire est présent au début de la submersion du béton BC25%, mais après une période plus prolongée les gonflements du béton BC25% commencent à dépasser ceux du béton ordinaire.
 - les granulats de caoutchouc abaissent la quantité d'eau absorbée par capillarité des bétons modifiés par rapport au béton ordinaire.
 - la perméabilité à l'eau des bétons contenant des granulats de caoutchouc est supérieure à celle du béton ordinaire.
 - La teneur en caoutchouc joue un rôle important dans la résistance aux attaques chimiques par l'acide sulfurique, sulfate de sodium et l'eau de mer. Elle diminue la perte et le gain en masse du béton et augmente les caractéristiques mécaniques surtout à longue durée (plus de trois mois).

Selon cette étude, on distingue que les bétons contenant des granulats en caoutchouc présente une durabilité plus au moins importante que celle du béton ordinaire. Donc selon ces résultats on peut proposer l'utilisation de ce type des bétons dans la réalisation des semelles de fondations en milieu très agressif, la réalisation des bâtiments industriels qui fabriquent les produits chimiques.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES :

Compte tenu des résultats déjà obtenus, et comme perspectives d'avenir, il serait important de poursuivre et de compléter ce travail par :

- L'étude détaillée de l'interface pâte cimentaire-poudrette de caoutchouc.
- L'étude du comportement mécanique sur des poutres de grandeurs naturelles.
- Une étude de certaines méthodes de traitement physiques et chimiques des granulats de caoutchouc pour évaluer les effets des méthodes de traitement sur l'amélioration des propriétés mécaniques et la durabilité du béton.
- Une étude de durabilité (attaque) à long terme (au-delà de 06 mois et plus) pour mieux cerner les effets des milieux agressifs sur les propriétés mécaniques de ce type de béton.
- Compléter l'étude de durabilité par d'autres essais, par exemple l'essai gel-dégel.
- étudier l'influence de l'incorporation de granulat en caoutchouc de grandes tailles comme remplacement partiel de granulat grossiers sur la durabilité du béton.