

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي – برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arréridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

en : génie civil

Spécialité : Matériaux de génie civil

Par : - HAMMACHE Mohamed Elamine

- HACINE GHERBI Ahmed

Sujet

Analyse expérimentale de l'effet d'échelle sur le comportement en compression du béton incorporant des granulats de caoutchouc réutilisés

Soutenu publiquement : le 04/06/2026

devant le jury composé de :

Dr. BENHCENE Mounir	MCA	Univ-BBA	Président
Dr. HAMLIA Wafa	MCB	Univ-BBA	Examineur
Dr. DEGHEFEL Moussa	MCB	Univ-BBA	Examineur
Dr. GUELMINE Layachi	MCA	Univ-BBA	Encadrant
Dr. MERABTI Salem	MCA	Univ-Ain Defla	Co-Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu, le Clément et le Miséricordieux, de nous avoir accordé la force, le courage ainsi que la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à M. **Layachi GUELMINE**, notre promoteur, pour son encadrement scientifique, ses précieux conseils, sa confiance, sa patience et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à notre co-encadreur, M. **MERABTI Salem**, pour son accompagnement et son soutien.

Nous exprimons aussi notre gratitude aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour le temps consacré à son évaluation.

Nous tenons à remercier vivement l'ensemble des enseignants, ainsi que le personnel et les techniciens du laboratoire de génie civil, pour leur aide, leur disponibilité et leurs encouragements.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

À nos très chers parents, qui ont contribué à notre réussite grâce à leur soutien indéfectible, leur éducation, leurs sacrifices et leurs précieux conseils.

Pour toute leur aide et leur présence constante dans nos vies, nous leur exprimons, à travers ce travail, nos sentiments les plus sincères de respect et de reconnaissance.

Que Dieu les protège et les garde pour nous.

À nos familles, pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

Nous leur souhaitons santé, bonheur et réussite dans leur vie.

À nos chères mères, pour leur tendresse, leur patience et leurs sacrifices inestimables.

À notre honorable encadreur, M. Layachi Guelmine, ainsi qu'à tous les enseignants du

Département de Génie Civil.

ملخص :

تتناول هذه المذكرة دراسة تجريبية لتحليل أثر الحجم على سلوك الخرسانة تحت الضغط عند دمج حبيبات مطاطية معاد تدويرها ناتجة عن الإطارات المستعملة. ويتمثل الهدف الرئيسي للدراسة في تقييم التأثير المشترك لنسبة إدماج الحبيبات المطاطية، إضافة إلى شكل وأبعاد العينات، على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة.

ولهذا الغرض، تم تحضير أربع خلطات خرسانية، تتمثل في خرسانة مرجعية بدون حبيبات مطاطية، وثلاث خلطات خرسانية تحتوي على نسب 10% و20% و30% من الحبيبات المطاطية كتعويض جزئي للرمال الطبيعي. كما أنجز برنامج تجريبي متكامل لتوصيف الخرسانة في حالتها الطرية والمتصلبة من خلال عدة اختبارات، شملت اختبار الهبوط، والكتلة الحجمية، ومقاومة الضغط، ومقاومة الشد بالانقطاع، ومقاومة الشد بالانحناء، إضافة إلى امتصاص الماء بالغمر الكلي والامتصاص الشعري.

أظهرت النتائج التجريبية أن إدماج الحبيبات المطاطية يؤدي إلى انخفاض تدريجي في الكتلة الحجمية والمقاومات الميكانيكية للخرسانة، مصحوبًا بزيادة في امتصاص الماء. ويُعزى هذا السلوك أساسًا إلى انخفاض صلابة الحبيبات المطاطية، وضعف تماسكها مع عجينة الإسمنت، بالإضافة إلى زيادة مسامية الخرسانة. ومع ذلك، فقد أظهرت الخرسانة المطاطية سلوكًا أكثر لدونة، وقدرة أكبر على التشوه، وانهيًا أقل هشاشة مقارنة بالخرسانة العادية.

كما أبرزت دراسة أثر الحجم التأثير الواضح لشكل وأبعاد العينات على قيم المقاومة المقاسة، حيث أظهرت العينات المكعبة مقاومة ضغط أعلى عمومًا مقارنة بالعينات الأسطوانية، وهو ما يؤكد النتائج الواردة في الأدبيات العلمية المتعلقة بالمواد شبه الهشة.

وتبين النتائج المتحصل عليها أن تثمين نفايات الإطارات المستعملة في الخرسانة يمثل حلاً بيئيًا ومستدامًا يساهم في تقليل الآثار البيئية، مع دعم تطوير مواد بناء مبتكرة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، حبيبات المطاط، تأثير الحجم، مقاومة الضغط، الامتصاص، إعادة تدوير الإطارات

Résumé

Ce mémoire présente une étude expérimentale portant sur l'analyse de l'effet d'échelle sur le comportement en compression du béton incorporant des granulats de caoutchouc recyclés issus de pneus usagés. L'objectif principal consiste à évaluer l'influence simultanée du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc, de la géométrie et des dimensions des éprouvettes sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.

Dans cette optique, quatre formulations ont été élaborées : un béton de référence sans granulats de caoutchouc et trois bétons contenant respectivement 10 %, 20 % et 30 % de granulats de caoutchouc en substitution partielle du sable naturel. Une campagne expérimentale complète a été réalisée afin de caractériser les bétons à l'état frais et à l'état durci à travers plusieurs essais, notamment l'affaissement, la masse volumique, la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, la résistance à la traction par flexion, ainsi que l'absorption d'eau par immersion totale et par capillarité.

Les résultats expérimentaux montrent que l'incorporation des granulats de caoutchouc entraîne une diminution progressive de la masse volumique et des résistances mécaniques du béton, accompagnée d'une augmentation de l'absorption d'eau. Cette évolution est principalement liée à la faible rigidité des granulats de caoutchouc, à leur faible adhérence avec la pâte cimentaire ainsi qu'à l'augmentation de la porosité du matériau. Toutefois, les bétons caoutchoutés présentent un comportement plus ductile, une meilleure capacité de déformation et une rupture moins fragile comparativement au béton ordinaire.

L'étude de l'effet d'échelle a également mis en évidence l'influence significative de la géométrie et des dimensions des éprouvettes sur les résistances mesurées. Les éprouvettes cubiques ont généralement présenté des résistances à la compression supérieures à celles obtenues sur les éprouvettes cylindriques, confirmant ainsi les observations rapportées dans la littérature scientifique concernant les matériaux quasi-fragiles.

Les résultats obtenus démontrent que la valorisation des déchets de pneus dans le béton constitue une solution écologique et durable, contribuant à la réduction des impacts environnementaux tout en favorisant le développement de matériaux de construction innovants.

Mots-clés : béton, granulats de caoutchouc, effet d'échelle, résistance à la compression, absorption, recyclage des pneus.

Abstract

This dissertation presents an experimental study on the size effect analysis of the compressive behavior of concrete incorporating recycled rubber aggregates derived from waste tires. The main objective is to evaluate the combined influence of the rubber aggregate replacement ratio, as well as the geometry and dimensions of test specimens, on the physical and mechanical properties of concrete.

For this purpose, four concrete mixtures were developed: a reference concrete without rubber aggregates and three rubberized concretes containing 10%, 20%, and 30% rubber aggregates, respectively, as partial replacement of natural sand. A comprehensive experimental program was conducted to characterize the concretes in both fresh and hardened states through several tests, including slump, density, compressive strength, splitting tensile strength, flexural tensile strength, water absorption by total immersion, and capillary water absorption.

The experimental results indicate that the incorporation of rubber aggregates leads to a progressive reduction in concrete density and mechanical strengths, accompanied by an increase in water absorption. This behavior is mainly attributed to the low stiffness of rubber aggregates, their weak adhesion to the cement paste, and the increase in concrete porosity. Nevertheless, rubberized concretes exhibited more ductile behavior, greater deformation capacity, and less brittle failure compared with conventional concrete.

The size effect study also highlighted the significant influence of specimen geometry and dimensions on the measured strengths. Cubic specimens generally exhibited higher compressive strengths than cylindrical specimens, confirming observations widely reported in the scientific literature concerning quasi-brittle materials.

The obtained results demonstrate that the valorization of waste tires in concrete represents an environmentally friendly and sustainable solution, contributing to the reduction of environmental impacts while promoting the development of innovative construction materials.

Keywords: concrete, rubber aggregates, size effect, compressive strength, absorption, tire recycling.

Table des matières

ملخص

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des Figures

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Recherche bibliographique sur les matériaux cimentaires incorporant les granulats de caoutchouc.....	3
I.1.Introduction.....	3
I.2. Estimation des déchets pneumatiques en Algérie.....	3
I.3. l'impact des déchets pneus sur la nature.....	4
I.4. Les composants d'un pneu.....	6
I.5. Valorisation des pneus usagés.....	6
I.6. Techniques de valorisation des pneus dans le secteur du Génie Civil.....	7
I.6.1.Usage des poudrettes et des granulats de caoutchouc dans le domaine routier.....	7
I.6.2. La technique Pneusol.....	8
I.7.Définition de béton.....	9
I.8. Les constituants d'un béton.....	10
I.8.1. Le ciment.....	10
I.8.2.Les granulats.....	12
I.8.3.L'eau de gâchage.....	13
I.8.4.Les adjuvants.....	14
I.8.4.1 Classes des adjuvants.....	15
I.8.4.2 Adjuvants modifiant l'ouvrabilité.....	15
I.8.4.3 Adjuvants modifiant la prise et le durcissement.....	15
I.8.4.4. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton.....	16
1.8.5. Les produits de cure.....	17
1.8.6. Les additions minérales.....	17

I.9. Classification des bétons.....	18
I.9.1 Classification selon la masse volumique.....	18
I.9.2. Classification selon la consistance (ouvrabilité).....	19
I.9.3. Classification selon la résistance mécanique.....	20
I.9.4. Classification selon les conditions d'exposition.....	21
I.10. Réaction d'hydratation.....	22
I.11. Évolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement).....	23
I.12. Les propriétés des bétons de caoutchouc.....	25
I.12.1. Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton.....	25
I.12.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C.....	28
I.12.2.1. Résistance en compression.....	28
I.12.2.2. La résistance à la traction.....	29
I.13. La notion d'effet d'échelle.....	30
I.13.1. Définition	30
I.13.2. Historique de l'effet d'échelle.....	31
I.13.3. Origine physique de l'effet d'échelle.....	31
I.13.4. Comportement des matériaux quasi-fragiles.....	32
I.13.5. Types d'effet d'échelle.....	32
I.13.6. Théorie de Bazant.....	33
I.13.7. Influence de la taille sur la résistance à la compression du béton.....	35
I.13.8. Paramètres influençant l'effet d'échelle.....	35
I.13.9. Importance en génie civil.....	35
I.14. Analyse des études précédentes.....	36
Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales.....	38
II.1. Introduction.....	38
II.2. Matériaux utilisés.....	39
II.2.1. Le ciment.....	39
II.2.2. L'eau de gâchage.....	39
II.2.3. Les granulats.....	39
II.2.3.1. Granulats de caoutchouc.....	39
II.2.3.2. Le sable 0/5.....	40
II.2.3.3. Le gravier 3/8 et 8/15.....	41

II.2.4. Le superplastifiant.....	41
II.3.Caractérisation des matières premières.....	42
II.3.1. L'analyse granulométrique (EN 933-1).....	42
II.3.1.1. But de l'essai.....	42
II.3.1.2. Principe de l'essai.....	42
II.3.1.3. Mode opératoire.....	43
II.3.2. L'équivalent de sable (EN 933-8).....	47
II.3.2.1. But de l'essai.....	47
II.3.2.2. Principe de l'essai.....	47
II.3.2.3. Mode opératoire.....	47
II.3.2.4 Résultat.....	48
II.3.2.5. Module de finesse.....	49
II.3.3. Masse volumique.....	49
II.3.3.1. La masse volumique apparente (Mv app).....	49
II.3.3.2. La masse volumique absolue (Mv abs).....	52
II.3.4. Porosité.....	56
II.3.5. Compacité.....	57
II.4. Formulation et préparation des bétons étudiés.....	57
II.4.1. Méthode de formulation de Dreux-Gorisse.....	57
II.4.2. Composition des bétons.....	61
II.4.3. Préparation des bétons étudiés.....	62
II.4.3.1.Types de moules utilisés.....	62
II.4.3.2. Malaxage du béton.....	63
II.5. Méthodes Expérimentales.....	64
II.5. 1. Mesure de la consistance.....	64
II.5.2. Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci.....	66
II.5.3. Essai de compression : [EN 12390-3].....	67
II.5.4.Résistance au fendage (essai brésilien) : [EN 12390-6].....	69
II.5.5. Résistance à la traction par flexion : (Essai de flexion à 3 points) : [EN 12390-5].....	70
II.5.6. Absorption par immersion totale.....	71
II.5.6. Absorption capillaire : [EN 13057].....	72
II.6. Conclusion.....	74

Chapitre III : Résultats et Discussions.....	75
III. 1 Introduction.....	75
III.2. Résultats trouvés pour le béton.....	76
III.2.1. Propriétés à l'état frais.....	76
III.2.1.1. L'affaissement.....	76
III.2.2. Propriétés à l'état durci.....	78
III.2.2.1. La masse volumique.....	78
III.2.3. Les propriétés mécaniques.....	80
III.2.3.1. Résistance en compression.....	80
III.2.3.2. Résistance à la traction par fendage.....	86
III.2.3.3. Résistance à la traction par flexion.....	88
III.2.4. Les propriétés physiques.....	90
III.2.4.1. Absorption par immersion totale.....	90
III.2.4.2. Absorption capillaire.....	92
III.3. Effet d'échelle sur la résistance à la compression de béton avec caoutchouc.....	94
III.3.1. Analyse et interprétation.....	96
III.3.2. Discussion générale.....	96
III.3.3. Conclusion.....	97
III.4. Conclusion du chapitre III.....	98
Conclusion générale.....	100
Références bibliographiques.....	102

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classes de consistance des bétons ordinaires.....	20
Tableau I.2 : Classes de résistances des bétons.....	21
Tableau II.1 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravier (8/15).....	43
Tableau II.2 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravier (3/8).....	44
Tableau II.3 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable (0/5).....	45
Tableau II.4 : Résultat de l'analyse granulométrique de caoutchouc (0/5).....	46
Tableau II.5 : Équivalent de sable.....	48
Tableau II.6 : Résultat de porosités.....	56

Tableau II.7 : Résultat de compacité.....	57
Tableau II.8 : Tableau de composition des mélanges étudiés.....	62
Tableau III.1 : Valeurs de l'affaissement pour les différentes compositions.....	76
Tableau III.2 : Masses volumiques à l'état durci des différentes compositions.....	78
Tableau III.3 : Valeurs de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du G.C. D'éprouvette cubique (10×10×10) cm.....	80
Tableau III.4 : Valeurs de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du G.C d'éprouvette cylindrique 10×20 cm.....	82
Tableau III.5 : Valeurs de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du G.C d'éprouvette cylindrique 16×32 cm.....	84
Tableau III.6 : Valeurs de la résistance à la traction par fendage en fonction du pourcentage du G.C.....	87
Tableau III.7 : Valeurs de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage du G.C.....	89
Tableau III.8 : Valeurs d'Absorption par immersion totale en fonction du pourcentage du G.C.....	91
Tableau III.9 : Valeurs de l'Absorption capillaire en fonction du pourcentage du G.C.....	93
Tableau III.10 : Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage du G.C. d'éprouvettes (cubiques 10×10×10 cm ; cylindriques 10×20 cm ; cylindriques 16×32 cm).....	95

Liste des figures

Figure I.1 : Répartition du parc automobile en Algérie.....	4
Figure I.2 : Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés.....	5
Figure I.3 : Caractéristiques complètes du pneu et filières de réutilisation [2].....	6
Figure I.4 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés (Antoine, 2002).....	7
Figure I.5 : Hiérarchie des fractions granulométriques des pneus recyclés et applications routières.....	8
Figure I.6 : Développement, constitution et applications du Pneusol dans le Génie Civil.....	9
Figure I.7 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.....	11
Figure I.8 : Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe.....	12
Figure I.9 : Photos de quelques granulats locaux.....	13
Figure I.10 : Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants.....	15

Figure I.11 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [12].....	16
Figure I.12 : Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	19
Figure I.13 : Évolution et durcissement scientifique de la pâte de ciment.....	25
Figure I.14 : Influence des granulats de caoutchouc sur l'affaissement.....	26
Figure I.15 : Variation de la masse volumique du béton incorporant les granulats de caoutchouc [20].....	27
Figure I.16 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [21].....	27
Figure I.17 : Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4mm remplacé par des G.C. 0-4mm), [22].....	29
Figure I.18 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [20].....	29
Figure I.19 : Illustration de l'effet d'échelle montrant la variation de la résistance en fonction de la taille (échelle logarithmique) [29].....	30
Figure I.20 : Microstructure du béton montrant la présence de microfissures [31].....	31
Figure I.21 : Zone de processus de rupture (FPZ) au voisinage d'une fissure dans le béton [32]..	32
Figure I.22 : Redistribution des contraintes dans la fissure selon la théorie de Bazant (1984) [25].....	34
Figure I.23 : Exemple d'un ouvrage d'art en béton illustrant l'importance de l'effet d'échelle dans le génie civil [33].....	36
Figure II.1 : granulats de caoutchouc (0/5).....	40
Figure II.2 : sable (0/5).....	40
Figure II.3 : gravier (3/8).....	41
Figure II.4 : gravier (8/15).....	41
Figure II.5 : superplastifiant de type MEDAFLOW 30.....	42
Figure II.6 : Courbe granulométrique de gravier 8/15.....	44
Figure II.7 : Courbe granulométrique de gravier 3/8.....	45
Figure II.8 : Courbe granulométrique de sable 0/5.....	46
Figure II.9 : Courbe granulométrique de caoutchouc 0/5.....	47
Figure II.10 : Equivalent de sable.....	48
Figure II.11 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de sable 0/5.....	50
Figure II.12 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de gravier 3/8.....	51
Figure II.13 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de gravier 8/15.....	51
Figure II.14 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de caoutchouc 0/5.....	52

Figure II.15 : Représentation d'essai de la masse volumique absolue [40].....	53
Figure II.16 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de sable 0/5.....	54
Figure II.17 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de gravier 3/8.....	54
Figure II.18 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de gravier 8/15.....	55
Figure II.19 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de caoutchouc 0/5.....	56
Figure II.20 : Abaque permettant la détermination de Copt.....	59
Figure II.21 : Les lignes de partage.....	60
Figure II.22 : Préparation des moules.....	63
Figure II.23 : Les particules sèches.....	64
Figure II.24 : l'affaissement de cône d'Abrams d'un béton.....	64
Figure II.25 : Les éprouvettes libres à l'air.....	65
Figure II.26 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.....	66
Figure II.27 : Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci.....	67
Figure II.28 : La machine pour essai de compression.....	68
Figure II.29 : l'essai de traction par fendage.....	70
Figure II.30 : la machine de l'essai de traction par flexion.....	71
Figure II.31 : séchage des éprouvettes.....	72
Figure II.32 : éprouvettes immergés dans l'eau.....	72
Figure II.33 : dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire [41,42].....	73
Figure II.34 : essai d'absorption capillaire.....	74
Figure III.1 : Influence des G.C sur l'affaissement.....	76
Figure III.2 : L'évolution de la masse volumique en fonction du taux d'incorporation des G.C...79	79
Figure III.3 : Influence des G.C. sur la résistance en compression d'éprouvette cubique (10×10×10) cm.....	81
Figure III.4 : Influence des G.C. sur la résistance en compression d'éprouvette cylindrique 10×20 cm.....	82
Figure III.5 : Influence des G.C. sur la résistance en compression d'éprouvette cylindrique 16×32 cm.....	84
Figure III.6 : Influence des G.C. sur la résistance à la traction par fendage.....	87
Figure III.7 : Influence des G.C. sur la résistance à la traction par flexion.....	89
Figure III.8 : Influence des G.C. sur l'Absorption par immersion totale.....	91
Figure III.9 : Influence des G.C. sur l'Absorption capillaire.....	93

Figure III.10 : Influence des G.C. sur la résistance en compression à 28 jours d'éprouvettes (cubique 10×10×10 cm ; cylindrique 10×20 cm ; cylindrique 16×32 cm).....	95
--	-----------

Introduction générale

Le béton demeure aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé à travers le monde grâce à ses performances mécaniques, sa durabilité et son coût relativement économique. Cependant, l'augmentation continue des besoins en infrastructures et en ouvrages de génie civil engendre une consommation excessive des ressources naturelles, notamment des granulats, ce qui soulève d'importantes préoccupations environnementales et économiques. Parallèlement, l'accumulation croissante des pneus usagés constitue un problème écologique majeur en raison de leur faible biodégradabilité, des difficultés liées à leur élimination et des risques environnementaux qu'ils représentent.

Dans ce contexte, la valorisation des déchets de pneus dans les matériaux cimentaires apparaît comme une alternative prometteuse s'inscrivant dans une démarche de développement durable. L'utilisation de granulats de caoutchouc recyclés dans le béton permet non seulement de réduire les quantités de déchets stockés ou incinérés, mais également de développer des matériaux présentant des propriétés spécifiques, notamment une meilleure capacité de déformation, une absorption accrue de l'énergie et un comportement plus ductile.

Toutefois, de nombreuses recherches ont montré que l'incorporation de granulats de caoutchouc entraîne généralement une diminution des performances mécaniques du béton, particulièrement de la résistance à la compression. Cette réduction dépend de plusieurs paramètres tels que le taux de substitution, la taille et la forme des granulats de caoutchouc, ainsi que la qualité de l'interface entre les granulats et la pâte cimentaire..

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail de recherche, dont l'objectif principal est d'analyser expérimentalement l'effet d'échelle sur le comportement en compression du béton incorporant des granulats de caoutchouc réutilisés issus de pneus usagés.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs formulations de béton ont été réalisées avec différents taux d'incorporation de granulats de caoutchouc. Une campagne expérimentale a ensuite été menée afin d'évaluer les propriétés physiques et mécaniques des bétons élaborés à travers différents essais, notamment :

- l'essai d'affaissement ;
- la mesure de la masse volumique à l'état durci ;
- la résistance à la compression ;
- la résistance à la traction par fendage ;
- la résistance à la traction par flexion ;
- l'absorption d'eau par immersion totale ;
- ainsi que l'absorption capillaire.

L'étude de l'effet d'échelle a été réalisée en utilisant différentes géométries et dimensions d'éprouvettes, à savoir des cubes de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, des cylindres de $10 \times 20 \text{ cm}$ et des cylindres de $16 \times 32 \text{ cm}$.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- le premier chapitre présente une synthèse bibliographique consacrée aux déchets de pneus, aux granulats de caoutchouc, au béton caoutchouté et à l'effet d'échelle ;
- le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée ;
- le troisième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Chapitre I : Recherche bibliographique sur les matériaux cimentaires incorporant les granulates de caoutchouc

I.1.Introduction

La gestion des déchets constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur, particulièrement dans les pays en voie de développement où l'augmentation du parc automobile engendre une production croissante de déchets pneumatiques. En Algérie, cette problématique prend de l'ampleur en raison de l'augmentation continue du nombre de véhicules en circulation, ce qui entraîne une accumulation importante de pneus usagés, souvent mal valorisés ou éliminés de manière inappropriée [1-3].

Ces déchets représentent un risque significatif pour l'environnement et la santé publique. Leur stockage dans des décharges non contrôlées ou leur combustion à l'air libre contribue à la pollution de l'air, du sol et des ressources en eau, tout en favorisant l'apparition de maladies respiratoires. Par ailleurs, leur nature non biodégradable complique davantage leur gestion et nécessite la mise en place de solutions durables.

Face à ces enjeux, la valorisation des pneus usagés apparaît comme une alternative prometteuse. Leur réutilisation dans différents domaines, notamment en génie civil, permet non seulement de réduire leur impact environnemental, mais aussi de développer des matériaux innovants à partir de déchets recyclés.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une estimation des déchets pneumatiques en Algérie, d'analyser leurs impacts sur l'environnement, d'examiner leur composition ainsi que les différentes techniques de valorisation, en mettant l'accent sur leur utilisation dans le domaine du génie civil.

I.2. Estimation des déchets pneumatiques en Algérie

Sur la base des données statistiques fournies par l'Office National des Statistiques (ONS), relatives à la répartition du parc automobile par type de véhicule au 31 décembre 2009, ainsi qu'aux immatriculations enregistrées durant le premier semestre 2010, une estimation du nombre total de véhicules en circulation en Algérie au cours de cette période a été établie selon leur catégorie.

Ainsi, le parc automobile national est estimé à 4 171 827 véhicules. Il est largement dominé par les véhicules de tourisme, qui représentent 62,162 % de l'ensemble. Les camionnettes

occupent la deuxième position avec 19,694 %, suivies des camions avec 8,683 %. Les autres catégories de véhicules présentent des proportions nettement plus faibles, notamment les autocars et autobus (1,679 %), les tracteurs routiers (1,520 %), les tracteurs agricoles (3,136 %), ainsi que les remorques (2,779 %). Les motos et les véhicules spéciaux constituent une part marginale du parc, avec respectivement 0,263 % et 0,080 %.

Cette répartition détaillée du parc automobile constitue un indicateur essentiel pour l'évaluation du gisement potentiel de déchets pneumatiques, dans la mesure où chaque catégorie de véhicule est associée à une consommation et un renouvellement spécifiques des pneumatiques (figure I.1) [1,2].

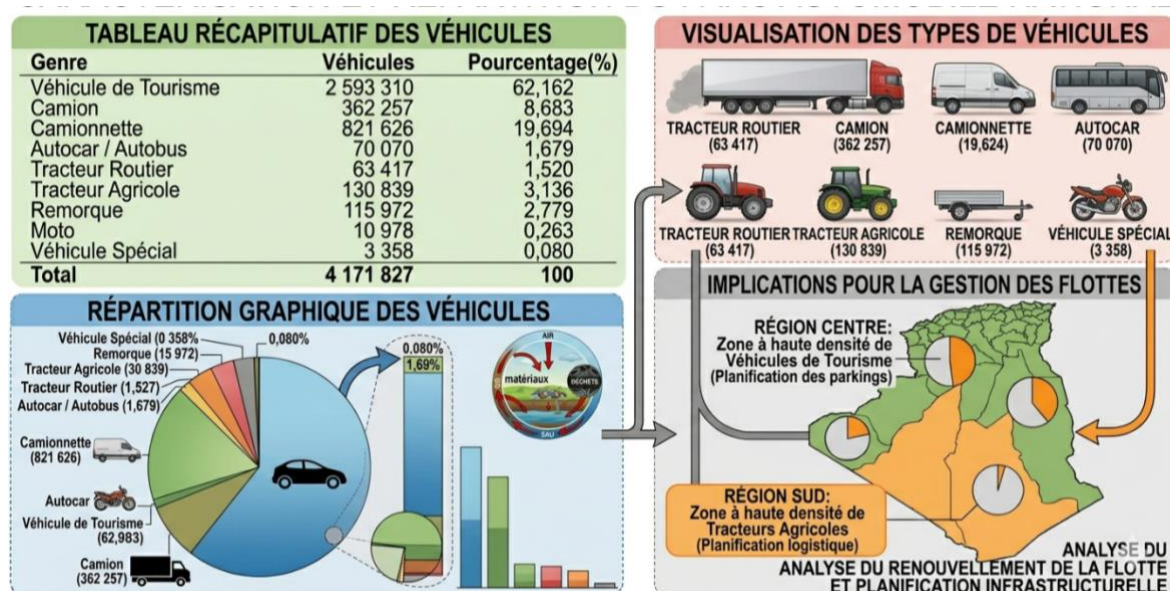


Figure I.1 : Répartition du parc automobile en Algérie

I.3. L'impact des déchets pneus sur la nature

La pollution peut être définie comme une altération défavorable du milieu naturel, résultant principalement des activités humaines, mais également influencée par des facteurs tels que les niveaux de radiation, les caractéristiques physico-chimiques du milieu et l'évolution des écosystèmes. Elle se traduit par une dégradation des composantes essentielles de l'environnement, notamment l'air, le sol et les ressources en eau.

Les déchets constituent une source majeure de pollution. Leur accumulation affecte non seulement l'aspect paysager, mais entraîne également une contamination des milieux naturels. En outre, ils représentent un risque direct pour la santé humaine en exposant les populations à diverses nuisances et dangers, particulièrement dans le cas des déchets

spéciaux qui présentent des propriétés dangereuses telles que l'inflammabilité, la toxicité ou le caractère irritant [1,2].

La combustion des déchets dans des décharges non contrôlées, notamment à l'air libre, aggrave considérablement la pollution atmosphérique en émettant des gaz et des particules nocives. Cette pratique contribue à la dégradation de la qualité de l'air et favorise l'apparition de maladies respiratoires. Selon l'enquête nationale de santé publique (1990), les affections respiratoires occupent la première place des causes de morbidité ressentie (35 %) ainsi que des motifs de consultation (27,2 %). Elles représentent également la deuxième catégorie de maladies chroniques identifiées.

Actuellement, le nombre de personnes souffrant d'asthme en Algérie est estimé à environ deux millions. La répartition géographique des cas montre une prédominance dans les régions les plus urbanisées et industrialisées, avec 38 % des cas dans la région centre, 31 % dans la région est, 22 % dans la région ouest et 9 % dans la région sud. Cette distribution reflète l'influence directe du niveau de pollution atmosphérique, étroitement lié au degré d'urbanisation et d'industrialisation des différentes régions [4].

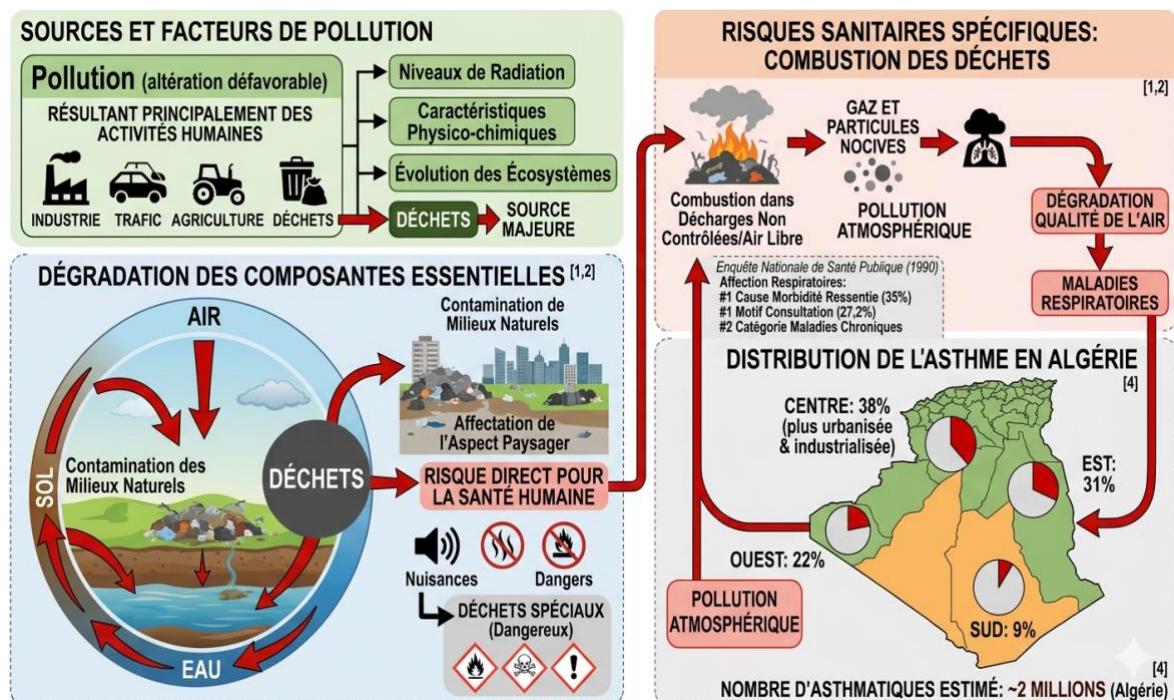


Figure I.2 : Les risques de feux dans les décharges des pneus usagés.

I.4. Les composants d'un pneu

Le pneu est généralement composé de caoutchouc naturel ou synthétique, de noir de carbone et de soufre. Sa constitution varie peu entre les pneus tourisme et poids lourds [2]. En fonction de son altération, on distingue deux types de pneus :

- Les pneumatiques usagés réutilisables (PUR)

Il existe deux filières pour les pneus Usagés Réutilisables, l'une est le rechapage (remplacement de la bande de roulement) qui concerne surtout les pneus de poids lourds et d'engins de chantier et la seconde est la commercialisation sur le marché de l'occasion ou à l'export, dans le cas où les pneus n'ont pas atteint la limite d'usure autorisée.

- Les pneumatiques usagés non réutilisables (PUNR)

Ce sont les pneus qui ne peuvent plus assurer la mobilité d'un véhicule en respectant les normes de sécurité, donc on doit les éliminer.

Le tableau ci-dessous présente en ordre d'importance les différentes matières contenues dans le pneu.

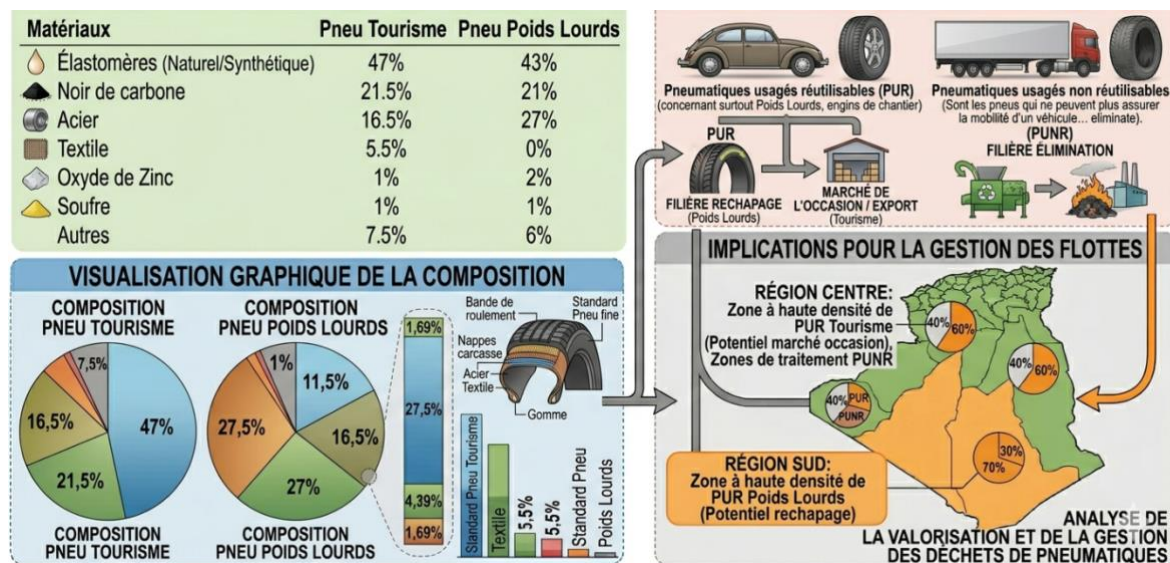


Figure I.3 : Caractéristiques complètes du pneu et filières de réutilisation [2].

I.5. Valorisation des pneus usagés

Le pneu usagé, qui a complété un cycle de vie, est réorienté ensuite vers l'industrie du rechapage ou de la vente de pneus d'occasion. Quant au pneu hors usage, il est inapte à reprendre la route qui doit être éliminé (figure I.4). Toutefois, dans la littérature, les pneus

usagés désignent les pneus usagés réutilisables et les pneus hors usage sont les pneus usagés non réutilisables. Dans notre vocabulaire, les pneus usagés sont les pneus usagés non réutilisables ou encore les pneus hors d'usage. Les pneus usagés sont utilisés sous différentes formes dans les applications industrielles telles que les infrastructures routières, le remplissage d'aires de jeux, le domaine du génie civil et de nombreux autres produits. La solution économique la plus fiable, qui permet d'éliminer complètement ces déchets, est la valorisation. Il existe plusieurs voies de valorisation des pneus usagés qui sont pratiquées parmi lesquelles la valorisation énergétique et la valorisation matière [2,5].

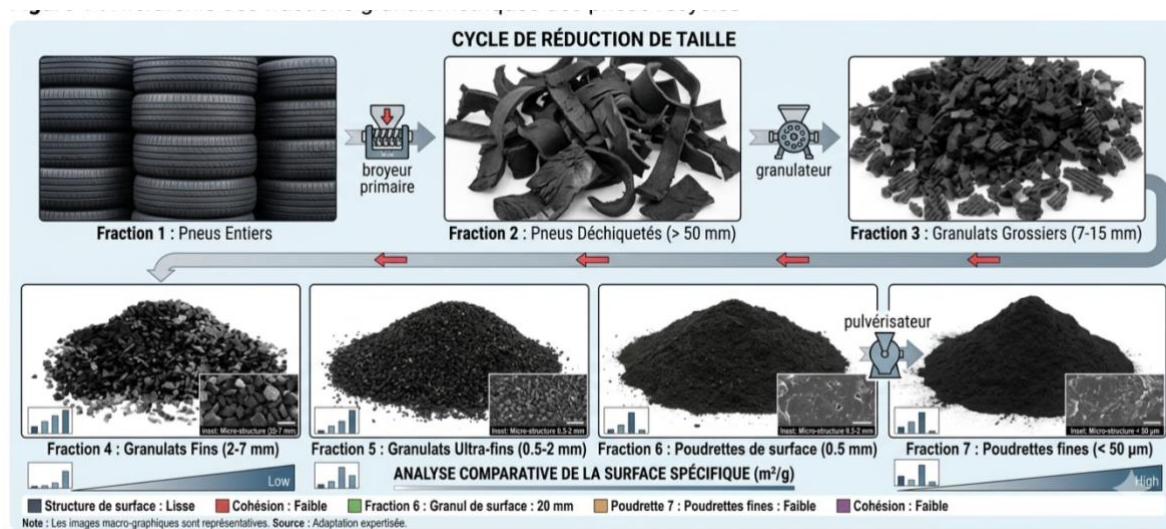


Figure I.4 : Différents demi-produits issus du broyage des pneus usagés (Antoine, 2002).

I.6. Techniques de valorisation des pneus dans le secteur du génie civil

I.6.1. Usage des poudrettes et des granulats de caoutchouc dans le domaine routier

Le broyage poussé permet d'obtenir un matériau de granulométrie inférieure à 1,2 mm, utilisable en technique routière. Il a été estimé par Trivalor que son utilisation sur les chantiers routiers entraîne un surcoût de 10 % par rapport à l'emploi d'un bitume non modifié. Cette différence est compensée par la durée de vie supérieure du bitume traité et par les propriétés thermiques meilleures [6].

Les bitumes mélangés avec poudrettes de caoutchouc permettent également de :

- ✓ Limiter les nuisances sonores.
- ✓ D'améliorer la sécurité des automobilistes sur routes mouillées.

- ✓ De limiter les nuisances à l'environnement par une limitation du salage en hiver pour les pays froids, du fait d'une meilleure tenue de route à hautes et à basses températures.
- ✓ Les poudrettes ou les granulés pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres matériaux comme les bétons et les mortiers.

Figure 1 : Hiérarchie des fractions granulométriques des pneus recyclés et applications routières

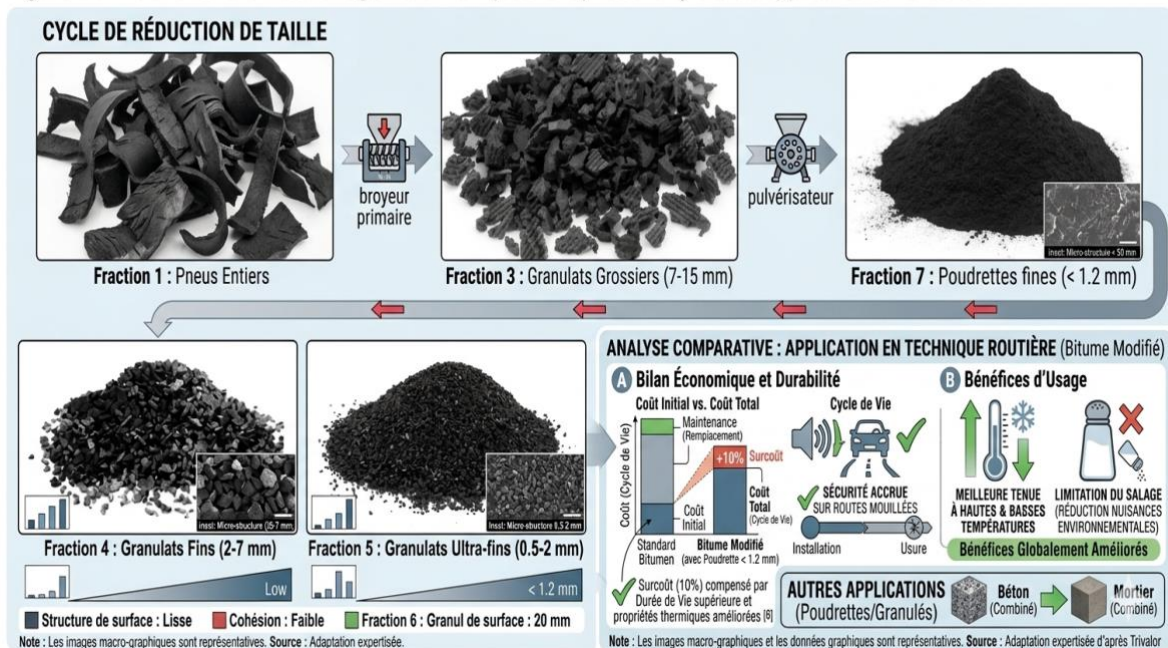


Figure I.5 : Hiérarchie des fractions granulométriques des pneus recyclés et applications routières.

I. 6.2. La technique Pneusol

Le Pneusol est formé par l'association de pneus usagés non rechargeables (poids lourds ou tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets. Les éléments de pneus sont utilisés comme renforts du massif de sol, les bandes de roulement ou les flancs sont découpés et associés en nappe par des attaches. Ces bandes peuvent être posées sur chant ou aplaties. Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris par le Dr Nguyen Thanh LONG, Ingénieur du LCPC, est largement diffusée depuis 1982. Les différentes applications concernent des ouvrages de soutènement, des ouvrages réducteurs de poussées ou de charges, des murs antibruit, des ouvrages de protection des berges et des

pentres et talus. Plus de 12 ouvrages Pneusol Anti Marston sont réalisés en Algérie en 1986 [1,6].

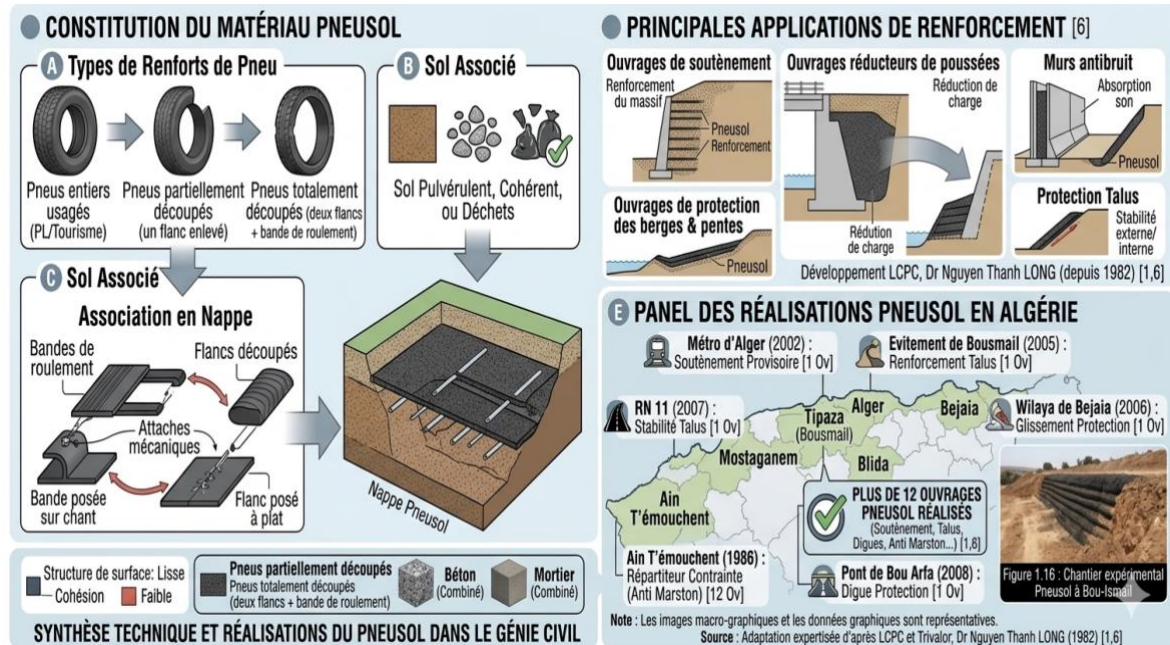


Figure I.6 : Développement, constitution et applications du Pneusol dans le Génie Civil.

I.7. Définition de béton

Le béton est un matériau composite composé principalement de granulats (filler, sable et gravier), de ciment, d'eau et, dans la plupart des cas, d'adjuvants. Ces différents constituants présentent des caractéristiques physiques variées, notamment en ce qui concerne leur masse volumique. Dans les bétons ordinaires, celle-ci peut varier approximativement de 1 t/m³ pour l'eau à environ 3 t/m³ pour le ciment. De plus, la taille des particules diffère considérablement, allant de dimensions micrométriques pour les grains les plus fins du ciment jusqu'à environ 30 mm pour les granulats grossiers.

Pour une utilisation optimale du béton, il est essentiel de bien connaître ses propriétés à ses différents états. À l'état frais, le béton possède un comportement plastique qui permet sa mise en place et sa mise en forme. Une fois durci, sa forme devient définitive, bien que certaines de ses propriétés continuent d'évoluer pendant une période relativement longue.

En fonction de plusieurs paramètres, tels que la disponibilité des matériaux, la nature de l'ouvrage à réaliser ainsi que les méthodes de mise en œuvre, un cahier des charges est généralement établi afin de définir les exigences auxquelles le béton doit satisfaire.

I.8. Les constituants d'un béton

I.8.1. Le ciment

C'est un liant hydraulique artificiel fabriqué essentiellement à partir d'un mélange de calcaires (environ 75 %), d'alumine et de silice présents dans l'argile (environ 25 %). Le procédé de fabrication du ciment consiste essentiellement à broyer des matières premières, à les mélanger dans certaines proportions, puis à les cuire dans un grand four rotatif à une température d'environ 1450 °C, température à laquelle le matériau fond partiellement, formant des nodules, connus sous le nom de clinker. Le clinker froid puis broyé en poudre fine, opération à laquelle on ajoute un pourcentage de gypse (de 3 à 5% de masse de clinker) et un pourcentage d'ajouts inertes ou actifs (laitier, pouzzolane, cendre, calcaire...) pour obtenir le ciment désiré selon le type d'ouvrage réalisé [1, 4]. Les ciments sont alors classés en fonction de leur composition en cinq types principaux selon la norme NFP15-301 (voir la figure I.7). Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [15].

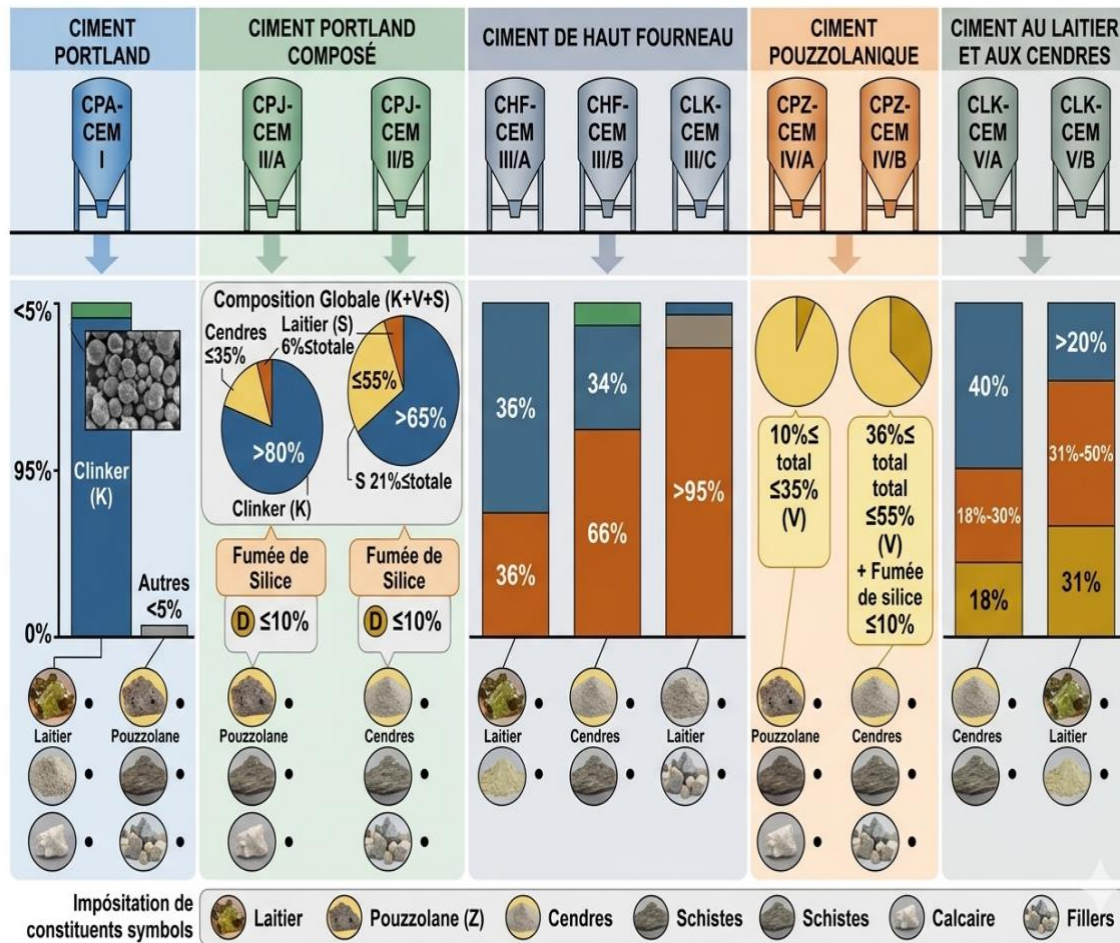


Figure I.7 : Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

En fonction de la résistance normale à 28 jours, trois classes principales de ciment sont définies et des sous-classes "R" associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées [15]. Ces classes sont notées 32,5, 42,5 et 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties de la figure I.8.

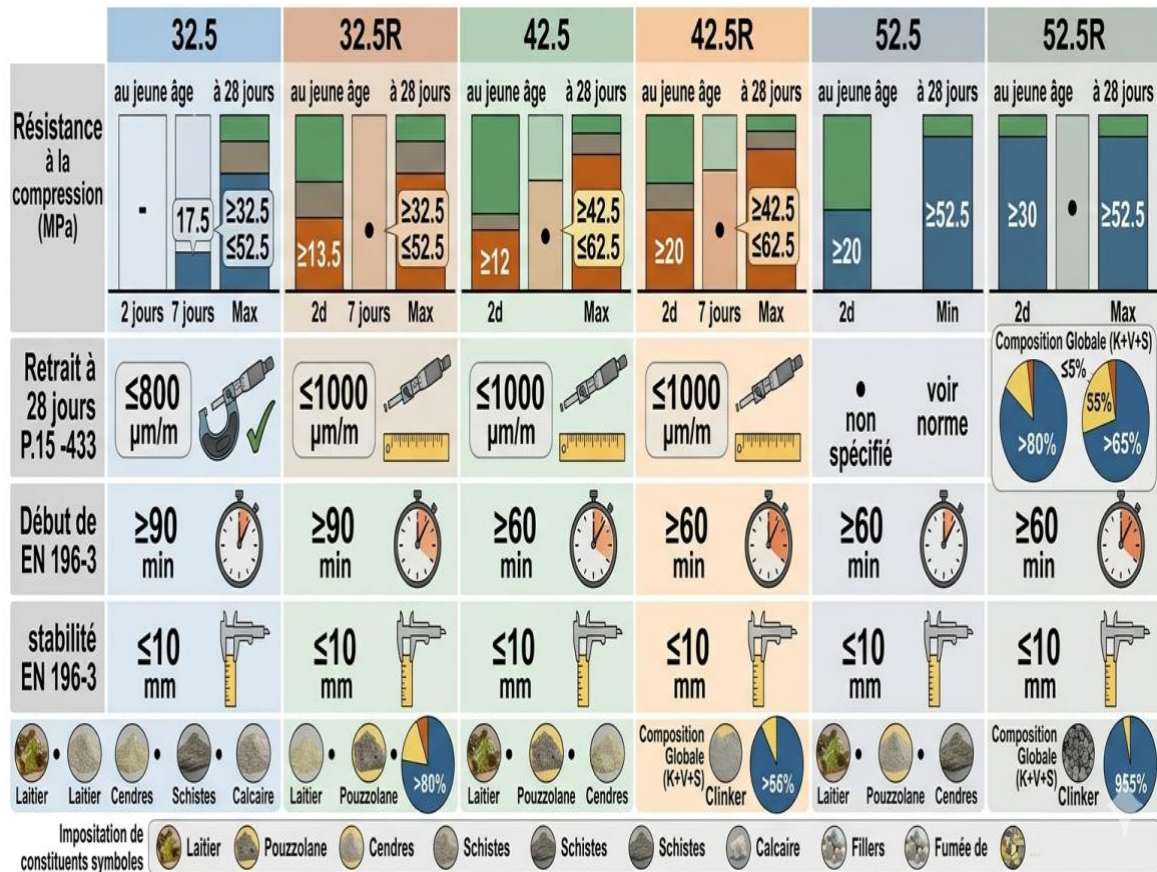


Figure I.8 : Spécification et valeurs garanties du ciment en fonction de la classe

I.8.2. Les granulats

Les granulats regroupent l'ensemble des particules minérales dont les dimensions varient généralement entre 0 et 125 mm. Ils peuvent être d'origine naturelle, comme les sables et graviers provenant des rivières ou des carrières, d'origine artificielle tels que les granulats d'argile expansée, ou encore issus du recyclage de certains déchets industriels, comme le laitier de haut fourneau.

Dans un béton ordinaire, les granulats représentent environ 70 à 80 % du volume total, constituant ainsi l'ossature principale du matériau. Ils sont généralement considérés comme chimiquement inertes. Toutefois, dans certains cas, ils peuvent participer indirectement à certaines réactions d'hydratation des constituants du ciment, notamment lorsque des fillers calcaires sont présents, pouvant influencer l'hydratation de certains minéraux du clinker comme le silicate tricalcique (C_3S).

L'utilisation des granulats dans la formulation du béton est principalement motivée par leur coût relativement faible, ainsi que par leur contribution à l'amélioration de la durabilité et de la stabilité volumique du matériau par rapport à une pâte composée uniquement de ciment et d'eau.

Par ailleurs, plusieurs caractéristiques des granulats influencent les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci, notamment leur nature, leur proportion dans le mélange, leur forme, leur granulométrie, leur propreté, leur état de surface ainsi que leur type.

Selon la norme NA 452, les granulats peuvent être classés en différentes catégories granulométriques, parmi lesquelles on distingue notamment les fillers ($0/D$ avec $D < 2$ mm), les sablons ($0/D$ avec $D \leq 1$ mm), les sables ($1 < D \leq 6,3$ mm), les graves ($D > 6,3$ mm), les gravillons (d/D avec $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm) ainsi que les ballasts (d/D avec $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm) [8].

Les photos suivantes présentent quelques échantillons de granulats locaux [9].



Figure I.9 : Photos de quelques granulats locaux.

I.8.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage constitue un élément indispensable dans la formulation du béton. Elle assure principalement deux fonctions essentielles. D'une part, elle confère au béton sa

maniabilité à l'état frais en influençant ses propriétés rhéologiques, ce qui facilite les opérations de mise en œuvre. D'autre part, elle permet l'hydratation des grains de ciment, processus nécessaire à la prise et au durcissement du béton.

La quantité d'eau introduite dans le mélange, et plus particulièrement le rapport eau/ciment (E/C), joue un rôle déterminant dans les propriétés du béton. Ce paramètre influence notamment la porosité, la perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure ainsi que la cinétique d'hydratation du ciment.

L'eau utilisée pour le gâchage peut provenir de différentes sources. Toutefois, l'eau potable est généralement considérée comme conforme aux exigences des normes en vigueur. Les autres sources d'eau, telles que les eaux issues du recyclage des centrales à béton, les eaux souterraines, les eaux industrielles, l'eau de mer ou les eaux saumâtres, doivent faire l'objet d'analyses préalables, notamment des essais chimiques et physiques, afin de vérifier leur conformité aux exigences normatives [10].

I.8.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances d'origine chimique ou naturelle, généralement sous forme liquide ou pulvérulente, incorporées aux matériaux cimentaires tels que le béton, les mortiers ou les coulis afin d'en modifier certaines propriétés. Ils sont utilisés en faible proportion, généralement inférieure à 5 % de la masse du ciment, et sont ajoutés soit avant, soit pendant l'opération de malaxage [10,11].

L'utilisation des adjuvants vise à améliorer certaines caractéristiques du béton, aussi bien à l'état frais qu'au cours de la prise, du durcissement ou à l'état durci. Ils peuvent notamment influencer la rhéologie du béton, la cinétique d'hydratation du ciment, les performances mécaniques ainsi que certaines propriétés de durabilité. Chaque adjuvant possède une fonction principale correspondant à l'effet recherché, mais peut également présenter des fonctions secondaires. Toutefois, l'efficacité d'un adjuvant dépend de plusieurs paramètres tels que son dosage et sa compatibilité avec les autres constituants du béton [7,10].

I.8.4.1 Classes des adjuvants

Selon leur fonction principale, les adjuvants utilisés dans le béton peuvent être classés en plusieurs catégories, notamment ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton, ceux qui influencent la prise et le durcissement du ciment, ainsi que ceux qui améliorent certaines propriétés spécifiques du béton durci [11].

I.8.4.2 Adjuvants modifiant l'ouvrabilité

Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité agissent principalement sur les propriétés rhéologiques du béton à l'état frais. Ils permettent de réduire la viscosité du mélange et d'améliorer sa maniabilité sans nécessairement augmenter la quantité d'eau. Les plastifiants et superplastifiants appartiennent à cette catégorie. Leur mode d'action repose sur la dispersion des particules de ciment, ce qui limite le phénomène de floculation et libère l'eau initialement piégée entre les grains de ciment [10].

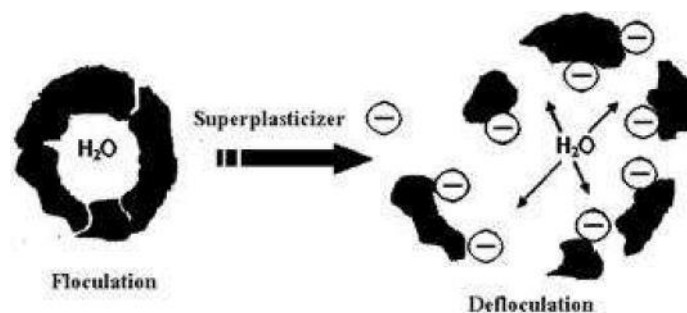


Figure I.10 : Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants.

I.8.4.3 Adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Certains adjuvants agissent sur la vitesse d'hydratation du ciment et influencent ainsi les temps de prise et de durcissement du béton. On distingue principalement les accélérateurs, qui permettent de réduire les temps de prise et d'augmenter le développement des résistances initiales, et les retardateurs, qui prolongent le temps de prise du béton. Ces derniers sont particulièrement utilisés dans les conditions de bétonnage par temps chaud ou lors de travaux nécessitant un temps de mise en œuvre plus long [12].

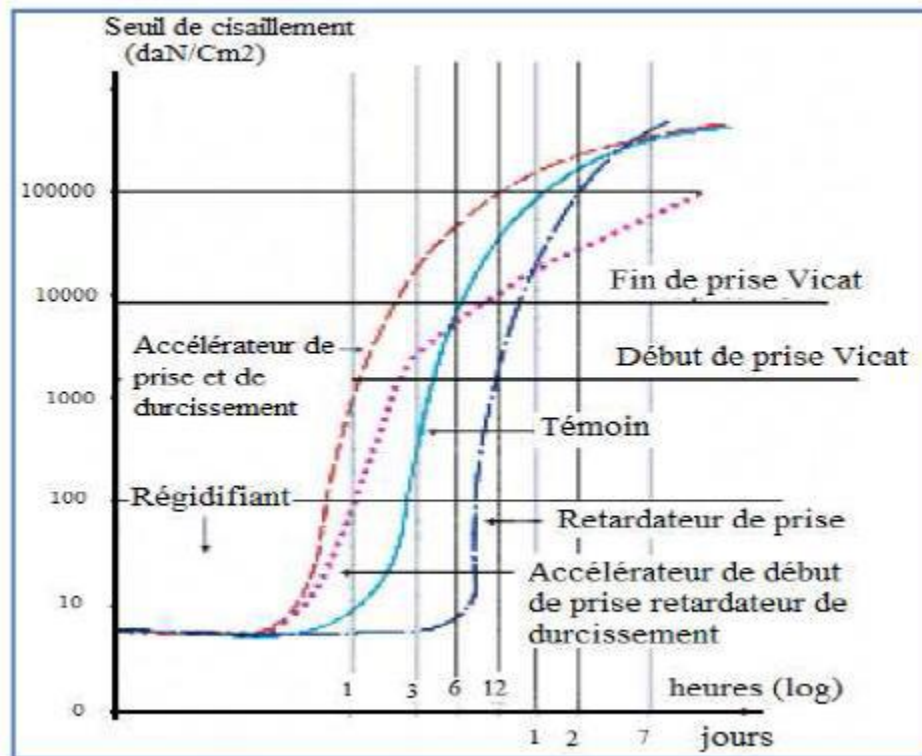


Figure I.11 : Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [12].

I.8.4.4. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

D'autres types d'adjuvants sont utilisés afin d'améliorer certaines propriétés spécifiques du béton. Parmi eux figurent notamment les entraîneurs d'air, qui introduisent de fines bulles d'air dans la matrice cimentaire afin d'améliorer la résistance au gel, ainsi que les hydrofuges de masse, qui réduisent la perméabilité et l'absorption capillaire du béton. Il existe également des agents de rétention d'eau permettant d'améliorer l'homogénéité et la stabilité du mélange.

1.8.5. Les produits de cure

Les produits de cure sont utilisés afin de protéger le béton fraîchement mis en place contre un dessèchement prématuré dû à une évaporation rapide de l'eau. Une perte d'eau trop importante peut entraîner une diminution des résistances mécaniques ainsi que l'apparition de fissures de retrait avant la prise complète du béton.

Ces produits sont généralement composés de résines, de cires ou de paraffines sous forme d'émulsions aqueuses, ou encore de résines naturelles ou synthétiques dissoutes dans des solvants. Ils peuvent également contenir du caoutchouc chloré. Après application, généralement par pulvérisation sur la surface du béton frais, ils forment un film protecteur continu et imperméable qui limite l'évaporation de l'eau. Ce film doit être éliminé par brossage une fois que le béton a suffisamment durci.

Les produits de cure sont particulièrement recommandés pour les ouvrages présentant une grande surface exposée, tels que les dallages, les planchers ou les pistes, où le rapport entre la surface d'évaporation et l'épaisseur du béton est élevé.

1.8.6. Les additions minérales

Les additions minérales sont des matériaux finement divisés, généralement sous forme de poudres fines ou ultrafines, incorporées au béton en complément du ciment. Elles sont généralement ajoutées en proportions pouvant atteindre environ 10 % de la masse du ciment. Selon leur nature, ces additions peuvent être actives ou inertes et contribuent à améliorer certaines propriétés du béton grâce à leurs caractéristiques physico-chimiques. Parmi les additions les plus couramment utilisées figurent les cendres volantes, le laitier de haut fourneau ou encore les fillers calcaires.

À l'état frais, ces poudres fines améliorent la consistance et l'ouvrabilité du béton en favorisant une meilleure fluidité du mélange. À long terme, elles permettent d'augmenter la compacité du béton et de réduire sa porosité, ce qui améliore sa durabilité et sa résistance aux agressions extérieures [13].

Certaines additions actives, notamment celles présentant un caractère pouzzolanique comme la fumée de silice ou les cendres volantes, réagissent avec les produits d'hydratation du ciment et contribuent ainsi à la formation d'une matrice cimentaire plus dense. Leur

utilisation permet d'obtenir des bétons plus résistants, plus compacts et plus durables, notamment dans le cas des bétons à hautes résistances ou à ultra-hautes performances.

I.9. Classification des bétons

Le béton peut être classé selon plusieurs critères, notamment la masse volumique, la consistance à l'état frais, la résistance mécanique ou encore les conditions d'exposition environnementales.

I.9.1 Classification selon la masse volumique

Selon leur masse volumique, les bétons peuvent être répartis en quatre catégories principales :

- Bétons très lourds : $M_v > 2500 \text{ kg/m}^3$
- Bétons lourds ou bétons courants : $1800 \text{ kg/m}^3 \leq M_v \leq 2500 \text{ kg/m}^3$
- Bétons légers : $500 \text{ kg/m}^3 \leq M_v < 1800 \text{ kg/m}^3$
- Bétons très légers : $M_v < 500 \text{ kg/m}^3$

Les bétons courants sont les plus utilisés dans les ouvrages de bâtiment et de travaux publics. Leur masse volumique se situe généralement entre 2400 et 2500 kg/m^3 et ils peuvent être utilisés sous forme de béton armé ou de béton précontraint lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations importantes.

Les bétons très lourds, dont la masse volumique peut atteindre 6000 kg/m^3 , sont utilisés dans des ouvrages spécifiques nécessitant une forte densité, comme certaines installations nucléaires ou des structures destinées au confinement de matériaux radioactifs.

À l'inverse, les bétons légers et très légers sont principalement employés pour leurs propriétés d'isolation thermique et leur faible poids propre, notamment dans les structures du bâtiment ou certains ouvrages maritimes.

I.9.2. Classification selon la consistance (ouvrabilité)

L'ouvrabilité représente l'aptitude du béton frais à être mis en place facilement dans les coffrages tout en assurant un bon enrobage des armatures.

Plusieurs paramètres influencent cette propriété, notamment :

- La nature et le dosage du ciment,
- La forme et la granulométrie des granulats,
- La quantité d'eau de gâchage,
- L'utilisation éventuelle d'adjuvants.

Un excès d'eau dans le mélange peut entraîner plusieurs effets indésirables tels que le ressuage, la diminution de la compacité, l'augmentation de la porosité, la ségrégation des constituants ainsi qu'un retrait plus important du béton.

L'ouvrabilité est généralement évaluée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, qui consiste à mesurer l'affaissement d'un volume de béton frais après retrait du moule tronconique.

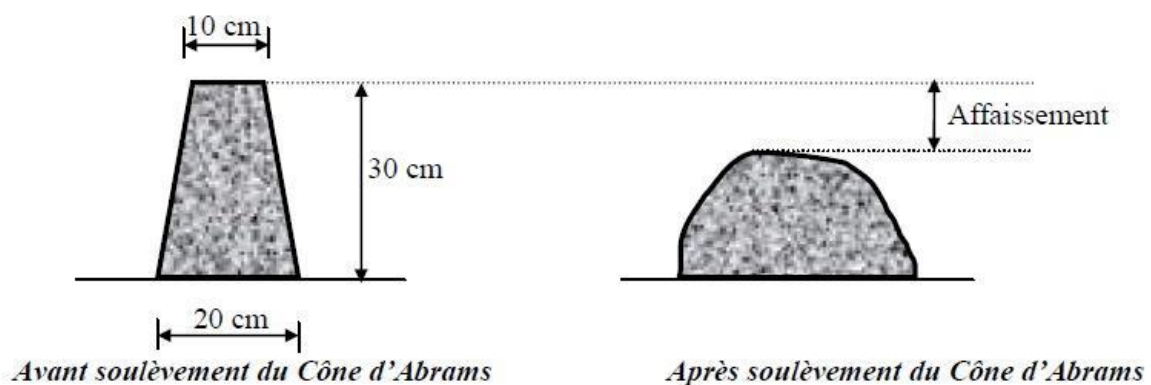


Figure I.12 : Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Selon la valeur de l'affaissement, les bétons ordinaires sont classés en cinq catégories :

Tableau.I.1 : Classes de consistances des bétons ordinaires

Classes	Consistance du béton	Affaissement au cône d'Abrams (cm)
S1	Ferme	1 à 4
S2	Plastique	5 à 9
S3	Très plastique	10 à 15
S4	Fluide	16 à 21
S5	Très fluide	≥ 22

D'autres essais peuvent également être utilisés pour caractériser la consistance du béton, tels que l'essai à la table à secousse, l'essai d'écoulement au cône, ou encore l'utilisation du maniabilimètre.

I.9.3. Classification selon la résistance mécanique

La classification des bétons durcis est généralement basée sur leur résistance à la compression mesurée à 28 jours (R_{c28}).

Selon la norme EN 206, les classes de résistance des bétons courants sont exprimées sous la forme C_x/y , où :

X : correspond à la résistance caractéristique mesurée sur cylindre (MPa)

Y : correspond à la résistance caractéristique mesurée sur cube (MPa)

Par exemple :

Tableau.I.2 : Classes de résistances des bétons

Classes de résistance	Rc minimale sur cylindre N/mm ²	Rc minimale sur cube N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
...	...	...
C100/115	100	115

Les valeurs sont généralement déterminées sur des éprouvettes cylindriques de 150 mm de diamètre et 300 mm de hauteur, ou sur des cubes de 150 mm de côté.

I.9.4. Classification selon les conditions d'exposition

Le béton peut être soumis à différentes agressions liées à l'environnement d'exposition. Pour cette raison, la norme EN 206 définit plusieurs classes d'exposition :

- X0 : absence de risque de corrosion ou d'attaque
- XC : corrosion des armatures par carbonatation
- XD : corrosion due aux chlorures d'origine non marine
- XS : corrosion due aux chlorures présents dans l'eau de mer
- XF : attaque par cycles gel/dégel
- XA : attaque chimique

Ces classes permettent d'adapter la formulation du béton afin d'assurer une durabilité suffisante de l'ouvrage dans son environnement.

I.10. Réaction d'hydratation

L'hydratation du ciment désigne l'ensemble des réactions physico-chimiques qui se produisent entre les constituants du ciment et l'eau, conduisant à la formation de nouveaux composés hydratés responsables de la prise et du durcissement du matériau. Plus précisément, les phases minéralogiques du clinker, principalement les silicates (C_3S , C_2S) et les aluminates (C_3A , C_4AF), réagissent avec l'eau pour former des produits d'hydratation tels que le gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) et des hydrates d'aluminate. Ces produits confèrent progressivement au système une structure cohésive, dense et résistante, caractéristique de la pâte de ciment durcie.

Les travaux pionniers de Le Chatelier ont montré que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement similaires à ceux obtenus par hydratation des phases minérales pures prises individuellement, dans des conditions analogues. Cette observation a été confirmée ultérieurement par H.H. Steinour [16], contribuant ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux de l'hydratation.

Du point de vue cinétique, les réactions d'hydratation évoluent selon plusieurs phases : une phase initiale rapide (dissolution), suivie d'une période d'induction (faible activité), puis d'une phase d'accélération marquée par une précipitation intense des hydrates, avant d'atteindre une phase de ralentissement progressive. Ce ralentissement s'explique principalement par la très faible solubilité des produits d'hydratation formés, qui précipitent à la surface des grains de ciment et constituent une barrière limitant la diffusion de l'eau vers le cœur des particules non hydratées.

Ainsi, quel que soit le mode de formation des hydrates, la vitesse d'hydratation diminue continuellement avec le temps. Par conséquent, même après de longues périodes, une fraction significative de ciment demeure non hydratée. Les travaux de T.C. Powers [17] ont montré qu'après 28 jours de cure, l'hydratation ne pénètre que sur une profondeur d'environ $4\text{ }\mu\text{m}$ à partir de la surface des grains de ciment, atteignant environ $8\text{ }\mu\text{m}$ après une année. Ces résultats mettent en évidence le caractère diffusif et limité du processus d'hydratation. En conditions normales, l'hydratation complète n'est possible que pour les particules de ciment de très petite taille (inférieures à $50\text{ }\mu\text{m}$), pour lesquelles la diffusion de l'eau peut atteindre le cœur du grain. En revanche, pour des particules plus grossières, une partie

centrale reste anhydre. Toutefois, des expériences ont montré qu'une hydratation quasi totale peut être obtenue par broyage continu du ciment en présence d'eau pendant plusieurs jours, ce qui augmente considérablement la surface spécifique et favorise la réaction.

En définitive, l'hydratation du ciment est un processus complexe, contrôlé à la fois par des mécanismes chimiques (réactivité des phases) et physiques (diffusion, porosité, surface spécifique), qui conditionne directement les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires.

I.11. Évolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement)

Après la prise, le processus d'hydratation du ciment se poursuit durant la phase dite de durcissement, qui s'étend sur une période beaucoup plus longue. Pour les ciments à prise rapide, une grande partie de la résistance mécanique est acquise en quelques jours, tandis que pour d'autres types de ciments, notamment ceux à faible chaleur d'hydratation, le développement des propriétés mécaniques peut se prolonger pendant plusieurs mois, voire plusieurs années [14,15].

Les propriétés mécaniques de la pâte de ciment durcie ne dépendent pas uniquement de la nature chimique des produits d'hydratation, mais également, et de manière prépondérante, de leur organisation microstructurale, en particulier de la structure poreuse du gel formé à l'échelle colloïdale. Ainsi, la compréhension des propriétés physiques et de l'évolution de cette microstructure est essentielle pour expliquer le comportement macroscopique des matériaux cimentaires.

À l'état frais, la pâte de ciment peut être considérée comme une suspension concentrée de particules solides dispersées dans l'eau, présentant un comportement plastique. Après la prise, cette suspension évolue vers une structure rigide, dont le volume apparent reste globalement constant, malgré les transformations internes liées à l'hydratation.

À tout instant du processus d'hydratation, la pâte durcie est constituée d'un ensemble complexe comprenant :

- Des hydrates peu cristallisés, principalement le gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), formant la matrice principale,
- Des cristaux d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$),

- Des phases mineures issues des réactions des aluminates,
- Des grains de ciment non hydratés,
- Et un réseau de vides contenant de l'eau.

Ces vides se répartissent en deux catégories principales : les pores capillaires, issus des espaces initialement occupés par l'eau libre non consommée, et les pores de gel, de dimensions beaucoup plus fines, situés à l'intérieur même de la structure du gel C-S-H. Le modèle microstructural proposé par T.C. Powers [17] illustre cette organisation complexe et hiérarchisée de la pâte de ciment.

Au cours de l'hydratation, la surface spécifique de la phase solide augmente considérablement en raison de la formation des produits hydratés. Une partie importante de l'eau libre est alors adsorbée à la surface de ces phases solides. Lorsque les échanges d'eau avec l'environnement sont limités (milieu fermé), les réactions d'hydratation consomment progressivement l'eau disponible, ce qui entraîne une diminution de l'humidité relative interne. Ce phénomène, appelé auto-dessiccation, peut engendrer des contraintes internes et favoriser l'apparition de microfissures.

Par ailleurs, la formation du gel C-S-H nécessite la présence d'eau dans les pores. Ainsi, à mesure que l'eau est consommée et que l'humidité interne diminue, la poursuite de l'hydratation devient de plus en plus limitée. Le processus de durcissement se poursuit donc tant que les conditions hydriques restent favorables, ce qui souligne l'importance du maintien d'une cure adéquate pour assurer le développement optimal des propriétés mécaniques et de la durabilité du matériau [14, 18, 19].

En résumé, le durcissement de la pâte de ciment résulte d'une évolution progressive de sa microstructure, caractérisée par une réduction de la porosité capillaire, une densification du réseau de gel et une augmentation de la cohésion interne, éléments déterminants pour les performances mécaniques et la durabilité des matériaux cimentaires.

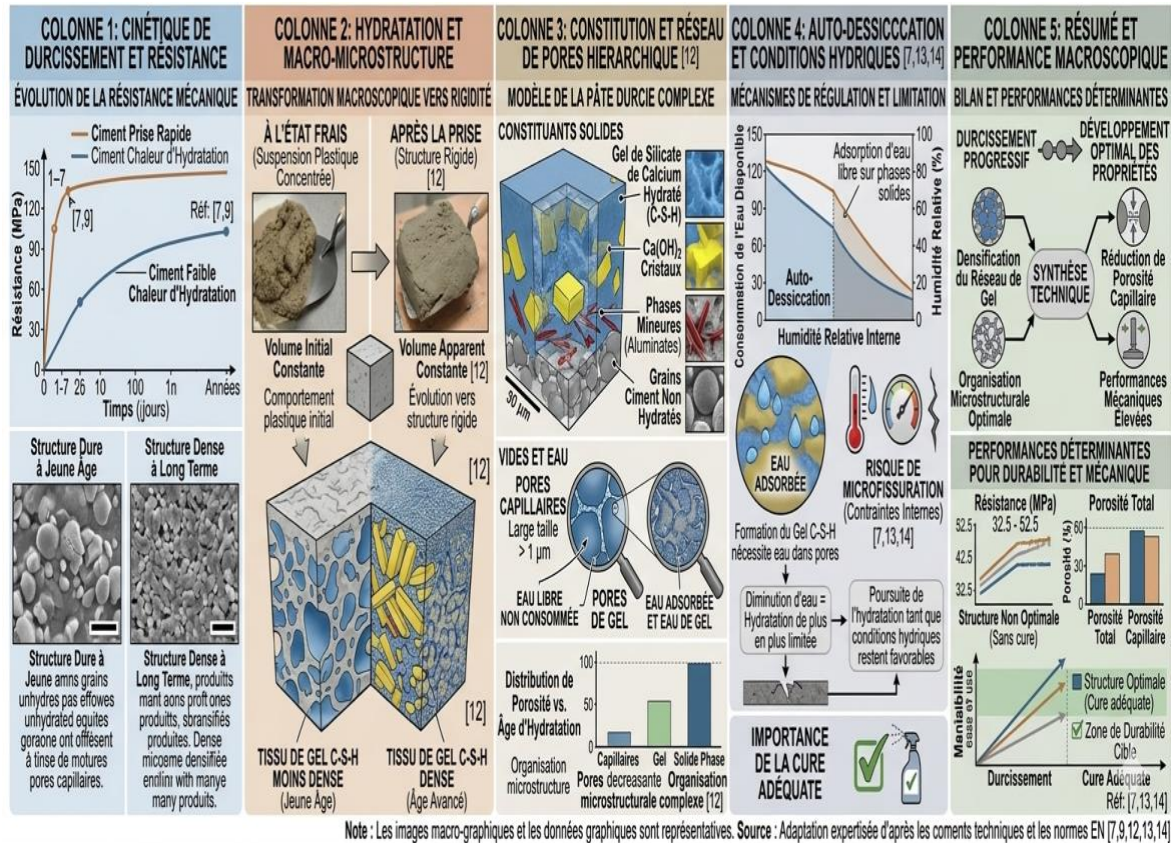


Figure I.13 : Évolution et durcissement scientifique de la pâte de ciment.

I.12. Les propriétés des bétons de caoutchouc

I.12.1. Effets de GCR sur les propriétés fraîches du béton

Pour caractériser la rhéologie du béton à l'état frais, on utilise généralement, en pratique, des essais d'ouvrabilité. Ces essais permettent d'évaluer la capacité du béton à s'écouler et à se mettre en place. Le paramètre le plus couramment mesuré est l'affaissement (essai au cône d'Abrams) ou l'étalement dans le cas des bétons autoplaçants.

Güneyisi et al. [20] ont étudié les propriétés des bétons incorporant des granulats de caoutchouc (G.C.), en combinaison avec de la fumée de silice (SF), dont la teneur varie de 0 % à 20 % de la masse du ciment. La Figure I.14 présente l'évolution de l'affaissement en fonction du taux de substitution en granulats de caoutchouc et du pourcentage de fumée de silice.

Les résultats montrent que l'ouvrabilité du béton diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en granulats de caoutchouc. Cette diminution est attribuée notamment à la nature hydrophobe et à la texture superficielle des particules de caoutchouc, qui perturbent la lubrification interne du mélange. Pour un taux de substitution élevé, de l'ordre de 50 % en granulats de caoutchouc, l'affaissement devient pratiquement nul, traduisant une perte importante de maniabilité du béton.

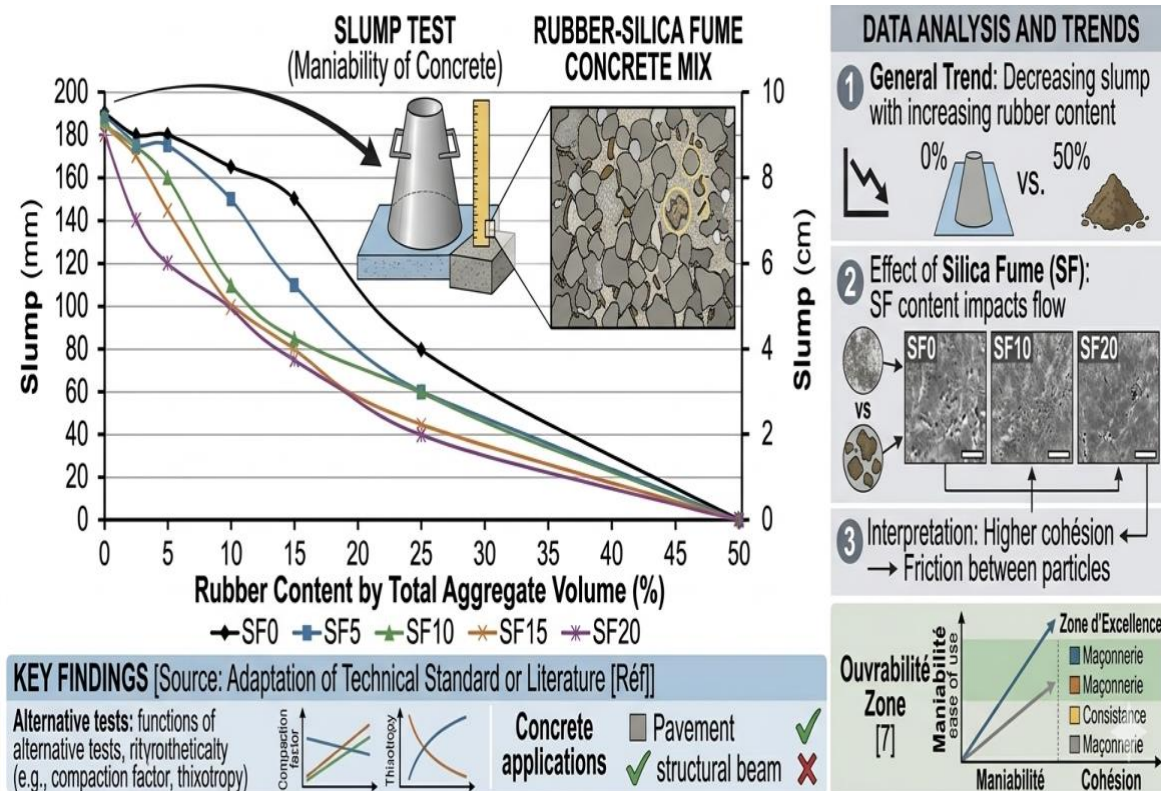


Figure I.14 : Influence des granulats de caoutchouc sur l'affaissement.

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Comme le montre la Figure I.15, Güneyisi et al. [20] ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence (la légende étant celle utilisée précédemment à la Figure I.15

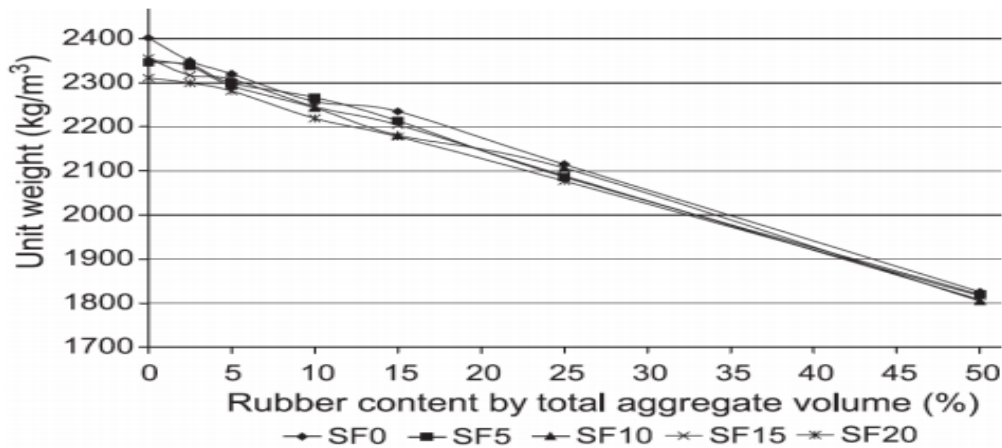


Figure I.15 : Variation de la masse volumique du béton incorporant les granulats de caoutchouc [20].

Concernant la teneur en air occlus, beaucoup de chercheurs [21, 22, 23, 24] ont noté qu'elle augmente avec le volume de caoutchouc. C'est ce qui est illustré par la Figure I.16 où le groupe A correspond à un béton pour lequel le sable a été remplacé par des G.C. fins, le gravier a été remplacé par de gros G.C. dans le cas du groupe B tandis qu'ils ont substitué le sable et le gravier par des G.C. fins et gros dans le cas du groupe C. Ces auteurs ont observé que la teneur en air occlus du groupe B est inférieure à celle du groupe A lorsque le volume de caoutchouc dépasse 30% du volume total des granulats. Cette diminution peut être expliquée par la compacité plus élevée pour le groupe B à même volume de G.C. Ces chercheurs pensent que la surface rugueuse des particules de caoutchouc est la principale cause de l'augmentation de la teneur en air occlus du béton incorporant des G.C.

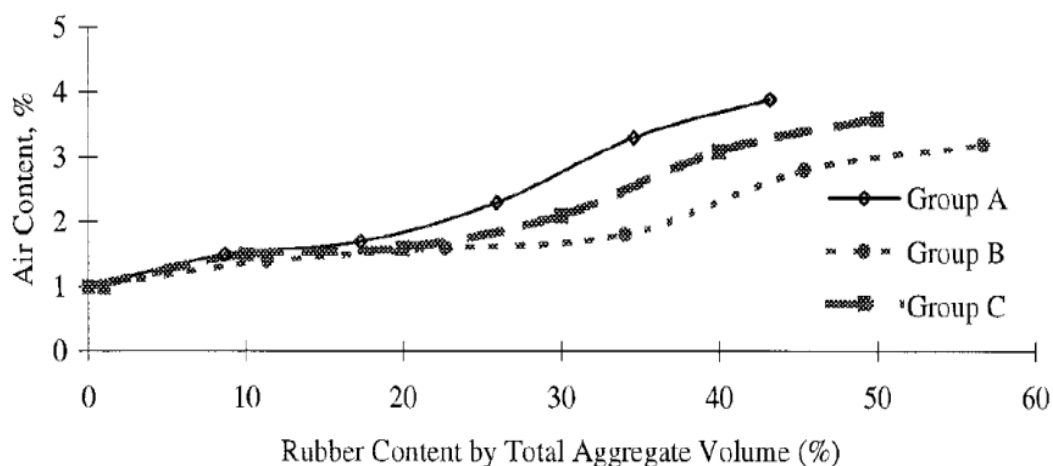


Figure I.16 : Influence du taux de caoutchouc sur le contenu d'air occlus, [21].

I.12.2. Propriétés à l'état durci du béton incorporant des G.C.

I.12.2.1. Résistance en compression

La résistance en compression constitue la propriété mécanique fondamentale des matériaux cimentaires durcis, servant de référence principale pour le dimensionnement et l'évaluation de la qualité du béton. Ce matériau, particulièrement performant en compression, voit sa résistance dépendre de nombreux paramètres, tels que la nature et le dosage des constituants, le type de granulats, la porosité, ainsi que les conditions de mise en œuvre et de cure.

Les études récentes portant sur les bétons incorporant des granulats de caoutchouc (G.C.) montrent de manière concordante que la substitution des granulats naturels par ces inclusions entraîne une diminution significative de la résistance en compression. Cette dégradation est généralement attribuée à la faible rigidité du caoutchouc, à sa faible adhérence avec la pâte cimentaire et à l'augmentation de la porosité du matériau.

Les travaux de Garros [22], réalisés sur des bétons autoplaçants (BAP), mettent en évidence l'influence déterminante du taux de substitution et de la granulométrie des G.C. sur la résistance mécanique. Les résultats, illustrés à la Figure. I.17 montrent une diminution pouvant atteindre 86 % pour les formulations fortement dosées en caoutchouc. Dans le cadre de l'application étudiée, une résistance minimale de 5 MPa a conduit à limiter le taux de substitution à environ 25 %, afin de maintenir des performances mécaniques acceptables.

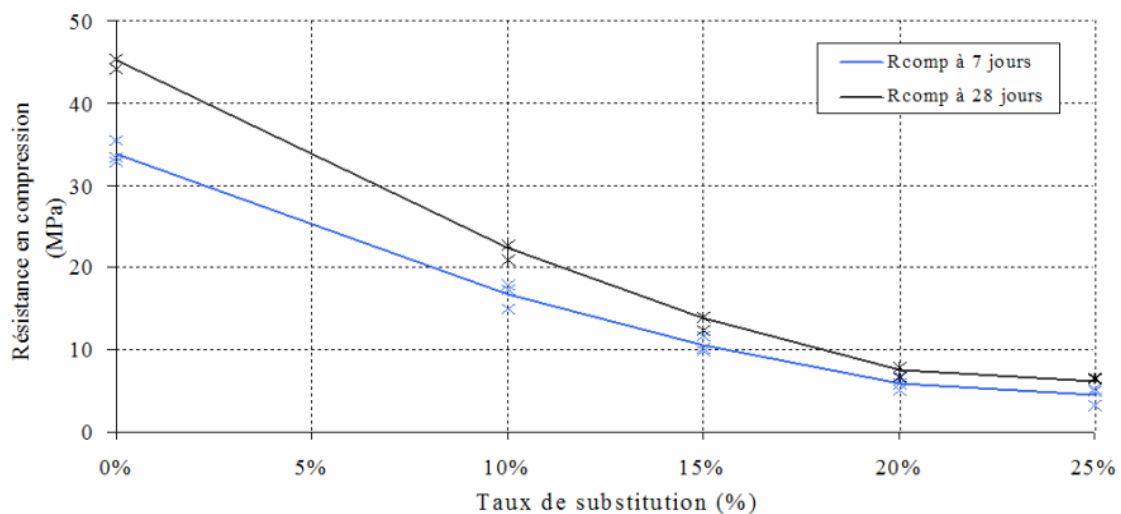


Figure I.17 : Influence du dosage en G.C. sur la résistance en compression à 7 et 28 jours (BAP dont le sable 0-4 mm est remplacé par des G.C. 0-4 mm), [22].

I.12.2.2. La résistance à la traction

Dans l'étude de Güneyisi et al. [20] rapportée dans les pages précédentes, les auteurs observent une tendance baissière de la résistance en traction similaire à celle de la résistance en compression. Cependant, à même taux d'adjonction de G.C., la chute de la résistance en traction s'avère moins importante par rapport à celle observée en compression. La variation de la résistance en traction (mesurée par le biais d'essais de fendage) en fonction du taux d'adjonction des G.C. est illustrée par la Figure I.18 (le reste de la légende étant celui utilisé précédemment).

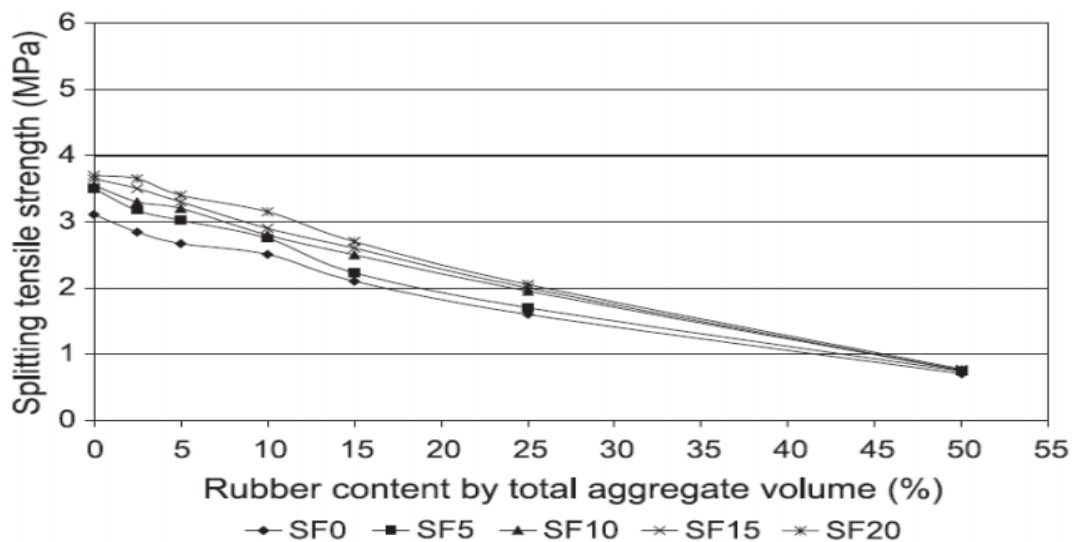


Figure I.18 : Influence du taux de substitution de G.C. de fumée de silice sur la résistance à la traction par fendage [20].

I.13. La notion d'effet d'échelle

I.13.1. Définition

L'effet d'échelle en mécanique des matériaux désigne la dépendance des propriétés mécaniques, en particulier à la rupture, vis-à-vis des dimensions caractéristiques de la structure étudiée. Il se manifeste par une variation des performances lorsque l'on passe d'une échelle géométrique à une autre [25,26].

Dans le cas du béton, matériau quasi-fragile, il est établi que la contrainte nominale à la rupture diminue avec l'augmentation de la taille de l'élément. Ce phénomène est principalement attribué aux mécanismes de fissuration progressive et à la dissipation d'énergie au sein de la zone de processus de rupture.

En théorie, selon certaines approches de dimensionnement, notamment celles adoptées par le code ACI [27], des structures géométriquement semblables devraient présenter une résistance identique. Toutefois, les observations expérimentales montrent des écarts significatifs, traduisant l'existence de l'effet d'échelle. Celui-ci est généralement distingué en effet d'échelle statistique (lié à la distribution des défauts) et effet d'échelle énergétique (lié aux mécanismes de rupture) [28].

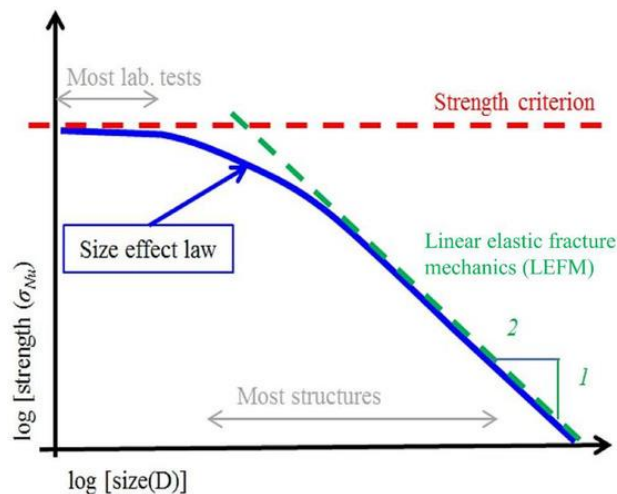


Figure I.19 : Illustration de l'effet d'échelle montrant la variation de la résistance en fonction de la taille (échelle logarithmique) [29].

I.13.2. Historique de l'effet d'échelle

Pendant longtemps, il a été admis que la résistance des structures en béton était indépendante de leurs dimensions. Cependant, plusieurs études expérimentales ont montré que le comportement mécanique du béton dépend fortement de la taille des éprouvettes.

Parmi les premières recherches, Gonnerman [30] a étudié l'influence de la taille des cylindres sur la résistance à la compression. Ses travaux ont montré que les éprouvettes de grandes dimensions présentent des résistances légèrement inférieures à celles des petites.

Ces résultats ont permis de mettre en évidence l'existence de l'effet d'échelle et ont ouvert la voie à de nombreuses recherches visant à comprendre le comportement des matériaux quasi-fragiles en fonction de leur taille.

I.13.3. Origine physique de l'effet d'échelle

L'origine de l'effet d'échelle est liée à la nature hétérogène du béton, constitué de pâte cimentaire, de granulats et de zones de transition. Cette hétérogénéité engendre des concentrations locales de contraintes ainsi que la présence de microfissures initiales.

Sous chargement, ces microfissures se développent progressivement pour former des fissures macroscopiques. La propagation de ces fissures s'accompagne d'une dissipation d'énergie, dont l'importance dépend de la taille de la structure. Ainsi, plus la structure est grande, plus l'énergie libérée lors de la rupture est importante, ce qui entraîne une diminution de la résistance nominale [25,26].

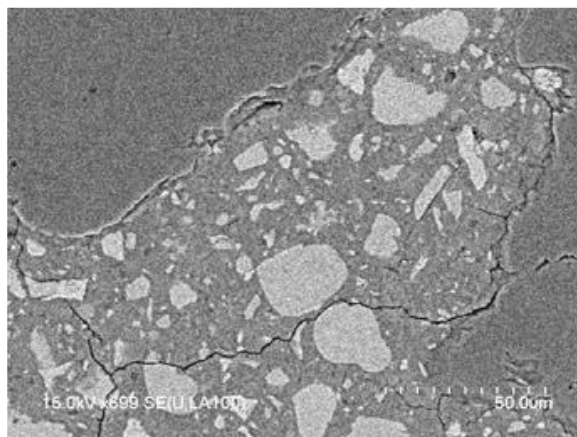


Figure I.20 : Microstructure du béton montrant la présence de microfissures [31].

I.13.4. Comportement des matériaux quasi-fragiles

Le béton appartient à la catégorie des matériaux quasi-fragiles, caractérisés par la présence d'une zone de processus de fracture appelée FPZ (Fracture Process Zone). Cette zone se situe à l'extrémité de la fissure principale et correspond à une région où se développent des microfissures avant la rupture complète.

Dans les petites éprouvettes, la taille de la FPZ est comparable à celle de l'échantillon, ce qui conduit à un comportement relativement ductile. En revanche, dans les structures de grandes dimensions, cette zone devient négligeable, ce qui entraîne un comportement plus

fragile. Cette transition explique en grande partie l'effet d'échelle observé expérimentalement [25].

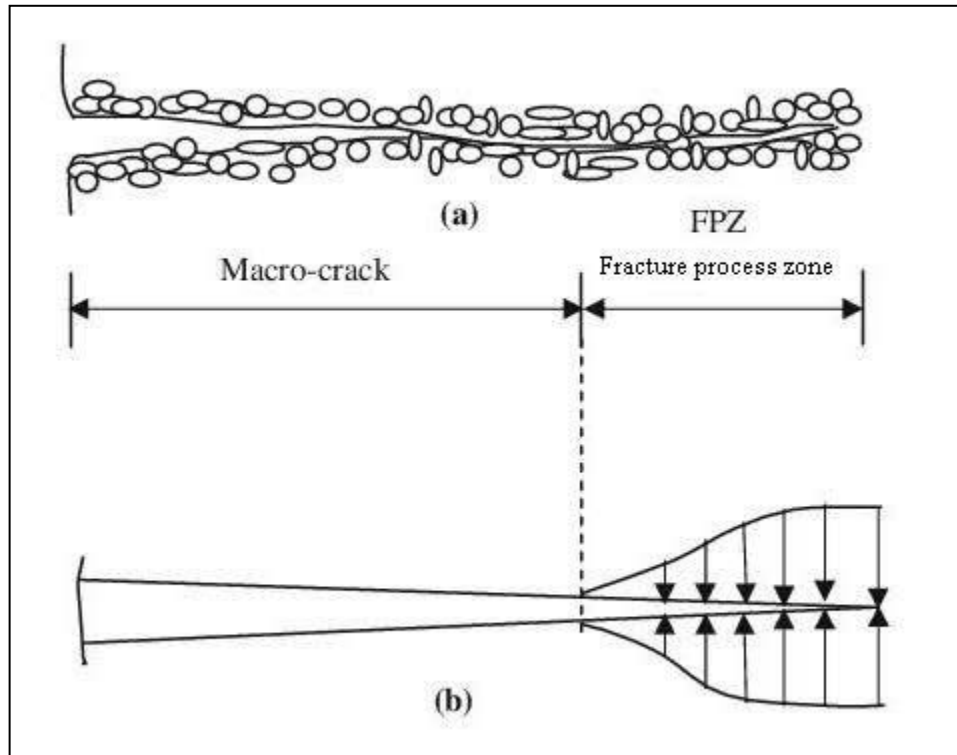


Figure I.21 : Zone de processus de rupture (FPZ) au voisinage d'une fissure dans le béton [32].

I.13.5. Types d'effet d'échelle

On distingue généralement deux types principaux d'effet d'échelle :

- Effet d'échelle statistique : lié à la probabilité de présence de défauts dans le matériau. Plus la taille de la structure augmente, plus la probabilité de présence d'un défaut critique est élevée.
- Effet d'échelle énergétique : lié aux mécanismes de dissipation d'énergie lors de la propagation des fissures.

Dans le cas du béton, l'effet d'échelle énergétique est généralement prédominant, en raison du rôle important joué par la fissuration [25,26].

I.13.6. Théorie de Bažant

La théorie de l'effet d'échelle proposée par Bažant [25] constitue une référence fondamentale pour l'étude du comportement des matériaux quasi-fragiles, notamment le béton. Contrairement aux matériaux parfaitement fragiles ou ductiles, le béton présente une zone de transition entre un comportement ductile à petite échelle et fragile à grande échelle.

Cette théorie considère une structure soumise à une contrainte nominale σ_n , dans laquelle existe une fissure initiale de longueur a_0 . Autour de cette fissure se développe une zone appelée FPZ (Fracture Process Zone), caractérisée par la présence de microfissures et de phénomènes d'endommagement progressif. Cette zone, de largeur h , joue un rôle essentiel dans la dissipation d'énergie et la redistribution des contraintes.

Lors du chargement, l'énergie de déformation élastique stockée dans le matériau, exprimée par $\sigma_n^2 / (2E)$, diminue progressivement dans la zone de fissuration (FPZ), jusqu'à atteindre la rupture. Contrairement aux matériaux fragiles classiques, où la fissure se propage brutalement, le béton présente une propagation stable des fissures accompagnée d'une dissipation d'énergie importante.

Bažant a démontré que la résistance nominale d'une structure dépend de sa dimension caractéristique W . Il a ainsi proposé une loi de l'effet d'échelle permettant de relier la contrainte nominale à la taille de la structure :

$$\sigma_N = \frac{B_0 \cdot f_t'}{\sqrt{1 + W/d_0}}$$

Où :

- σ_N : contrainte nominale à la rupture correspondant à la charge ultime,
- B_0 : constante adimensionnelle dépendant du matériau,
- f_t : résistance en traction du béton,
- W : dimension caractéristique de la structure (taille de l'éprouvette),

- d_0 : paramètre du matériau lié à la taille de la zone FPZ.

Cette relation met en évidence que, lorsque la taille W augmente, la contrainte nominale σ_n diminue. Ainsi, les structures de grandes dimensions présentent une résistance plus faible que celles de petite taille, ce qui traduit clairement l'effet d'échelle.

La théorie de Bazant permet donc de décrire le passage progressif d'un comportement ductile (pour les petites structures) vers un comportement fragile (pour les grandes structures). Elle constitue un outil essentiel pour l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus sur des éprouvettes de différentes dimensions et pour leur extrapolation aux structures réelles [25].

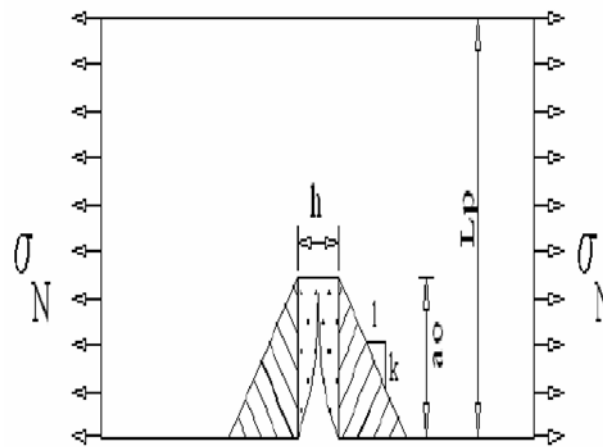


Figure I.22 : Redistribution des contraintes dans la fissure selon la théorie de Bazant (1984) [25].

I.13.7. Influence de la taille sur la résistance à la compression du béton

Les études expérimentales ont montré que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la taille des éprouvettes. Les travaux de Gonnerman [30] ont notamment mis en évidence que des cylindres de grandes dimensions présentent des résistances légèrement inférieures à celles des petits spécimens.

Cette diminution peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- une probabilité accrue de défauts internes,
- une redistribution plus complexe des contraintes,
- une propagation plus rapide des fissures dans les grandes structures [26].

I.13.8. Paramètres influençant l'effet d'échelle

L'effet d'échelle dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- la taille et la géométrie des éprouvettes,
- la nature et la distribution des granulats,
- le rapport eau/ciment,
- les conditions de chargement,
- la présence d'ajouts (comme les granulats de caoutchouc).

L'introduction de granulats de caoutchouc peut modifier la microstructure du béton et influencer les mécanismes de fissuration, ce qui affecte directement l'effet d'échelle observé [14].

I.13.9. Importance en génie civil

La prise en compte de l'effet d'échelle est essentielle pour assurer la sécurité et la fiabilité des structures. Les résultats obtenus sur des éprouvettes de laboratoire ne peuvent pas être directement extrapolés aux ouvrages réels sans correction.

Ainsi, l'effet d'échelle intervient dans :

- le dimensionnement des structures,
- l'analyse de la rupture,
- la modélisation du comportement du béton [25,26].



Figure I.23 : Exemple d'un ouvrage d'art en béton illustrant l'importance de l'effet d'échelle dans le génie civil [33].

I.14. Analyse des études précédentes

Selon Zdeněk P. Bažant (1984) [25], l'effet d'échelle constitue un facteur déterminant dans le comportement des matériaux quasi-fragiles tels que le béton, où la résistance diminue avec l'augmentation de la taille des structures. Cette observation a été confirmée par les travaux expérimentaux de H. F. Gonnerman [30], qui ont montré que les éprouvettes de grandes dimensions présentent des résistances plus faibles que celles de petites tailles. Par ailleurs, Zdeněk P. Bažant et Jaume Planas [34] ont développé une approche énergétique basée sur la zone de processus de rupture (FPZ), permettant d'expliquer ce phénomène de manière plus rigoureuse. De plus, Alberto Carpinteri [35] a introduit une interprétation basée sur le caractère fractal des surfaces de rupture, renforçant ainsi la compréhension théorique de l'effet d'échelle.

D'autre part, selon N. N. Eldin et A. B. Senouci [36], l'incorporation de granulats de caoutchouc dans le béton entraîne une diminution notable de la résistance mécanique, tout en améliorant la ductilité du matériau. Ces résultats ont été complétés par Guoliang Li et al.

(2004) [37], qui ont mis en évidence une meilleure capacité d'absorption d'énergie du béton caoutchouté. En outre, Tarun Gupta et ses collaborateurs (2014) [38] ont montré que l'ajout de caoutchouc augmente la porosité du béton, ce qui conduit à une augmentation de l'absorption d'eau et à une diminution des résistances mécaniques. Enfin, les travaux plus récents de B. S. Thomas et R. C. Gupta [39] confirment ces tendances, en soulignant l'influence du caoutchouc sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, sont présentés les matériaux constitutifs utilisés pour l'élaboration des bétons étudiés, ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée. L'objectif est de décrire de manière rigoureuse les caractéristiques des matériaux, les protocoles de formulation et les procédures d'essais mises en œuvre.

Les matériaux employés sont d'origine locale, ce qui permet de valoriser les ressources disponibles et d'assurer une meilleure représentativité des conditions réelles d'utilisation. Leurs propriétés physiques, mécaniques et granulométriques ont été déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, conformément aux normes en vigueur.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence de l'incorporation de granulats de caoutchouc recyclés sur les propriétés du béton. Ces granulats sont utilisés en substitution partielle du sable naturel, avec différents taux de remplacement, afin d'analyser leur impact sur le comportement à l'état frais et à l'état durci. Les granulats de caoutchouc présentent une granulométrie (0/5) comparable à celle du sable, ce qui facilite leur intégration dans le squelette granulaire sans perturber significativement l'équilibre granulométrique du mélange.

Par ailleurs, une attention particulière est accordée à l'étude de l'effet d'échelle sur le comportement en compression du béton. Cette analyse repose sur la comparaison des résistances mécaniques obtenues sur des éprouvettes de différentes dimensions et géométries, permettant ainsi d'évaluer l'influence de la taille sur les performances du matériau.

La formulation des mélanges de béton a été réalisée selon la méthode de Dreux-Gorisse, largement utilisée pour le dimensionnement des bétons, en tenant compte des caractéristiques des constituants et des performances recherchées.

Enfin, le programme expérimental a été défini de manière à garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats. Il comprend la préparation et la caractérisation des matériaux, la confection et la mise en place des éprouvettes, ainsi que la réalisation des essais mécaniques et physiques, dans des conditions de conservation contrôlées.

II.2. Matériaux utilisés

- Sable (0/5).
- Gravier 3/8.
- Gravier 8/15.
- Ciment.
- L'eau de gâchage.
- Granulats de caoutchouc (0/5).
- Superplastifiant (utilisé uniquement pour les bétons contenant des granulats de caoutchouc).

II.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment Portland au calcaire de type CEM II/B-L 42,5 N, commercialisé sous l'appellation Matine.

Ce ciment est conforme à la norme algérienne (NA 442) ainsi qu'à la norme européenne (EN 197-1). Les propriétés physico-chimiques et mécaniques ont été déterminées conformément aux normes en vigueur.

II.2.2. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage doit être propre et exempte d'impuretés susceptibles d'altérer les propriétés du béton. Dans cette étude, nous avons utilisé de l'eau potable provenant du réseau, considérée comme adaptée à la fabrication du béton.

II.2.3. Les granulats

Dans cette étude, nous avons utilisé quatre types granulaires : les granulats de caoutchouc, le sable et deux types de graviers (3/8) et (8/15).

II.2.3.1. Granulats de caoutchouc

Nous avons utilisé des granulats de caoutchouc obtenus à partir de déchets de pneus, sous forme de particules granulaires de dimension (0/5).



Figure II.1 : granulats de caoutchouc (0/5).

II.2.3.2. Le sable 0/5

Le sable est un granulat fin utilisé dans la composition du béton. Dans cette étude, nous avons utilisé un sable de classe (0/5), caractérisé par une granulométrie adaptée à la formulation du béton.



Figure II.2 : sable (0/5).

II.2.3.3. Le gravier 3/8 et 8/15

Le gravier utilisé dans cette étude est constitué de deux fractions granulaires : (3/8) et (8/15). Ces granulats sont employés dans la formulation du béton afin d'assurer une bonne résistance mécanique et une compacité adéquate.



Figure II.3 : gravier (3/8).



Figure II.4 : gravier (8/15).

II.2.4. Le superplastifiant

Un superplastifiant de type MEDAFLOW 30 a été utilisé dans cette étude. Il s'agit d'un adjuvant réducteur d'eau permettant d'améliorer l'ouvrabilité du béton sans augmenter la quantité d'eau de gâchage.

Son utilisation a été limitée aux bétons contenant des granulats de caoutchouc, afin de compenser la perte de maniabilité liée à l'incorporation de ces granulats. En revanche, le béton témoin a été réalisé sans ajout de superplastifiant.

Le superplastifiant a été introduit en pourcentage de la masse du ciment, avec des dosages progressifs comme suit :

- 0,20 % pour le béton contenant 10 % de caoutchouc
- 0,25 % pour le béton contenant 20 % de caoutchouc

- 0,30 % pour le béton contenant 30 % de caoutchouc

Cette variation permet d'assurer une ouvrabilité satisfaisante des mélanges malgré l'augmentation de la teneur en caoutchouc.



Figure II.5 : superplastifiant de type MEDAFLOW 30

II.3. Caractérisation des matières premières

II.3.1. L'analyse granulométrique (EN 933-1)

- ✓ L'essai est réalisé conformément à la norme EN 933-1.

II.3.1.1. But de l'essai

L'objectif de l'analyse granulométrique est de déterminer la répartition des tailles des grains ainsi que les pourcentages massiques des différentes fractions constituant l'échantillon.

II.3.1.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les grains constituant l'échantillon à l'aide d'une série de tamis emboîtés, dont les ouvertures sont disposées par ordre décroissant du haut vers le bas. Cette opération permet de déterminer la distribution granulométrique du matériau analysé.

II.3.1.3. Mode opératoire

- Préparer l'échantillon à analyser, en choisissant une masse représentative et adaptée aux tamis utilisés.
 - Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant des ouvertures.
 - Verser le matériau sec dans le tamis supérieur.
 - Fermer la colonne de tamis à l'aide d'un couvercle.
 - Procéder au tamisage par agitation mécanique ou manuelle.
 - Récupérer chaque tamis en commençant par celui de plus grande ouverture.
 - Peser la quantité de matériau retenue sur chaque tamis à l'aide d'une balance électronique.
- ✓ Les résultats des analyses granulométriques des différents granulats étudiés sont regroupés dans les tableaux suivants :
- Masse sèche de gravier (8/15) : $M = 3,2 \text{ kg} = 3200 \text{ g}$.

Tableau II.1 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravier (8/15).

Ouverture des Tamis (mm)	Masse des refus Mi (g)	Masse des refus Cumulé Mc (g)	Pourcentage des refus cumulé Pr	Pourcentage des tamisât cumulés Pt
16	0	0	0	100
12.5	538	538	16.81	83.19
10	1130	1668	52.12	47.88
8	1046	2714	84.81	15.19
Fond	485	3199	99.96	0.04

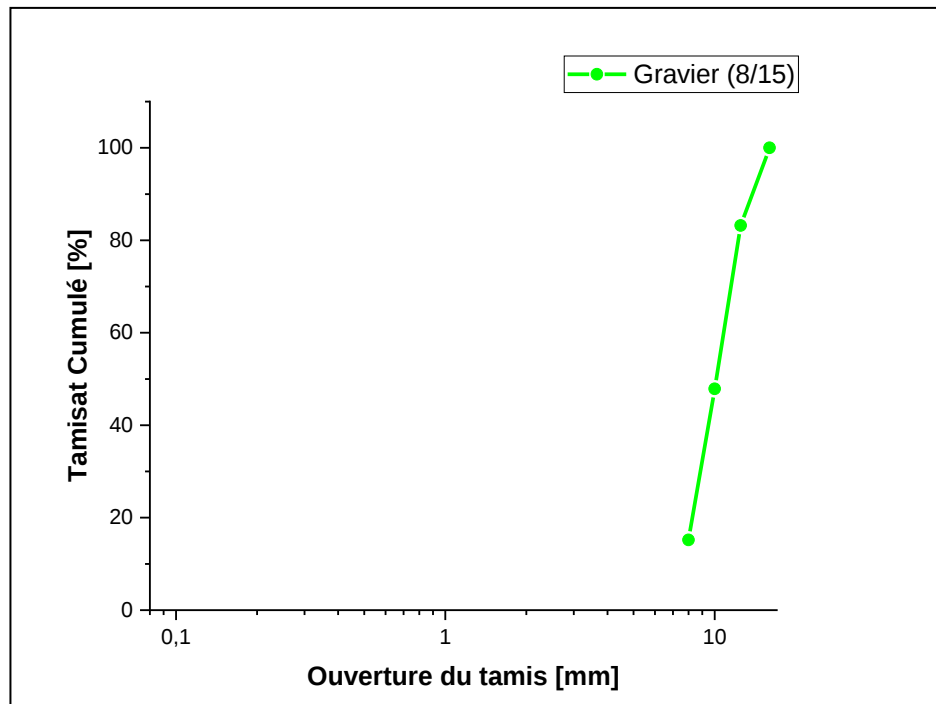


Figure II.6 : Courbe granulométrique de gravier 8/15.

- Masse sèche de gravier (3/8) : $M = 1,6 \text{ kg} = 1600 \text{ g}$.

Tableau II.2 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravier (3/8).

Ouverture des Tamis (mm)	Masse des refus M_i (g)	Masse des refus Cumulé M_c (g)	Pourcentage des refus cumulé P_r	Pourcentage des tamisât cumulés P_t
8	0	0	0	100
6.3	212	212	13.25	86.75
5	375	587	36.68	63.32
4	582	1169	73.06	26.94
3.15	373	1542	96.37	3.63
Fond	55	1597	99.81	0.19

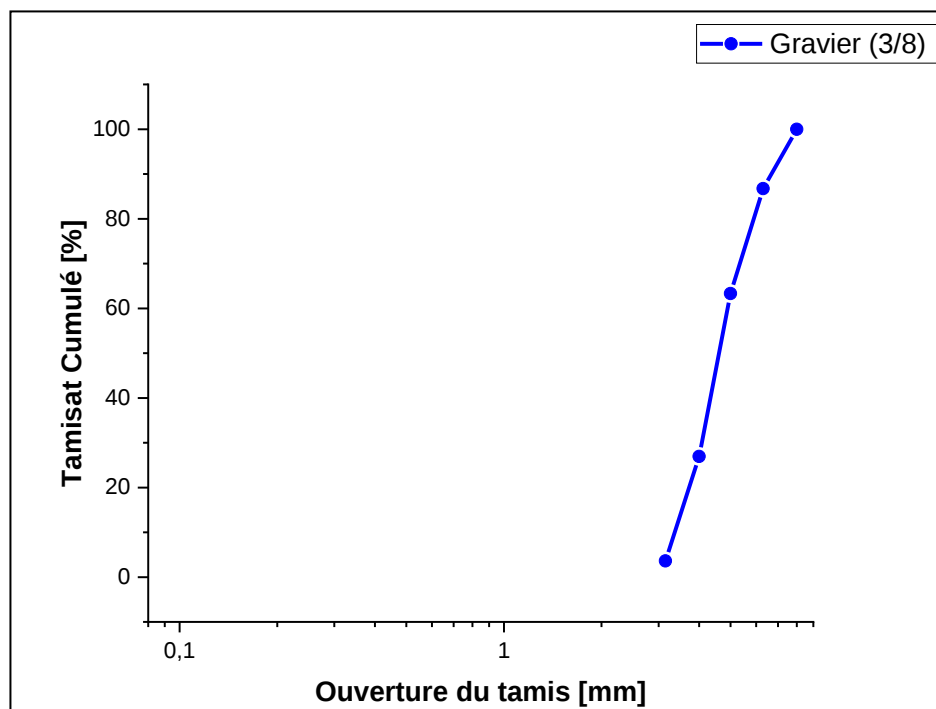


Figure II.7 : Courbe granulométrique de gravier 3/8.

- Masse sèche de sable (0/5) : $M = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$.

Tableau II.3 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable (0/5).

Ouverture des Tamis (mm)	Masse des refus M_i (g)	Masse des refus Cumulé M_c (g)	Pourcentage des refus cumulé P_r	Pourcentage des tamisât cumulés P_t
5	0	0	0	100
2.5	4	4	0.4	99.6
1.25	36	40	4	96
0.63	173	213	21.3	78.7
0.315	465	678	67.8	32.2
0.16	281	959	95.9	4.1
0.08	31	990	99	1
Fond	9	999	99.9	0.1

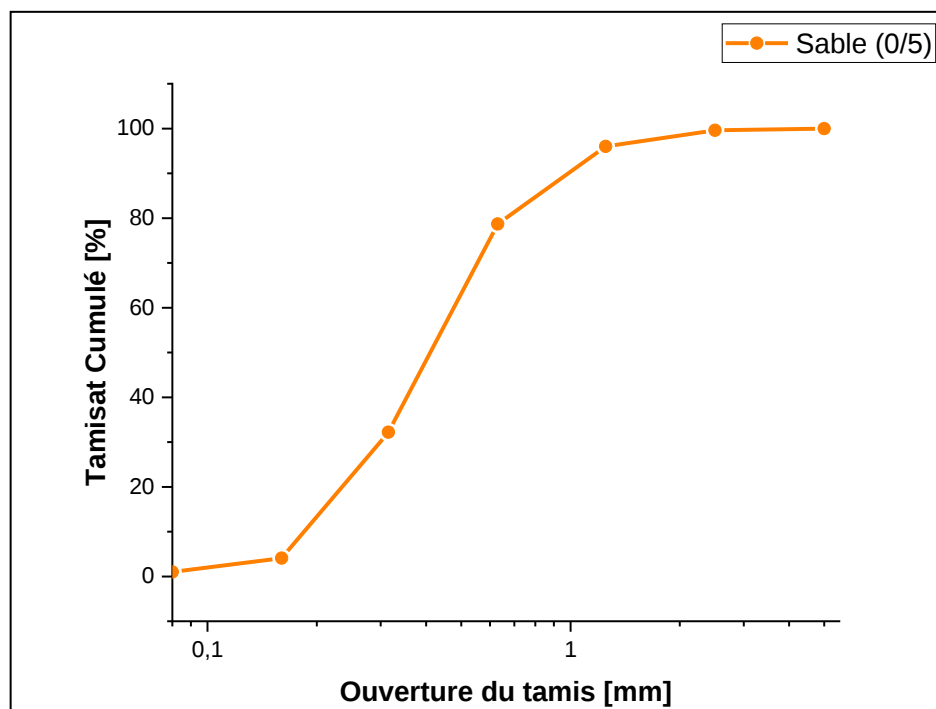


Figure II.8 : Courbe granulométrique de sable 0/5.

- Masse sèche de caoutchouc (0/5) : **M = 0,5 kg = 500 g.**

Tableau II.4 : Résultat de l'analyse granulométrique de caoutchouc (0/5).

Ouverture des Tamis (mm)	Masse des refus Mi (g)	Masse des refus Cumulé Mc (g)	Pourcentage des refus cumulé Pr	Pourcentage des tamisât cumulés Pt
5	0	0	0	100
2.5	210	210	42	58
1.25	180	390	78	22
0.63	77	467	93.4	6.6
0.315	28	495	99	1
0.16	2.81	497.81	99.56	0.44
0.08	0.69	498.5	99.7	0.3
Fond	1.49	499.99	99.99	0.01

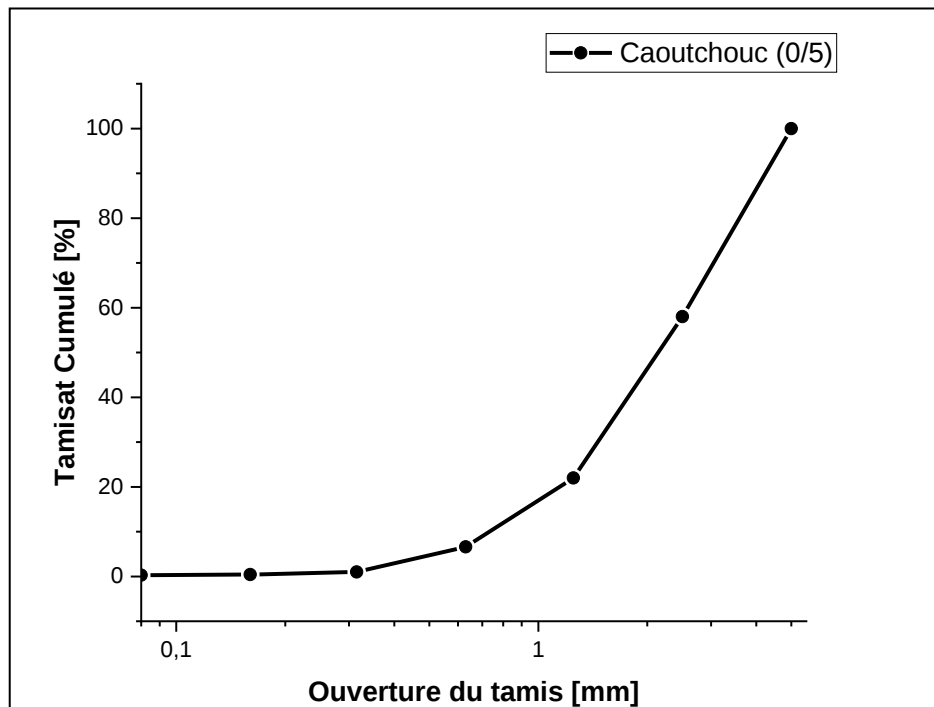


Figure II.9 : Courbe granulométrique de caoutchouc 0/5.

II.3.2. L'équivalent de sable (EN 933-8)

II.3.2.1. But de l'essai

L'essai d'équivalent de sable a pour objectif de déterminer la propreté d'un sable en évaluant la proportion relative de fines argileuses ou limoneuses présentes dans le matériau.

II.3.2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer, dans une éprouvette graduée, les éléments fins argileux en suspension des grains de sable sous l'action d'une solution floculante. Après agitation et décantation, on mesure la hauteur de sable et la hauteur totale de la suspension, ce qui permet de calculer l'équivalent de sable.

II.3.2.3. Mode opératoire

- Prélever trois échantillons de sable (0/5), chacun de masse égale à 120 g.
- Introduire chaque échantillon dans une éprouvette contenant la solution lavante.
- Agiter mécaniquement chaque éprouvette pendant une durée de 30 secondes.

- Placer les éprouvettes en position verticale et laisser reposer pendant 20 minutes afin de permettre la décantation des particules.
- Après décantation, relever les hauteurs correspondantes du sable et de la suspension pour chaque éprouvette.



Figure II.10 : Équivalent de sable.

II.3.2.4 Résultat

Tableau II.5 : Équivalent de sable.

	Ech 1	Ech 2	Ech 3
Mesure h_1	10	9.5	9.5
Mesure h_2	8.6	8.5	8.5
Mesure h'_2	9	8.6	8.6
ES (piston) = $100 \times h_2 / h_1$	ES1 = 86	ES2 = 89.47	ES3 = 89.47
ES _{Moyen} (piston) = 88.31 %			
ES (visuel) = $100 \times h'_2 / h_1$	ES1 = 90	ES2 = 90.52	ES3 = 90.52
ES _{Moyen} (visuel) = 90,34 %			

Le sable étudié est très propre : Très faible teneur en fines, excellente qualité, idéal pour un béton de structure.

II.3.2.5. Module de finesse

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable ; il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles.

[0,16-0,315-0,63-1,25-2,5 et 5 (mm)] sur 100 et calculé par la relation suivante :

- Sable

$M_f = 1.89 \Rightarrow$ Sable fin.

- caoutchouc

$M_f = 4.11 \Rightarrow$ Granulats grossier fin.

II.3.3. Masse volumique

La masse volumique d'un matériau correspond à la masse par unité de volume de ce matériau.

II.3.3.1. La masse volumique apparente (M_v app)

La masse volumique apparente est définie comme la masse des grains secs occupant un volume donné. Elle prend en compte à la fois le volume réel des particules solides ainsi que l'ensemble des vides présents, qu'il s'agisse des vides internes aux grains ou des vides intergranulaires.

➤ Équipements et matériaux

- Un récipient cylindrique de volume connu.
- Une balance de précision.
- Une règle métallique pour l'arasement.
- Des granulats (sable et gravier).

➤ Mode opératoire

- Peser le récipient vide et noter sa masse M_1 .

- Prendre les granulats avec les deux mains en formant un entonnoir.
- Remplir le récipient en laissant tomber les granulats d'une hauteur d'environ 10 cm, de manière régulière, ni trop rapide ni trop lente.
- Éviter toute vibration du récipient et araser la surface à l'aide de la règle métallique.
- Peser le récipient rempli et noter la masse obtenue M2.

➤ **Calculs et résultats**

Calcule de la masse volumique apparente :

$$Mv \text{ app} = \frac{M}{V} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

- **Mv app** : masse volumique apparente, en Kg/m³.
- **M** : masse de l'échantillon, en Kg.
- **V** : volume apparent de l'échantillon = volume du moule

A) Masse volumique apparente de sable (0/5)

$$M = M2 - M1 = 3.001 - 1.445 = 1.556 \text{ Kg}$$

$$V = 1 \text{ l} = 0,001 \text{ m}^3$$

$$Mv \text{ app} = \frac{1.556}{0.001} = 1556 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.11 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de sable 0/5.

B) Masse volumique apparente de gravier (3/8)

$$M = M2 - M1 = 6.741 - 2.733 = 4.008 \text{ Kg}$$

$$V = 3 \text{ l} = 0,003 \text{ m}^3$$

$$Mv \text{ app} = \frac{4.008}{0.003} = 1336 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.12 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de gravier 3/8.

C) Masse volumique apparente de gravier (8/15)

$$M = M2 - M1 = 10.651 - 3.838 = 6.813 \text{ Kg}$$

$$V = 5 \text{ l} = 0,005 \text{ m}^3$$

$$Mv \text{ app} = \frac{6.813}{0.005} = 1362 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.13 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de gravier 8/15.

D) Masse volumique apparente de caoutchouc (0/5)

$$M = M_2 - M_1 = 1.910 - 1.443 = 0.467 \text{ Kg}$$

$$V = 1 \text{ l} = 0,001 \text{ m}^3$$

$$Mv_{\text{app}} = \frac{0.467}{0.001} = 467 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.14 : Mode opératoire de la masse volumique apparente de caoutchouc 0/5.

II.3.3.2. La masse volumique absolue (Mv_{abs})

La masse volumique absolue correspond à la masse du volume occupé uniquement par la matière solide, sans tenir compte des vides internes aux grains ni des vides entre particules.

➤ **Équipements et matériaux**

- Une éprouvette graduée.
- Une balance analytique.
- Une étuve de séchage.
- De l'eau.

- Des granulats (sable et gravier).

➤ **Mode opératoire**

- Sécher l'échantillon jusqu'à obtenir une masse constante à une température comprise entre 105 et 110 °C.
- Prélever une masse d'environ 500 g et la noter M.
- Remplir l'éprouvette graduée avec un volume d'eau initial V1.
- Introduire l'échantillon dans l'éprouvette et relever le nouveau volume V2.

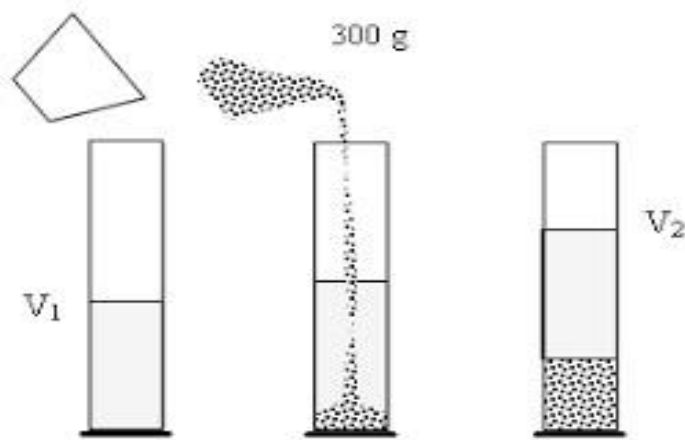


Figure II.15 : Représentation d'essai de la masse volumique absolue [40].

- **Expression des résultats**

A) Masse volumique absolue de sable 0/5

$$M = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ Kg.}$$

$$V = V_2 - V_1 = 890 - 700 = 190 \text{ ml} = 0,000190 \text{ m}^3$$

$$Mv \text{ abs} = \frac{0.5}{0.000190} = 2631.57 \text{ Kg/m}^3$$

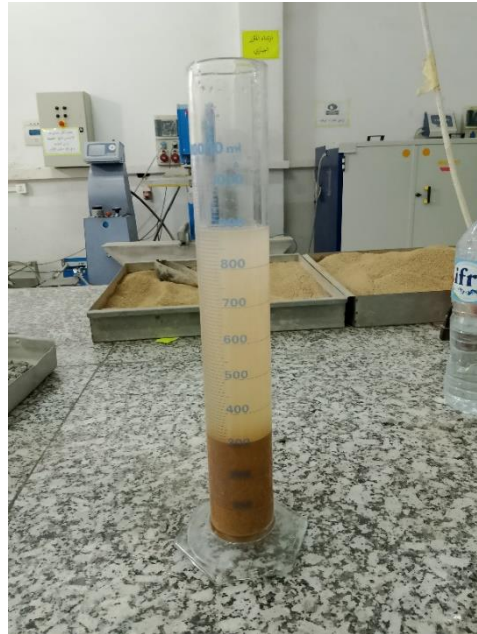


Figure II.16 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de sable 0/5.

B) Masse volumique absolue de gravier 3/8

$$M = 400 \text{ g} = 0,4 \text{ Kg.}$$

$$V = V_2 - V_1 = 850 - 700 = 150 \text{ ml} = 0,000150 \text{ m}^3$$

$$Mv \text{ abs} = \frac{0.4}{0.000150} = 2666.66 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.17 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de gravier 3/8.

C) Masse volumique absolue de gravier 8/15

$$M = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ Kg.}$$

$$V = V_2 - V_1 = 890 - 700 = 190 \text{ ml} = 0,000190 \text{ m}^3$$

$$M_v \text{ abs} = \frac{0.5}{0.000190} = 2631.57 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.18 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de gravier 8/15.

D) Masse volumique absolue de caoutchouc 0/5

$$M_v \text{ abs} = \frac{M_2 - M_0}{(M_1 - M_0) - (M_3 - M_2)} \times \rho_{\text{liquide}}$$

$$M_0 = 0.289 \text{ Kg} \quad \Rightarrow \text{masse du pycnomètre vide et sec.}$$

$$M_1 = 0.1287 \text{ Kg} \quad \Rightarrow \text{masse du pycnomètre + liquide (eau distillée) jusqu'au trait.}$$

$$M_2 = 0.525 \text{ Kg} \quad \Rightarrow \text{masse du pycnomètre + matériau sec.}$$

$$M_3 = 0.1280 \text{ Kg} \quad \Rightarrow \text{masse du pycnomètre + matériau + liquide (eau distillée) jusqu'au trait.}$$

$$\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow \text{masse volumique de liquide (eau distillée).}$$

$$M_{v \text{ abs}} = \frac{(0.525 - 0.289)}{(0.1287 - 0.289) - (0.1280 - 0.525)} \times 1000 = 997.04 \text{ Kg/m}^3$$



Figure II.19 : Mode opératoire de la masse volumique absolue de caoutchouc 0/5.

II.3.4. Porosité

La porosité des granulats est un paramètre essentiel dans la formulation du béton, car elle influence directement la compacité et les propriétés mécaniques du matériau.

La porosité P est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$P\% = (1 - M_{\text{app}} / M_{\text{abs}}) \times 100$$

Tableau II.6 : Résultat de porosités.

Matériaux	P%
Sable	40.87
Gravier 3/8	49.89
Gravier 8/15	48.24

Caoutchouc 0/5	53.16
----------------	-------

II.3.5. Compacité

La compacité représente la fraction du volume total effectivement occupée par la matière solide. Elle correspond au rapport entre le volume absolu des grains et le volume apparent du matériau. Elle est donnée par la relation suivante :

$$C\% = 100 - P$$

Tableau II.7 : Résultat de compacité.

Matériaux	C%
Sable	59.13
Gravier 3/8	50.11
Gravier 8/15	51.76
Caoutchouc 0/5	46.84

II.4. Formulation et préparation des bétons étudiés

La formulation du béton consiste à déterminer la combinaison optimale des différents constituants, à savoir les granulats, le ciment et l'eau, afin d'obtenir un béton répondant aux exigences requises en termes d'ouvrabilité, de résistance mécanique et de durabilité.

Dans le cadre de cette étude, la composition du béton a été déterminée en utilisant la méthode de formulation de Dreux-Gorisse.

II.4.1. Méthode de formulation de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse permet de déterminer les proportions optimales des constituants du béton, notamment l'eau (E), le ciment (C), le sable (S) ainsi que les granulats (g et G), en vue de la réalisation d'un mètre cube de béton conforme aux exigences du cahier des charges.

Détermination du rapport C/E

- Le rapport C/E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

- Résistance visée : $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f_{c28} = 1.15 \times 30 = 34.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_c = 55 \text{ MPa}$$

$$G = 0.45$$

$$\sigma'_{28} = G \cdot \sigma'_c \cdot \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

$$34.5 = 0.45 \times 55 \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

$$34.5 = 24.75 \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

$$\frac{34.5}{24.75} = \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

$$1.39 = \frac{C}{E} - 0.5$$

$$\frac{C}{E} = 1.39 + 0.5 \Rightarrow \frac{C}{E} = 1.894$$

a) Dosage en ciment

- Affaissement choisi = 12 cm (béton très plastique)

$$\frac{C}{E} = 1.894$$

$$C = 420 \text{ Kg/m}^3$$

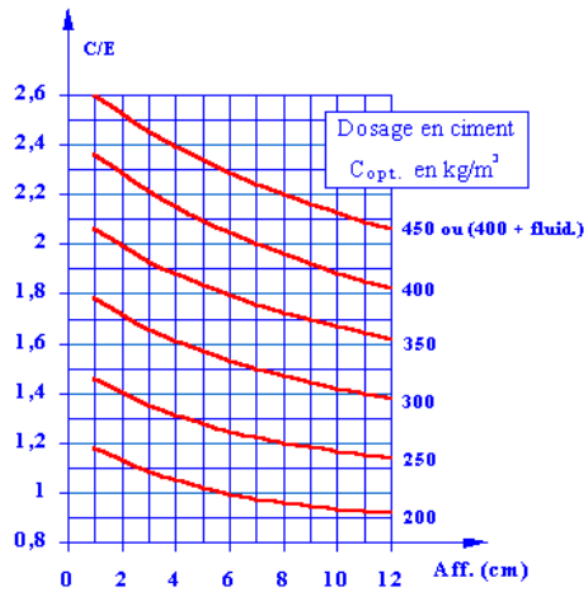


Figure II.20 : Abaque permettant la détermination de Copt.

b) Dosage en eau

$$\frac{C}{E} = 1.894 \Rightarrow E = \frac{420}{1.894} = 221,75 \approx 222 \text{ l}$$

- Correction du dosage en eau selon le diamètre maximal D du mélange granulaire

On a un **D max = 16 mm** qui correspond à une correction de **4%** en plus de la quantité d'eau calculée donc on obtient :

$$E = 222 + (0.04 \times 222) = 231 \text{ l}$$

- E après correction = 231 l

a) Tracé de la droite de référence de Dreux

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y.

Le point B de la courbe aura pour ordonnée 100% tamisât, et à l'abscisse la dimension D du plus gros granulat Dmax

Le point B : (16 ; 100)

$$X = D/2.$$

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + k$$

$$K=+2$$

$$X_A = 16/2 = 8$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{16} + 2 = 48$$

Le point A : (8 ; 48)

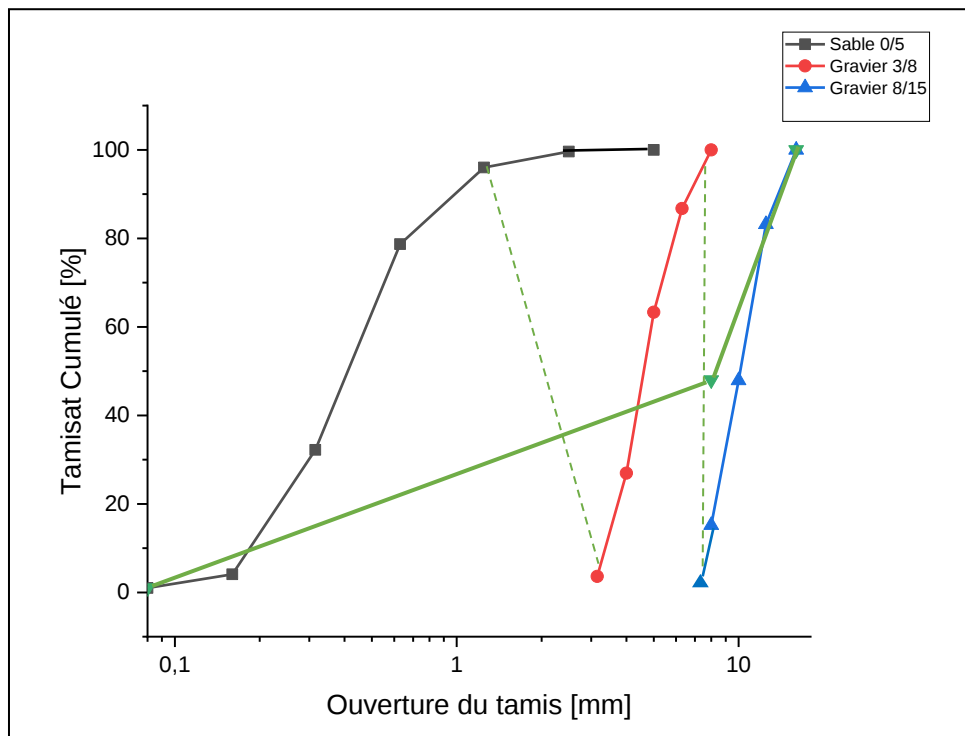


Figure II.21 : Les lignes de partage.

b) Pourcentage des constituant

- Le sable = 38 %
- Gravier 3/8 = 27%
- Gravier 8/15 = 35%

Détermination de la compacité du béton

$$V = 0.804$$

Détermination des masses de granulats

a) Volume absolu de ciment

$$V_c = C/3,1 = 420/3100 = 0.135 \text{ m}^3$$

b) Volume absolu de l'ensemble des granulats

$$\text{On a : } V_g = (1000 \times \bar{V}) - V_c$$

$$V_g = (1000 \times 0,804) - 135 = 0.669 \text{ m}^3$$

$$\text{- Sable : } V_s = 0.669 \times 0.38 = 0.254 \text{ m}^3$$

$$\text{- Gravies 3/8 : } V_{g1} = 0.669 \times 0.27 = 0.181 \text{ m}^3$$

$$\text{- Gravies 8/15 : } V_{g2} = 0.669 \times 0.35 = 0.234 \text{ m}^3$$

c) Dosage des granulats en kg dans 1 m³

$$\text{- Sable : } M_s = 0.254 \times 2631 = 668 \text{ Kg}$$

$$\text{- Gravier 3/8 : } M_{g1} = 0.181 \times 2666 = 483 \text{ Kg}$$

$$\text{- Gravier 8/15 : } M_{g2} = 0.234 \times 2631 = 616 \text{ Kg}$$

II.4.2. Composition des bétons

Afin d'étudier l'influence de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur les propriétés du béton, quatre formulations différentes ont été élaborées.

Un béton de référence sans ajout de caoutchouc (0 %). Trois bétons modifiés avec des taux de substitution de 10 %, 20 % et 30 % de granulats de caoutchouc.

La substitution a été réalisée par remplacement partiel du sable (en volume) par des granulats de caoutchouc, selon les pourcentages indiqués dans le tableau ci-dessous. Les proportions des différents constituants (ciment, eau, sable, gravier et caoutchouc) pour chaque formulation sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.8 : Tableau de composition des mélanges étudiés.

Béton	Eau (l)	Ciment (Kg)	Sable (Kg)	Gravier 3/8 (Kg)	Gravier 8/15 (Kg)	Caoutchouc (Kg)	Super- plastifiant (Kg)
B0 (0% caoutchouc)	231	420	668	483	616	/	/
B10 (10% caoutchouc)	231	420	601.2	483	616	20.06	0.84
B20 (20% caoutchouc)	231	420	534.4	483	616	40.12	1.05
B30 (30% caoutchouc)	231	420	467.6	483	616	60.19	1.26

II.4.3. Préparation des bétons étudiés

II.4.3.1. Types de moules utilisés

Nous avons utilisé des moules métalliques de différentes formes et dimensions pour la confection des éprouvettes, à savoir : des cubes de dimensions $(10 \times 10 \times 10)$ cm³, des cylindres de dimensions (10×20) cm et (16×32) cm, ainsi que des prismes de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³.



Figure II.22 : Préparation des moules.

II.4.3.2. Malaxage du béton

L'objectif du malaxage est de répartir dans l'espace de façon homogène, par l'action des outils de brassage, les éléments des constituants mis en présence dans le malaxeur.

La préparation du béton est faite par l'appareil appelé malaxeur. Les étapes de préparation du béton sont :

Nous versons une certaine quantité de gravier, après la quantité de sable, puis la quantité de ciment, nous allumons le malaxeur pour le mélange des particules, et enfin nous versons la quantité d'eau, après 3 min de malaxage, arrêtez le mélange et le test du cône d'Abrams a été effectué pour déterminer l'affaissement du béton préparé.

Dans notre cas nous avons préparé quatre mélanges du béton :

- 1) Béton ordinaire : gravier + sable + ciment + l'eau.
- 2) Béton de granulats de caoutchouc : gravier + granulats de caoutchouc + sable + ciment + l'eau + superplastifiant.



Figure II.23 : Les particules sèches.

II.5. Méthodes Expérimentales

II.5. 1. Mesure de la consistance

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué à l'aide de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui consiste à :

- Remplir le cône en trois couches.
- Tasser chaque couche avec une tige métallique de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche.
- Soulever le moule verticalement avec précaution.
- Mesurer l'affaissement en cm.



Figure II.24 : l'affaissement de cône d'Abrams d'un béton.

✓ **Préparations et conservation des spécimens étudiés**

La vibration constitue la méthode de compactage la plus utilisée. Le degré de compactage du béton frais dépend de la fréquence, de l'intensité ainsi que de la durée de la vibration.

On commence par un piquage de vibration afin de compacter le béton dans les éprouvettes.

Le béton est mis en place en trois couches successives. Chaque couche est compactée par 25 coups à l'aide d'une tige métallique, en respectant un rythme régulier. Cette opération permet d'assurer une bonne homogénéité et d'éliminer les vides dans l'échantillon.

En raison de l'incorporation des granulats de caoutchouc, caractérisés par une faible densité et une tendance à remonter en surface, le compactage du béton par piquage à l'aide d'une tige métallique a été privilégié. Cette méthode permet d'assurer une meilleure répartition des particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire, d'éviter leur ségrégation et de garantir une bonne homogénéité du mélange.

Les éprouvettes sont maintenues à l'air libre au laboratoire pendant 24 heures. Elles sont ensuite démoulées, puis marquées à la peinture. Après cela, elles sont conservées dans l'eau.



Figure II.25 : Les éprouvettes libres à l'air.

Les éprouvettes sont maintenues dans l'eau jusqu'au moment de la réalisation de l'essai de compression.

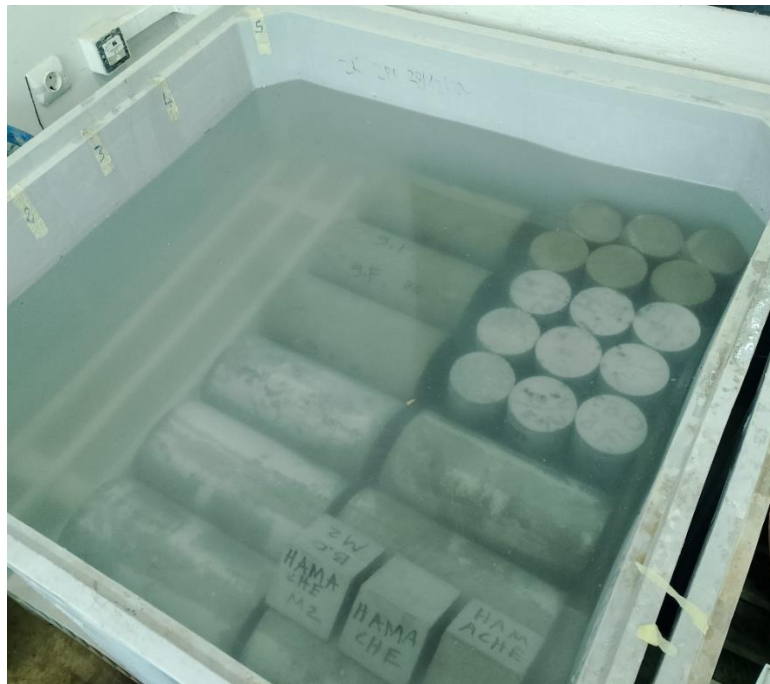


Figure II.26 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.

II.5.2. Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci

La masse volumique du béton à l'état durci est déterminée par une méthode simple basée sur la pesée des éprouvettes.

La masse volumique (M_v) est donnée par la relation suivante :

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

Avec :

M_v : masse volumique du béton (kg/m^3)

M : masse de l'éprouvette (kg)

V : volume de l'éprouvette (m^3)



Figure II.27 : Mesure de la masse volumique des bétons à l'état durci.

II.5.3. Essai de compression : [EN 12390-3]

La caractérisation du comportement du béton en compression est réalisée conformément à la norme EN 12390-3. Cet essai permet de déterminer la résistance à la compression, paramètre fondamental pour l'évaluation des performances mécaniques du béton et le dimensionnement des structures.

1. Éprouvettes et conditions de conservation

Les essais sont effectués sur différents types d'éprouvettes afin d'analyser l'influence de la géométrie sur la résistance mesurée :

- Cubes de dimensions $(10 \times 10 \times 10)$ cm³,
- Cylindres de dimensions (10×20) cm,
- Cylindres de dimensions (16×32) cm.

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau, à température contrôlée, jusqu'à l'âge de l'essai, afin d'assurer une hydratation optimale du ciment.

2. Procédure expérimentale

Les essais de compression sont réalisés à différents âges (3, 7 et 28 jours) afin de suivre l'évolution de la résistance mécanique dans le temps. Avant l'essai, les surfaces de chargement sont vérifiées et, si nécessaire, rectifiées pour garantir une répartition uniforme des contraintes.

Les éprouvettes sont ensuite placées dans une presse de compression, où une charge axiale croissante est appliquée de manière continue et contrôlée jusqu'à la rupture. La charge maximale atteinte est enregistrée.

3. Expression de la résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée à partir de la relation suivante :

$$f_c = \frac{F}{S}$$

F : charge de rupture (N).

S : section (m²).



Figure II.28 : La machine pour essai de compression

II.5.4. Résistance au fendage (essai brésilien) : [EN 12390-6]

L'essai de traction par fendage, appelé également essai brésilien, est réalisé conformément à la norme EN 12390-6. Il consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un effort de compression appliqué suivant deux génératrices diamétralement opposées, ce qui engendre un état de traction indirecte conduisant à la rupture de l'éprouvette.

L'essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (10 × 20) cm.

Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'âge d'essai, puis soumises à un essai d'écrasement à 3, 7 et 28 jours, afin de déterminer leur résistance à la traction.

L'éprouvette est placée horizontalement entre les plateaux de la machine d'essai.

La charge est appliquée progressivement jusqu'à la rupture.

La rupture se produit généralement suivant un plan vertical passant par le diamètre de l'éprouvette.

Cet essai permet de déterminer la résistance du béton à la traction indirecte.

La résistance à la traction par fendage peut être calculée par la relation suivante :

$$f_t = \frac{2F}{\pi \cdot L \cdot D}$$

F : charge de rupture (N)

L : portée (m)

D : diamètre (m)



Figure II.29 : l'essai de traction par fendage

II.5.5. Résistance à la traction par flexion : (Essai de flexion à 3 points) : [EN 12390-5]

L'essai de traction par flexion à trois points est réalisé conformément à la norme EN 12390-5. Il consiste à soumettre une éprouvette prismatique à une charge concentrée appliquée en son milieu, jusqu'à la rupture, afin d'évaluer la résistance du béton en traction indirecte.

1. Procédure expérimentale

- L'essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³.
- Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'âge de l'essai, puis testées à 3, 7 et 28 jours.
- La distance entre les appuis est fixée à 21 cm.
- La charge est appliquée de manière progressive au centre de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton, qui constitue un indicateur important de son comportement en service, notamment vis-à-vis de la fissuration.

La résistance à la traction par flexion est donnée par la relation suivante :

$$f_f = \frac{3F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Où :

Si tu veux, je peux aussi ajouter **un schéma s**

F : charge de rupture (N)

L : portée (m)

b, h : dimensions de la section



Figure II.30 : la machine de l'essai de traction par flexion.

II.5.6. Absorption par immersion totale

1. Objectif

Cet essai vise à déterminer la capacité d'absorption d'eau du béton durci par immersion totale, afin d'évaluer sa porosité accessible et d'apprécier sa durabilité.

2. Procédure expérimentale

- L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³.
- Les éprouvettes sont préalablement séchées jusqu'à masse constante, afin d'éliminer toute humidité résiduelle.

- Elles sont ensuite totalement immergées dans l'eau pendant une durée de 24 heures, à température ambiante.
- À l'issue de l'immersion, les éprouvettes sont retirées, essuyées en surface pour éliminer l'eau libre, puis pesées.

La variation de masse entre l'état sec et l'état saturé permet de déterminer l'absorption d'eau par immersion, indicateur direct de la porosité accessible du matériau.

L'absorption par immersion totale est généralement exprimée par la relation suivante :

$$At = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Mh : masse humide

Ms : masse sèche



Figure II.31 : séchage des éprouvettes

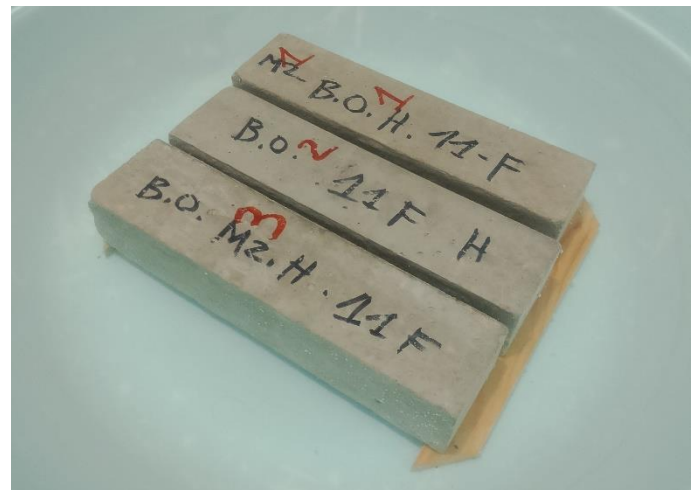


Figure II.32 : éprouvettes immergées dans l'eau

II.5.6. Absorption capillaire : [EN 13057]

➤ Objectif

Cet essai a pour objectif d'évaluer la capacité d'absorption d'eau par capillarité du béton, afin de caractériser la connectivité du réseau poreux et d'apprécier la durabilité du matériau.

➤ Procédure expérimentale

- L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³.
- Les éprouvettes sont préalablement séchées jusqu'à masse constante afin d'éliminer l'humidité résiduelle.
- Les faces latérales sont soigneusement étanchées à l'aide d'un film plastique adhésif, de manière à empêcher toute pénétration d'eau par les côtés.
- Les éprouvettes sont ensuite placées verticalement, avec une face de section (7×7) cm² en contact direct avec l'eau.
- Un niveau d'eau constant et faible est maintenu pour garantir une absorption exclusivement capillaire.
- Des pesées successives sont effectuées aux temps suivants : 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 2 h, 4 h, 6 h et 24 h.

L'évolution de la masse au cours du temps permet de suivre la cinétique d'absorption capillaire et d'en déduire les propriétés de transfert hydrique du matériau.

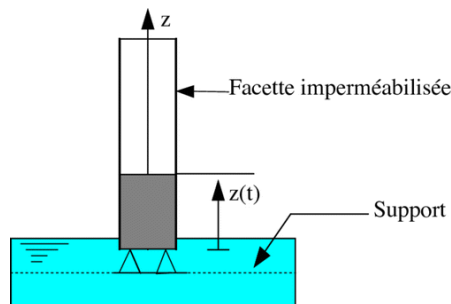


Figure II.33 : dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire [41,42].

L'absorption capillaire peut être exprimée par la relation suivante :

$$Ac = \frac{M_t - M_s}{S}$$

M_t : masse mesurée avec le temps

M_s : masse sèche

S : la surface (7×7) cm²



Figure II.34 : essai d'absorption capillaire

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des matériaux utilisés ainsi que les différentes méthodes expérimentales adoptées pour la formulation et la caractérisation des bétons étudiés.

Quatre formulations ont été élaborées, comprenant un béton de référence et trois bétons modifiés par incorporation de granulats de caoutchouc à différents taux de substitution volumique du sable.

Les éprouvettes ont été confectionnées selon un protocole précis, puis conservées dans des conditions contrôlées avant d'être soumises à une série d'essais mécaniques et physiques, notamment la résistance à la compression, la traction par fendage, la traction par flexion ainsi que les essais d'absorption d'eau.

L'ensemble de ces essais permettra d'évaluer l'influence de l'incorporation du caoutchouc et de l'effet d'échelle sur le comportement du béton, ce qui sera analysé et discuté dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Résultats et Discussions

III. 1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus sur des bétons incorporant des granulats de caoutchouc recyclés. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de ce type d'incorporation sur le comportement du matériau, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

À l'état frais, la caractérisation est réalisée à travers l'essai d'affaissement, permettant d'apprécier l'ouvrabilité des mélanges. À l'état durci, l'étude porte sur la masse volumique ainsi que sur les propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage et la résistance à la traction par flexion.

Par ailleurs, les propriétés physiques liées à la durabilité sont analysées à travers les essais d'absorption d'eau par immersion totale et par capillarité, afin de mieux comprendre l'impact des granulats de caoutchouc sur la structure poreuse et le comportement hydrique du béton.

Une attention particulière est accordée à l'effet d'échelle, en considérant des éprouvettes de différentes géométries et dimensions (cubes et cylindres). Cette approche permet d'examiner l'influence de la taille et de la forme des éprouvettes sur les performances mécaniques, en lien avec les principes des matériaux quasi-fragiles.

Enfin, une synthèse globale des résultats est proposée afin de mettre en évidence les interactions entre composition, microstructure et comportement mécanique, et de dégager les tendances générales liées à l'incorporation des granulats de caoutchouc et à l'effet d'échelle.

III.2. Résultats trouvés pour le béton

III.2.1. Propriétés à l'état frais

III.2.1.1. L'affaissement

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du béton, dans la pratique, on se base souvent sur des essais d'ouvrabilité dont le résultat est quantifié par l'affaissement.

Les valeurs obtenues pour les quatre compositions étudiées sont représentées dans le Tableau III.1 et illustrées par la Figure III.1

Tableau III.1 : Valeurs de l'affaissement pour les différentes compositions

N°	Béton	Affaissement (Cm)
1	B0GC	12
2	B10GC	15
3	B20GC	14
4	B30GC	15

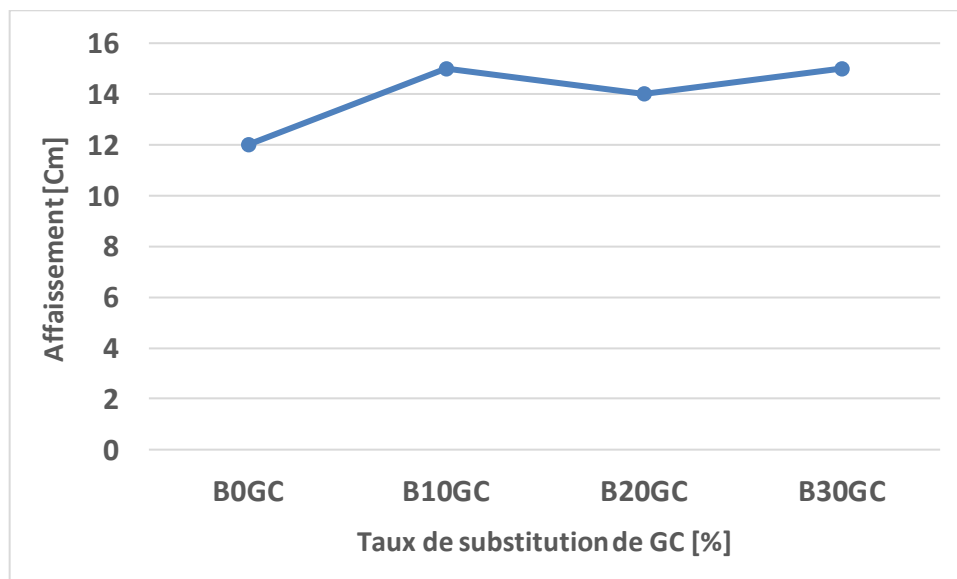


Figure III.1 : Influence des G.C sur l'affaissement

On remarque que l'affaissement du béton augmente globalement avec l'incorporation des granulats de caoutchouc. En effet, il passe de 12 cm pour le béton témoin (B0GC) à 15 cm pour B10GC, puis diminue légèrement à 14 cm pour B20GC, avant d'atteindre de nouveau 15 cm pour B30GC.

Cependant, cette augmentation ne peut pas être attribuée uniquement à l'ajout des granulats de caoutchouc. En effet, les bétons contenant du caoutchouc ont été formulés avec l'ajout d'un superplastifiant, contrairement au béton témoin. Ainsi, l'amélioration de l'affaissement observée est principalement due à l'effet du superplastifiant, qui augmente l'ouvrabilité du béton en réduisant les forces de frottement entre les particules, tout en maintenant le même rapport eau/ciment.

L'étude réalisée par Güneyisi [20], basée sur les propriétés mécaniques des bétons de caoutchouc dont 0% à 20% de la masse du ciment est remplacée par la masse de fumée de silice (SF), a montré que l'affaissement diminue avec l'augmentation du pourcentage de caoutchouc.

En ce qui concerne le béton auto-plaçant, Garros [22] a montré dans sa thèse que l'adjonction de G.C. entraîne une chute de l'étalement avec l'augmentation du taux d'incorporation. Donc l'incorporation de ces granulats conduit à des mélanges plus visqueux dans les bétons autoplaçants.

Par contre l'étude réalisée par Khaloo [43] a indiqué une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant de G.C. a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition.

Une autre étude réalisée par A. Cuong [44] a confirmé que l'ajout des granulats de caoutchouc est préjudiciable vis-à-vis de la maniabilité. Et pour corriger ce problème Cuong a augmenté le dosage en adjuvant (Superplastifiant) à chaque fois qu'il a augmenté le taux d'incorporation en G.C.

En revanche, les résultats obtenus dans cette étude sont en accord avec ceux de Khaloo [43], qui a indiqué que le béton incorporant des granulats de caoutchouc peut conserver une maniabilité acceptable, notamment en présence d'adjuvants.

À travers ces résultats, on peut conclure que :

- L'affaissement du béton dépend non seulement de la nature des granulats de caoutchouc, mais également de l'utilisation d'adjuvants tels que le superplastifiant.
- L'ajout du superplastifiant permet de compenser la perte d'ouvrabilité généralement observée dans les bétons contenant des granulats de caoutchouc.
- Dans les conditions de cette étude, le béton présente une bonne maniabilité, malgré l'incorporation du caoutchouc.

III.2.2. Propriétés à l'état durci

III.2.2.1. La masse volumique

Les résultats obtenus de la masse volumique à l'état durci des différentes compositions du béton sont représentés dans le Tableau III.2. L'évolution de la masse volumique en fonction du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc (G.C.) est illustrée par la Figure III.2 ci-dessous.

Tableau III.2 : Masses volumiques à l'état durci des différentes compositions

Composition du béton	Masse volumique à l'état Durcis (Kg/m³)
B0GC	2442.7
B10GC	2423.0
B20GC	2297.5
B30GC	2237.2

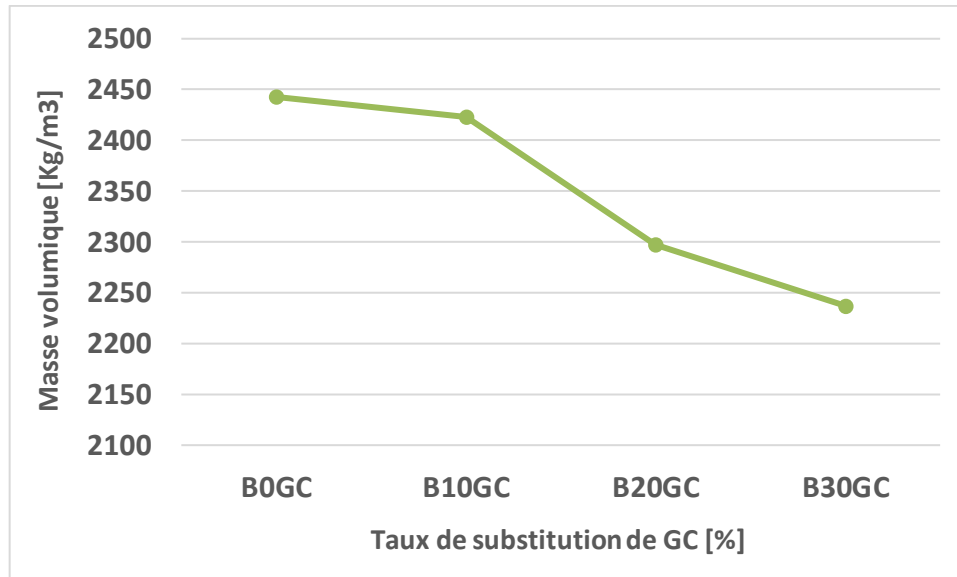


Figure III.2 : L'évolution de la masse volumique en fonction du taux d'incorporation des G.C

On remarque que la masse volumique diminue progressivement avec l'augmentation du taux de substitution en granulats de caoutchouc. En effet, elle passe de 2442.7 kg/m³ pour le béton témoin (B0GC) à 2423.0 kg/m³ pour B10GC, puis à 2297.5 kg/m³ pour B20GC, pour atteindre 2237.2 kg/m³ pour B30GC.

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire et cela est confirmé par Güneyisi [20] et Cuong [44].

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature. En effet, Güneyisi [20] a montré que la masse volumique du béton diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc. De même, Cuong [44] a confirmé cette tendance, en observant une réduction progressive de la densité du béton en fonction du pourcentage de G.C.

À partir des résultats obtenus, on constate une bonne concordance avec les travaux des chercheurs tels que Güneyisi [20] et Cuong [44]. La masse volumique du béton diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc.

Cette diminution est principalement due à la faible densité des granulats de caoutchouc, nettement inférieure à celle des granulats naturels, ce qui entraîne un allègement du béton.

III.2.3. Les propriétés mécaniques

III.2.3.1. Résistance en compression

Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes en béton de différentes formes et dimensions, à savoir des cubes ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) et des cylindres ($10 \times 20 \text{ cm}^2$ et $16 \times 32 \text{ cm}^2$), afin d'étudier l'influence de l'échelle sur le comportement mécanique.

Après démoulage à 24 heures, toutes les éprouvettes ont été conservées dans l'eau jusqu'aux âges d'essai de 3, 7 et 28 jours. Les essais ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 2000 kN, avec une vitesse de chargement constante de 0,5 MPa par seconde.

1) éprouvette cubique $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III.3 et illustrés par la Figure III.3.

Tableau III.3 : Valeurs de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du G.C. D'éprouvette cubique ($10 \times 10 \times 10$) cm

Béton	3 jours	7 jours	28 jours
B0GC	16.33	25.37	38.22
B10GC	15.50	25.17	32.91
B20GC	15.51	21.15	28.05
B30GC	14.72	20.15	24.88

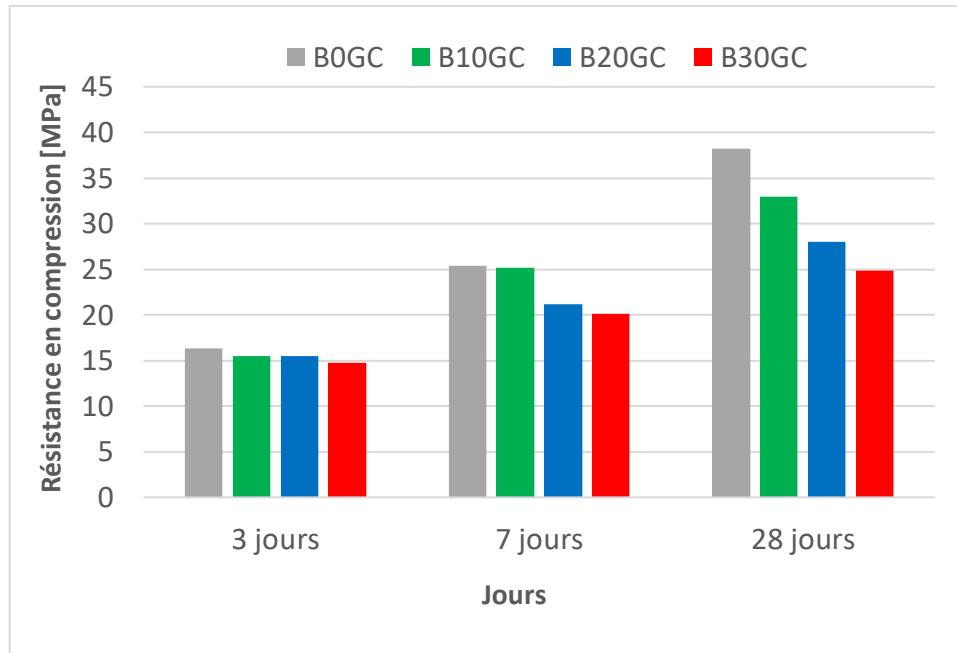


Figure III.3 : Influence des G.C. sur la résistance en compression d'éprouvette cubique (10×10×10) cm.

On remarque que la résistance en compression augmente avec l'âge du béton pour toutes les compositions, ce qui est conforme au phénomène d'hydratation du ciment. En effet, pour le béton témoin (B0GC), la résistance passe de 16,33 MPa à 3 jours à 25,37 MPa à 7 jours, pour atteindre 38,22 MPa à 28 jours.

Cependant, l'incorporation des granulats de caoutchouc entraîne une diminution progressive de la résistance en compression. À 28 jours, la résistance diminue de 38,22 MPa pour B0GC à 32,91 MPa pour B10GC, puis à 28,05 MPa pour B20GC, pour atteindre 24,88 MPa pour B30GC.

La même tendance est observée pour les âges de 3 et 7 jours, avec une réduction plus marquée lorsque le taux de substitution en granulats de caoutchouc augmente.

Cette diminution de la résistance peut être expliquée par :

- la faible rigidité des granulats de caoutchouc,
- la mauvaise adhérence entre le caoutchouc et la pâte cimentaire,
- ainsi que l'augmentation de la porosité du béton.

En effet, les granulats de caoutchouc, étant plus déformables que les granulats naturels, créent des zones de faiblesse dans la matrice du béton, ce qui réduit sa capacité à résister aux charges de compression.

2) éprouvette cylindrique 10×20 cm

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau III.4 et représentés graphiquement par la Figure III.4.

Tableau III.4 : Valeurs de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du G.C d'éprouvette cylindrique 10×20 cm

Béton	3 jours	7 jours	28 jours
B0GC	9.17	20.27	31.41
B10GC	11.45	17.53	27.90
B20GC	12.47	16.98	22.06
B30GC	11.23	16.10	22.13

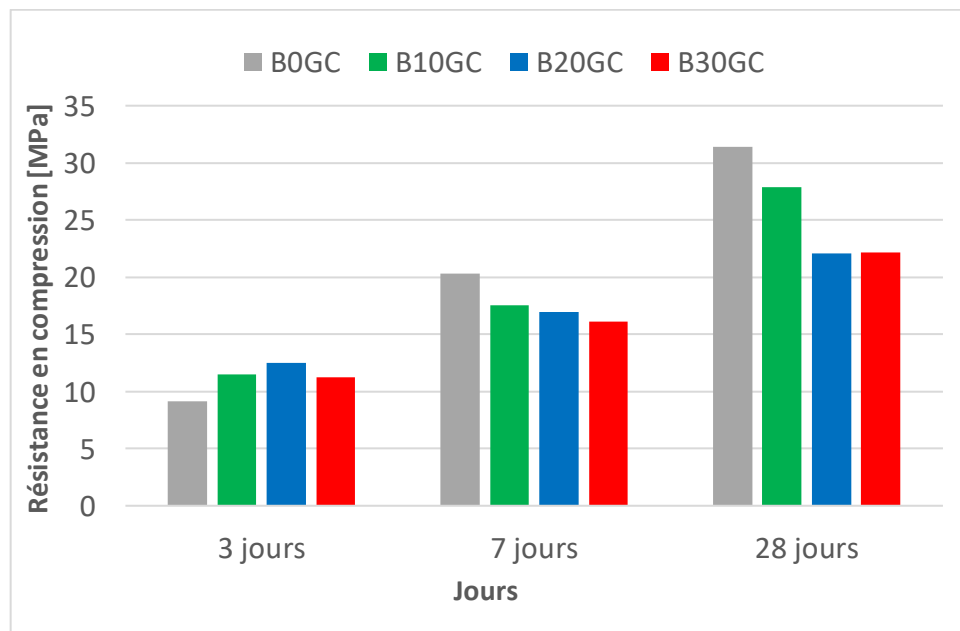


Figure III.4 : Influence des G.C. sur la résistance en compression d'éprouvette cylindrique 10×20 cm

On remarque que la résistance en compression augmente avec l'âge du béton pour toutes les compositions. Ainsi, pour le béton témoin (B0GC), elle passe de 9,17 MPa à 3 jours à 20,27 MPa à 7 jours, pour atteindre 31,41 MPa à 28 jours, ce qui est lié à la progression des réactions d'hydratation du ciment.

Cependant, l'incorporation des granulats de caoutchouc entraîne une diminution globale de la résistance en compression à 7 et 28 jours. À 28 jours, la résistance diminue de 31,41 MPa pour B0GC à 27,90 MPa pour B10GC, puis à 22,06 MPa pour B20GC et 22,13 MPa pour B30GC.

La même tendance est observée à 7 jours, où la résistance diminue progressivement avec l'augmentation du taux de substitution en granulats de caoutchouc.

En revanche, à 3 jours, on observe une légère augmentation de la résistance pour les bétons contenant du caoutchouc (11,45 MPa pour B10GC et 12,47 MPa pour B20GC) par rapport au béton témoin (9,17 MPa). Cette augmentation peut être attribuée à une meilleure compacité initiale ou à un effet de redistribution des contraintes à un jeune âge, mais cet effet disparaît à long terme.

La diminution de la résistance en compression avec l'augmentation du taux de caoutchouc s'explique principalement par :

- la faible rigidité des granulats de caoutchouc,
- la mauvaise adhérence avec la pâte cimentaire,
- ainsi que l'augmentation de la porosité du béton.

Ces facteurs entraînent une réduction de la capacité du béton à résister aux charges de compression, surtout à long terme.

3) éprouvette cylindrique 16×32 cm

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III.5 et illustrés par la Figure III.5.

Tableau III.5 : Valeurs de la résistance à la compression en fonction du pourcentage du G.C d'éprouvette cylindrique 16×32 cm

Béton	3 jours	7 jours	28 jours
B0GC	12.69	22.77	32.52
B10GC	14.14	19.67	23.26
B20GC	12.87	17.41	22.72
B30GC	17.60	23.38	28.89

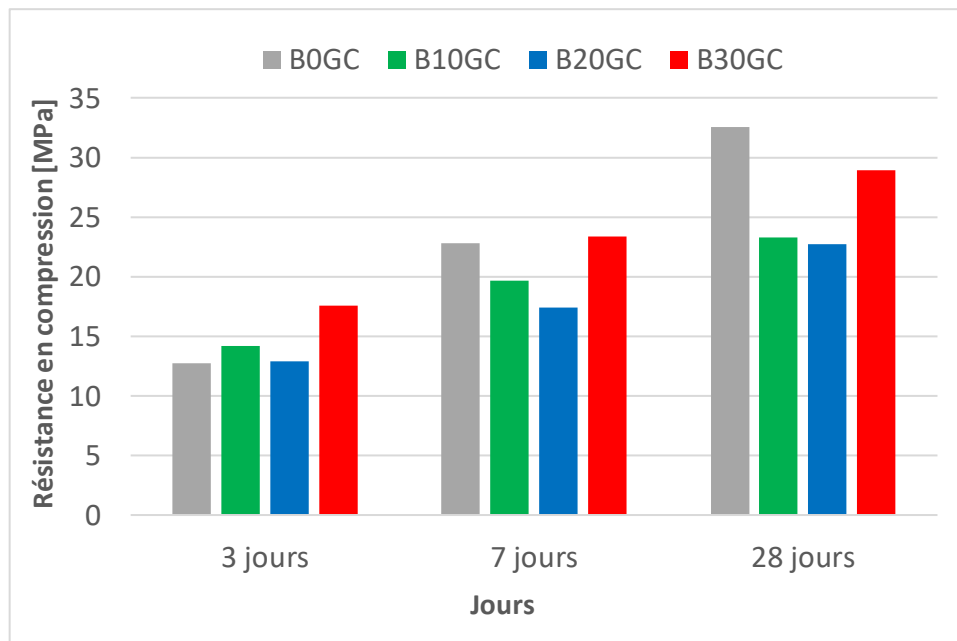


Figure III.5 : Influence des G.C. sur la résistance en compression d'éprouvette cylindrique 16×32 cm

On remarque que la résistance en compression augmente avec l'âge du béton pour toutes les compositions. Ainsi, pour le béton témoin (B0GC), elle passe de 12,69 MPa à 3 jours à 22,77 MPa à 7 jours, pour atteindre 32,52 MPa à 28 jours, ce qui est cohérent avec l'évolution de l'hydratation du ciment.

Cependant, l'effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc sur la résistance en compression n'est pas totalement monotone. À 28 jours, on observe une diminution globale de la résistance pour les bétons contenant du caoutchouc : elle passe de 32,52 MPa pour

B0GC à 23,26 MPa pour B10GC, puis 22,72 MPa pour B20GC, tandis que la composition B30GC atteint 28,89 MPa, montrant une valeur plus élevée que B10GC et B20GC.

La même tendance est observée à 7 jours, où B30GC (23,38 MPa) dépasse légèrement le béton témoin (22,77 MPa), contrairement aux autres compositions.

À 3 jours, on remarque également une augmentation de la résistance pour certaines compositions contenant du caoutchouc, notamment B30GC (17,60 MPa) par rapport au béton témoin (12,69 MPa).

Ces résultats peuvent être expliqués par :

- la faible rigidité des granulats de caoutchouc, qui tend à diminuer la résistance,
- la mauvaise adhérence entre le caoutchouc et la pâte cimentaire,

Mais aussi, dans certains cas, une meilleure compacité ou redistribution des contraintes, pouvant entraîner localement une amélioration des résistances, notamment pour des taux élevés comme B30GC.

Ainsi, bien que la tendance générale reste à la diminution de la résistance avec l'augmentation du taux de caoutchouc, certaines compositions peuvent présenter des comportements particuliers, liés à la structure interne du béton et à la répartition des granulats.

- De nombreux travaux confirment que l'incorporation de granulat en caoutchouc induit une chute importante de la résistance en compression. Eldin [36] et Garros [22] ont confirmé que la présence de granulats en caoutchouc est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression, une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en granulats de caoutchouc.

D'autres chercheurs, tels que Khatib et al.[21] On a confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de granulat en caoutchouc.

Il est clair que l'incorporation de G.C. induit une chute de la résistance en compression ; cette chute de résistance est principalement due à plusieurs facteurs dont :

- La rigidité beaucoup plus faible du caoutchouc par rapport à celle des granulats naturels.
- Un défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la matrice cimentaire : Garros [22] a montré que la zone de transition entre la matrice et le granulat en caoutchouc est peu compacte et présente une porosité importante.
- La porosité du béton incorporant des granulats en caoutchouc qui est réputée plus élevée que celle du béton de référence [22], [20].
- Selon Cuong [44], le volume d'air occlus augmente avec l'accroissement du taux d'incorporation en G.C. Cette tendance est en grande partie attribuée à la nature hydrophobe du caoutchouc qui fait qu'il emprisonne de l'air pendant la phase de malaxage. Ce supplément d'air occlus vient aussi aux dépens de la résistance en compression des composites à l'état durci.

III.2.3.2. Résistance à la traction par fendage

Les essais de traction par fendage ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (10×20 cm²), après démoulage à 24 heures et conservation dans l'eau jusqu'aux âges d'essai.

Les essais ont été effectués à l'aide d'une presse hydraulique, conformément au principe de l'essai brésilien.

La résistance en traction des différentes compositions est présentée dans le Tableau III.6. Son évolution en fonction du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc (G.C.) est illustrée par la Figure III.6.

Tableau III.6 : Valeurs de la résistance à la traction par fendage en fonction du pourcentage du G.C

Béton	3 jours	7 jours	28 jours
B0GC	7.10	10.44	13.88
B10GC	8.15	10.90	13.12
B20GC	6.62	9.89	10.85
B30GC	6.24	8.84	9.89

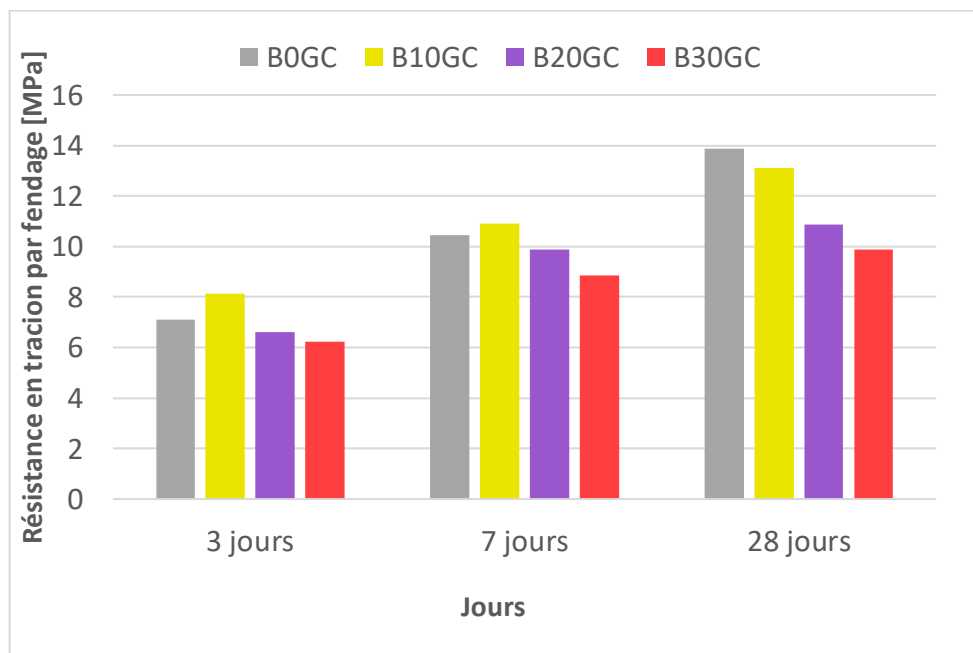


Figure III.6 : Influence des G.C. sur la résistance à la traction par fendage

On observe que la résistance à la traction par fendage évolue avec le temps de cure pour toutes les compositions, avec une augmentation notable entre 3, 7 et 28 jours. Cependant, l'effet de l'incorporation des granulats de caoutchouc (G.C) reste clairement défavorable.

À 28 jours, la résistance passe de 13,88 MPa pour le béton témoin (B0GC) à 13,12 MPa (B10GC), puis diminue davantage à 10,85 MPa (B20GC) et atteint 9,89 MPa (B30GC). Cela

correspond à une diminution progressive de la résistance à la traction avec l'augmentation du taux de substitution en G.C.

On remarque également que pour les faibles taux (10%), la diminution reste modérée, tandis qu'elle devient plus marquée à partir de 20% et 30%. Cette tendance est cohérente avec les observations à 3 et 7 jours, où les compositions riches en G.C présentent systématiquement des résistances plus faibles.

Beaucoup de chercheurs ont essayé de trouver la cause de cette chute, parmi eux, Kaloush et al. [45], qui ont montré que l'augmentation du contenu en G.C. dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage.

Güneyisi [20] a observé que pour le même taux d'adjonction de granulats de caoutchouc, la chute de la résistance en traction est moins importante par rapport à celle observée en compression.

Cuong [44] a montré que la résistance en traction diminue avec l'augmentation du taux de granulat de caoutchouc, un taux de substitution en G.C. de 40% entraîne une chute de 53% de résistance à la traction. Cette chute est de l'ordre de 27% pour un taux de 20%.

La diminution de la résistance à la traction par fendage est principalement liée à la faible adhérence entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire. Cette zone d'interface constitue une zone de faiblesse qui favorise l'initiation et la propagation des fissures.

Ainsi, on peut conclure que l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc entraîne une diminution de la résistance à la traction, mais cette diminution reste moins prononcée que celle observée en compression, ce qui confirme le comportement connu des bétons incorporant des G.C.

III.2.3.3. Résistance à la traction par flexion

Les essais de traction par flexion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7×7×28 cm³), soumises à un essai de flexion en trois points.

La résistance à la traction par flexion des différentes compositions est présentée dans le Tableau III.7. Son évolution en fonction du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc (G.C.) est illustrée par la Figure III.7.

Tableau III.7 : Valeurs de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage du G.C

Béton	3 jours	7 jours	28 jours
B0GC	4.67	5.46	7.44
B10GC	4.05	4.89	5.92
B20GC	3.59	4.31	5.31
B30GC	4.90	6.18	9.11

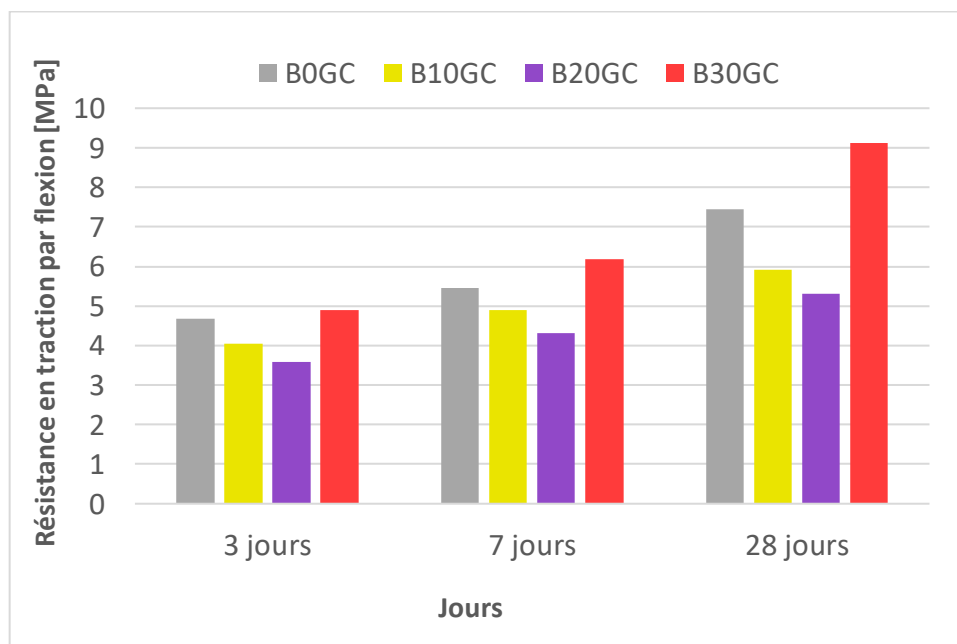


Figure III.7 : Influence des G.C. sur la résistance à la traction par flexion.

On observe que la résistance à la traction par flexion augmente avec l'âge du béton pour toutes les compositions, ce qui est conforme au processus d'hydratation du ciment.

Contrairement aux résultats obtenus en compression et en traction par fendage, l'évolution en fonction du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc (G.C.) présente ici un comportement différent. En effet, pour les compositions B10GC et B20GC, on note une

diminution de la résistance par rapport au béton témoin. À 28 jours, la résistance passe de 7,44 MPa (B0GC) à 5,92 MPa (B10GC) puis à 5,31 MPa (B20GC).

Cependant, pour la composition B30GC, on observe une augmentation significative de la résistance, atteignant 9,11 MPa à 28 jours, soit une valeur supérieure à celle du béton témoin. Cette amélioration est également visible à 3 et 7 jours.

Ce comportement peut s'expliquer par la nature élastique des granulats de caoutchouc. À des taux élevés, ces granulats peuvent jouer un rôle dans l'absorption et la redistribution des contraintes en flexion, ce qui retarde la propagation des fissures et améliore la ductilité du matériau. Ainsi, contrairement à la compression, la flexion bénéficie partiellement de la capacité de déformation des G.C.

Des résultats similaires ont été observés dans certaines études, où l'ajout de granulats de caoutchouc améliore le comportement post-fissuration et la ténacité du béton, bien que la résistance mécanique globale puisse diminuer dans certains cas.

La résistance à la traction par flexion diminue dans un premier temps avec l'augmentation du taux de G.C. (jusqu'à 20%), puis augmente pour un taux plus élevé (30%). Cette amélioration est attribuée au caractère déformable des granulats de caoutchouc, qui contribuent à limiter la propagation des fissures.

Ainsi, contrairement aux essais de compression et de traction par fendage, l'incorporation de granulats de caoutchouc peut avoir un effet bénéfique en flexion à des taux élevés, en améliorant la ductilité et le comportement du béton sous chargement.

III.2.4. Les propriétés physiques

III.2.4.1. Absorption par immersion totale

Les essais d'absorption par immersion totale ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28$ cm³), immergées dans l'eau pendant une durée de 24 heures.

Les valeurs d'absorption obtenues pour les différentes compositions sont présentées dans le Tableau III.8 et illustrées par la Figure III.8.

Tableau III.8 : Valeurs de l'Absorption par immersion totale en fonction du pourcentage du G.C

Béton	Absorption (%)
B0GC	1.67
B10GC	2.02
B20GC	2.98
B30GC	1.72

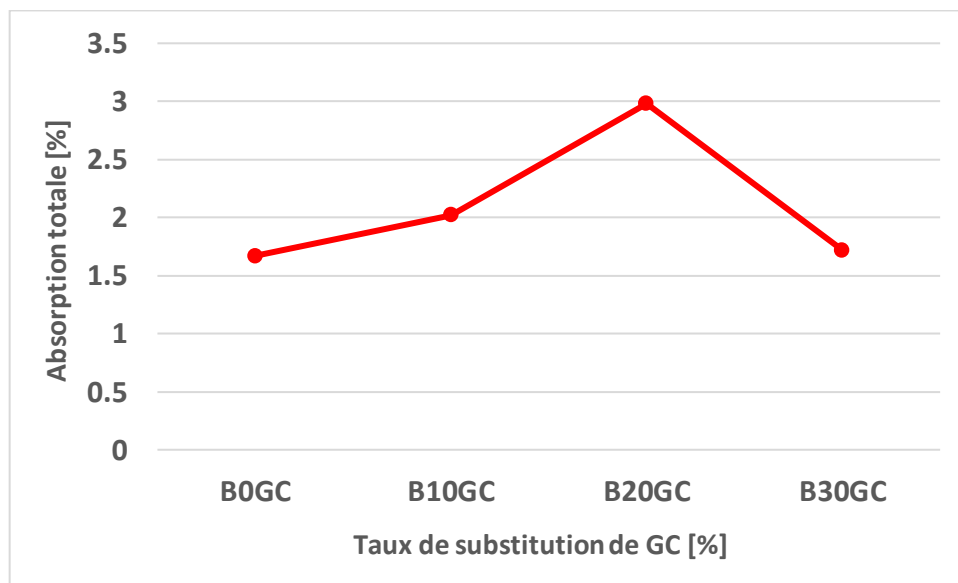


Figure III.8 : Influence des G.C. sur l’Absorption par immersion totale.

On observe que l’absorption par immersion totale varie en fonction du taux d’incorporation des granulats de caoutchouc (G.C).

Pour le béton témoin B0GC, la valeur de l’absorption est de 1,67%. L’introduction des G.C entraîne une augmentation progressive de l’absorption pour atteindre 2,02% pour B10GC, puis une valeur maximale de 2,98% pour B20GC.

Cette augmentation peut être expliquée par la modification de la microstructure du béton. En effet, l’incorporation des granulats de caoutchouc, caractérisés par une surface hydrophobe et une faible adhérence avec la pâte cimentaire, engendre une augmentation de

la porosité globale du matériau, notamment au niveau de la zone de transition interfaciale (ITZ), ce qui favorise la pénétration de l'eau.

Cependant, pour la composition B30GC, on observe une diminution de l'absorption à 1,72%, proche de celle du béton témoin. Cette baisse peut s'expliquer par une meilleure répartition des granulats de caoutchouc dans le mélange ou par un effet de remplissage partiel des vides, limitant ainsi la connectivité des pores.

Des résultats similaires ont été observés dans certaines études, où l'absorption augmente avec l'ajout de G.C. jusqu'à un certain seuil, avant de se stabiliser ou de diminuer légèrement selon la compacité du mélange.

L'absorption par immersion totale augmente avec le taux d'incorporation des granulats de caoutchouc jusqu'à 20%, puis diminue pour un taux de 30%.

Cette évolution est liée principalement à la modification de la porosité du béton et à la qualité de l'interface entre les granulats de caoutchouc et la matrice cimentaire. Ainsi, l'incorporation des G.C influence directement les propriétés de durabilité du béton, en particulier sa capacité d'absorption d'eau.

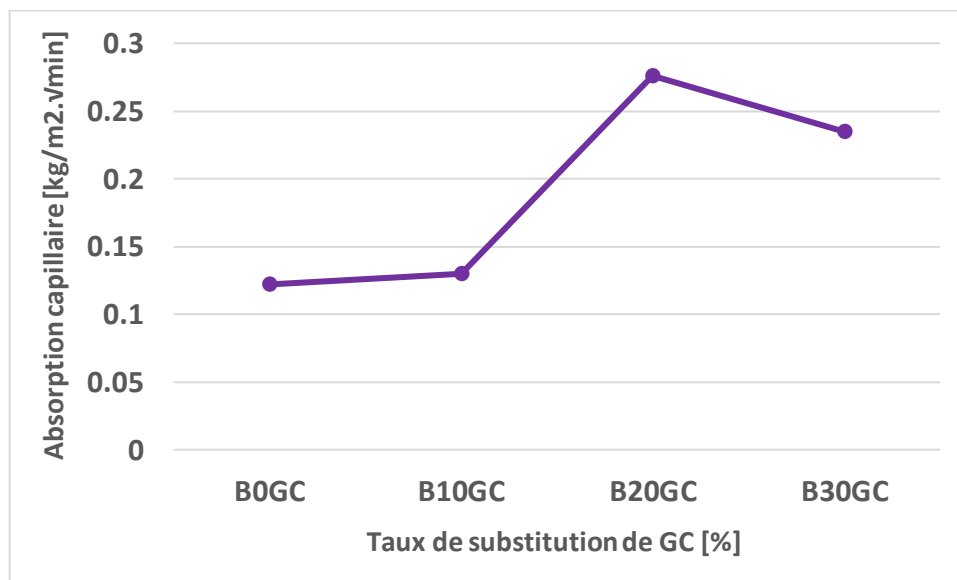
III.2.4.2. Absorption capillaire

Les essais d'absorption capillaire ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions ($7 \times 7 \times 28$ cm³), disposées verticalement de manière à ce que la surface de base (7×7 cm²) soit en contact avec l'eau.

Les valeurs d'absorption obtenues pour les différentes compositions sont présentées dans le Tableau III.9 et illustrées par la Figure III.9.

Tableau III.9 : Valeurs de l’Absorption capillaire en fonction du pourcentage du G.C

Béton	Coefficient d’absorption capillaire (kg/m ² .√min)
B0GC	0.122
B10GC	0.130
B20GC	0.276
B30GC	0.235

**Figure III.9 :** Influence des G.C. sur l’Absorption capillaire.

On observe que le coefficient d’absorption capillaire évolue en fonction du taux d’incorporation des granulats de caoutchouc (G.C).

Pour le béton témoin B0GC, le coefficient est de 0,122 kg/m².√min. L’ajout de G.C entraîne une légère augmentation pour atteindre 0,130 kg/m².√min pour B10GC, puis une augmentation significative jusqu’à 0,276 kg/m².√min pour B20GC.

Cette augmentation importante traduit une élévation de la capacité d'absorption par capillarité, ce qui peut être expliqué par l'augmentation de la porosité et surtout de la connectivité des pores au sein du béton. En effet, la présence des granulats de caoutchouc, caractérisés par une faible adhérence avec la pâte cimentaire, favorise la formation de microvides et de chemins préférentiels pour la pénétration de l'eau.

Cependant, pour la composition B30GC, on observe une légère diminution du coefficient à $0,235 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{min}}$, tout en restant supérieure à celle du béton témoin. Cette diminution peut être attribuée à une meilleure distribution des granulats de caoutchouc ou à une réduction partielle de la continuité des pores capillaires.

Ce comportement est en accord avec les résultats de l'absorption par immersion totale, confirmant que l'incorporation des G.C influence fortement la structure poreuse du béton.

Le coefficient d'absorption capillaire augmente avec le taux d'incorporation des granulats de caoutchouc jusqu'à 20%, puis diminue légèrement pour un taux de 30%.

Cette évolution est principalement liée à l'augmentation de la porosité et de la connectivité des pores induites par la présence des granulats de caoutchouc. Ainsi, l'ajout des G.C affecte négativement la durabilité du béton en augmentant sa perméabilité à l'eau.

Les résultats obtenus pour l'absorption capillaire sont cohérents avec ceux de l'absorption par immersion totale, montrant une augmentation globale de la capacité d'absorption avec l'incorporation des granulats de caoutchouc. Cette évolution est en corrélation avec la diminution des résistances mécaniques observée précédemment, notamment en compression et en traction. En effet, l'augmentation de la porosité et la faiblesse de la zone d'interface entre la pâte cimentaire et les granulats de caoutchouc favorisent la pénétration de l'eau et entraînent une dégradation des performances mécaniques du béton.

III.3. Effet d'échelle sur la résistance à la compression de béton avec caoutchouc

Les résultats de la résistance à la compression à 28 jours, obtenus pour les différentes compositions et pour les différents types d'éprouvettes (cube $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$, cylindre 10×20

cm et cylindre 16×32 cm), sont présentés dans le Tableau III.10 et illustrés par la Figure III.10.

Tableau III.10 : Valeurs de la résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage du G.C. d'éprouvettes (cubiques 10×10×10 cm ; cylindriques 10×20 cm ; cylindriques 16×32 cm).

Béton	Cube (10×10×10 cm)	Cylindre (10×20 cm)	Cylindre (16×32 cm)
B0GC	38.22	31.41	32.52
B10GC	32.91	27.90	23.26
B20GC	28.05	22.06	22.72
B30GC	24.88	22.13	28.89

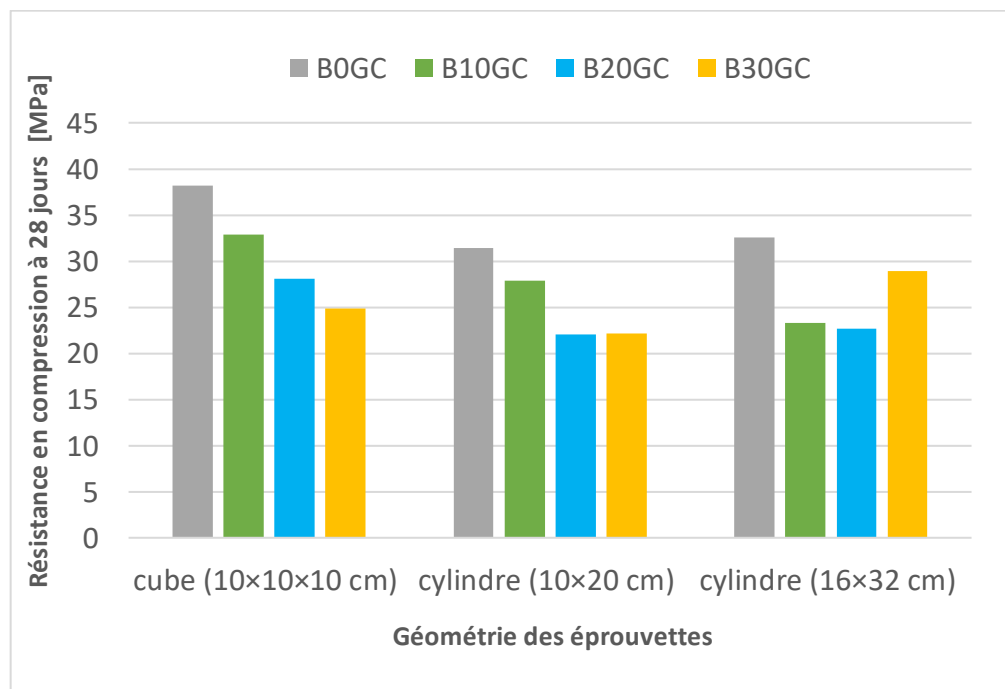


Figure III.10 : Influence des G.C. sur la résistance en compression à 28 jours d'éprouvettes (cubique 10×10×10 cm ; cylindrique 10×20 cm ; cylindrique 16×32 cm).

III.3.1. Analyse et interprétation

On observe que la résistance à la compression dépend non seulement du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc (G.C.), mais également du type et de la dimension des éprouvettes, ce qui met en évidence l'effet d'échelle.

Pour le béton témoin B0GC, la résistance est maximale pour les éprouvettes cubiques (38,22 MPa), tandis qu'elle diminue pour les éprouvettes cylindriques 10×20 cm (31,41 MPa) et reste légèrement inférieure pour les cylindres 16×32 cm (32,52 MPa). Cette différence est généralement attribuée à la distribution des contraintes et à l'effet de confinement plus important dans les éprouvettes cubiques.

Pour les bétons incorporant des G.C, la même tendance générale est observée pour les faibles taux d'incorporation (10% et 20%), où les éprouvettes cubiques présentent les résistances les plus élevées, suivies des cylindres 10×20 cm, puis des cylindres 16×32 cm.

Cependant, pour un taux élevé de substitution (30% de G.C.), on observe un comportement différent, où la résistance des cylindres 16×32 cm (28.89 MPa) devient supérieure à celle des cubes (24.88 MPa) et des cylindres 10×20 cm (22.13 MPa). Ce résultat peut être expliqué par une meilleure répartition des contraintes dans les éprouvettes de grande dimension, ainsi qu'une influence plus marquée du caractère déformable des granulats de caoutchouc, qui peuvent contribuer à dissiper les contraintes et retarder la rupture fragile.

De manière générale, l'effet d'échelle se traduit par une variation des résistances mesurées en fonction des dimensions et de la géométrie des éprouvettes. Les éprouvettes de petite taille (cubes) tendent à donner des résistances plus élevées, tandis que les éprouvettes plus élancées (cylindres) présentent des résistances plus faibles, en raison d'une distribution plus homogène des contraintes et d'une probabilité plus élevée de présence de défauts internes.

III.3.2. Discussion générale

L'effet d'échelle observé dans cette étude est en accord avec les principes généraux de la mécanique des matériaux quasi-fragiles, selon lesquels la résistance apparente diminue avec l'augmentation du volume sollicité, en raison de la présence accrue de défauts internes et d'hétérogénéités.

Ces résultats concordent avec les travaux de Bažant [25], qui a démontré que la résistance du béton diminue avec l'augmentation de la taille des éprouvettes, ainsi qu'avec les

observations expérimentales de Gonnerman [30], mettant en évidence des résistances plus élevées pour les petites éprouvettes comparativement aux grandes.

Par ailleurs, l'approche développée par Bažant et Planas [34], basée sur la zone de processus de rupture (FPZ), explique que la propagation des fissures devient plus significative dans les grandes structures, ce qui réduit la résistance globale. Cette interprétation est également soutenue par Carpinteri [35], qui a mis en évidence le caractère fractal des surfaces de rupture, confirmant ainsi l'influence de l'échelle sur le comportement mécanique du béton.

Dans le cas du béton incorporant des granulats de caoutchouc, cet effet d'échelle est amplifié par plusieurs facteurs :

- la faible rigidité des granulats de caoutchouc par rapport aux granulats naturels,
- la mauvaise adhérence entre les G.C et la pâte cimentaire,
- l'augmentation de la porosité interne et du volume d'air occlus.

Ces facteurs influencent la propagation des fissures et rendent le comportement du béton plus sensible à la dimension et à la géométrie des éprouvettes, en accentuant la variabilité des résultats mécaniques.

III.3.3. Conclusion

À partir des résultats obtenus, on constate que :

- la résistance à la compression diminue globalement avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc,
- les éprouvettes cubiques présentent généralement des résistances plus élevées que les éprouvettes cylindriques,
- L'effet d'échelle est clairement observé, avec une influence significative de la géométrie et de la taille des éprouvettes sur les résultats mesurés,

Pour des taux élevés de G.C., le comportement devient plus complexe, avec une amélioration relative des grandes éprouvettes, probablement liée à la capacité du caoutchouc à absorber et redistribuer les contraintes.

Ainsi, l'effet d'échelle doit impérativement être pris en compte dans l'interprétation des résultats expérimentaux ainsi que dans la comparaison avec les valeurs normatives, en particulier pour les bétons modifiés par l'incorporation de granulats de caoutchouc.

III.4. Conclusion du chapitre III

Ce chapitre a été consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus sur les bétons incorporant des granulats de caoutchouc, en tenant compte de l'effet d'échelle à travers différentes dimensions et formes d'éprouvettes.

Les résultats relatifs à l'état frais ont montré que l'incorporation des granulats de caoutchouc influence la maniabilité du béton. L'augmentation de l'affaissement observée pour certaines compositions est principalement attribuée à l'utilisation du superplastifiant, qui a permis d'améliorer l'ouvrabilité malgré la présence des G.C.

À l'état durci, les essais physiques ont révélé une diminution progressive de la masse volumique avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc, en raison de leur faible densité comparée à celle des granulats naturels.

Les essais mécaniques ont montré que :

- la résistance à la compression diminue significativement avec l'augmentation du taux de G.C,
- la résistance à la traction (par fendage et par flexion) suit la même tendance, mais avec une diminution moins prononcée,

Cette perte de résistance est principalement liée à la faible rigidité des granulats de caoutchouc, à la mauvaise adhérence avec la matrice cimentaire ainsi qu'à l'augmentation de la porosité.

Par ailleurs, les résultats des essais d'absorption (par immersion totale et par capillarité) ont mis en évidence une augmentation de la porosité du béton incorporant des G.C., ce qui confirme la dégradation de sa compacité et explique en partie la diminution des performances mécaniques.

L'étude de l'effet d'échelle a montré que la résistance du béton dépend non seulement de sa composition, mais aussi de la géométrie et des dimensions des éprouvettes. Les éprouvettes cubiques ont généralement présenté des résistances plus élevées que celles des éprouvettes

cylindriques, ce qui est cohérent avec les théories classiques de la mécanique des matériaux quasi-fragiles. Cet effet devient plus marqué avec l'incorporation des granulats de caoutchouc, en raison de l'hétérogénéité accrue du matériau.

En conclusion, l'incorporation des granulats de caoutchouc conduit à un béton plus léger et plus déformable, mais au détriment de ses performances mécaniques. L'effet d'échelle joue un rôle important dans l'interprétation des résultats et doit être pris en compte pour une meilleure évaluation du comportement réel de ce type de béton.

Conclusion générale

Au terme de cette étude expérimentale consacrée à l'analyse de l'effet d'échelle sur le comportement en compression du béton incorporant des granulats de caoutchouc recyclés, plusieurs conclusions importantes peuvent être dégagées.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation des granulats de caoutchouc influence significativement les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Sur le plan rhéologique, certaines formulations ont présenté une amélioration de la maniabilité, notamment en présence de superplastifiant, traduite par une augmentation de l'affaissement.

Les essais physiques ont révélé une diminution progressive de la masse volumique avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats de caoutchouc. Cette réduction s'explique principalement par la faible densité du caoutchouc comparativement aux granulats naturels ainsi que par l'augmentation du volume d'air occlus dans la matrice cimentaire.

Les performances mécaniques ont globalement diminué avec l'augmentation du pourcentage de granulats de caoutchouc. La résistance à la compression s'est révélée la plus affectée, suivie par les résistances à la traction par fendage et à la traction par flexion. Cette diminution est principalement attribuée :

- à la faible rigidité des granulats de caoutchouc ;
- à la faible qualité d'adhérence entre les granulats de caoutchouc et la pâte cimentaire ;
- ainsi qu'à l'augmentation de la porosité interne du béton.

Les essais d'absorption par immersion totale et par capillarité ont confirmé cette augmentation de la porosité. Les bétons caoutchoutés ont présenté une absorption d'eau plus importante que le béton de référence, ce qui contribue à expliquer la réduction des résistances mécaniques observée.

Par ailleurs, l'étude de l'effet d'échelle a clairement mis en évidence l'influence des dimensions et de la géométrie des éprouvettes sur les résistances à la compression mesurées. Les éprouvettes cubiques ont généralement présenté des résistances supérieures à celles des éprouvettes cylindriques. Ces résultats confirment les conclusions rapportées dans les travaux de Zdeněk Bažant, William Gonnerman et Alberto Carpinteri concernant le comportement des

matériaux quasi-fragiles et la diminution de la résistance apparente avec l'augmentation des dimensions des éprouvettes.

Malgré la baisse des performances mécaniques, les granulats de caoutchouc apportent certains avantages fonctionnels au béton, notamment une meilleure capacité de déformation, une rupture moins fragile et une capacité accrue d'absorption de l'énergie grâce au comportement ductile du caoutchouc.

En définitive, cette étude montre que la valorisation des déchets de pneus dans le béton constitue une solution durable et prometteuse sur les plans environnemental et économique. Elle contribue à la réduction des impacts écologiques liés à l'accumulation des pneus usagés tout en ouvrant des perspectives intéressantes pour le développement de matériaux de construction innovants et plus respectueux de l'environnement.

Références Bibliographiques :

- [1] Trouzine H, A.Asrom, N. Asrom, F.Belabdelouhab, N.T.Long : Problématique des Pneumatiques usagés en Algérie, Revue nature et technologie, Vol.5, pp. 28-35, 2011.
- [2] Conférence des Partie à la Convention de BALE sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination, Directives Techniques Révisées pour une Gestion Ecologiquement Rationnelle des pneus usés, P52, Avril 2008.
- [3] Scrap Tire Recycling in Canada : FromScrap to Value/Recyclage des pneus hors d'usage au Canada : La transformation des pneus hors d'usage en produits à valeurs ajoutée. www.catraoline.ca/pdf/Recyc_2006_pneus.pdf.
- [4] Guelmine L. Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures [thèse]. Alger : Université de Alger ; 2017. p. 159.
- [5] ETRMA – European Tyre& Rubber Manufacturers' Association (Belgium), 2010b. Used Tyres Recovery 2010 (table) – UT/Part Worn Tyres/ELT's Europe – Volumes
- [6] Nguyen Thanh L., Thèse de doctorat : Le Pneusol : Recherches Réalisations – Perspectives. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 1993.
- [7] Neville A., « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000.
- [8] Norme NA452. Granulats - Eléments pour identification des granulats. Editions institut Algérien de la normalisation.
- [9] Grairia Said. Contribution à la Formulation des Bétons Auto plaçant à Hautes Résistances ; Mémoire de magister, Université 8 mai 1945 Guelma, 2010.
- [10] Norme NA1966. Bétons - Eau de gâchage pour béton de construction. Institut Algérien de la normalisation.
- [11] Aitcin P. C., S. JIANG, B. KIM, P. NKINAMUBANZI, N. PETROV, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [12] Acker P., « Prise et durcissement des bétons : Les effets thermomécaniques », Techniques de l'ingénieur. Vol. 3, n° C2235, 1988.
- [13] Kara A.R., « Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires », thèse de Doctorat, U Cergy Pontoise, décembre 2002.
- [14] M.N. Adam, Propriétés des bétons, Ed Eyrolles, pp. 754 (1998), Paris.

- [15] Guelmine, L., L'influence du rapport E/C et du mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques et de transfert d'humidité des mortiers de ciment durcis, Mémoire de Magister, Université de Laghouat 2006, pp.86.
- [16] H.H. Steneinour, The system $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ and the hydration of the calcium silicates, Chemical Reviews, pp. 40 (1947).
- [17] T.C. Powers, The physical structure and engineering properties of concrete, Portland.Cement. Association. Research. Department. Building. pp. 39 (1958).
- [18] COURS de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada). Site Internet: www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/84
- [19] R.A. Olson, H.M. Jennings, Estimation of C-S-H in a blended cement paste using water adsorption, Cement and Concrete Research, vol.31, pp.351-356 (Décember 2000).
- [20] Güneyisi E., Gesoğlu M and Özturan T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement and Concrete Research 34, 2309–2317, 2004.
- [21] Khatib ZK, Bayomy FM. Rubberized portland cement concrete. J Mater Civ Eng. 2000;206-213.
- [22] Garros M. Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés: optimisation de la composition et caractérisation [thèse]. Toulouse: Université Paul Sabatier; 2007.
- [23] Guelmine L. Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. Constr Build Mater. 2016;26(9):77-85.
- [24] Benazzouk A, Douzane O, Quéneudec T, Kint M. Transport of fluids in cement–rubber composites. Cement Concr Compos. 2004;26:21-29.
- [25] Bažant Z.P., Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, 1984.
- [26] Mazars J., L'effet d'échelle dans les structures en béton, Revue Française de Géotechnique, n°49, pp. 15–24, octobre 1989.
- [27] ACI 446-1 committee 446-1991.
- [28] Mazen Albouchi, effet d'échelle dans les poutres en béton renforcées extérieurement en cisaillement à l'aide de matériaux composites, thèse de maîtrise en génie civil, Monterial.2004.

- [29] Picazo A., Alberti M.G., Gálvez J.C., Enfedaque A., Vega A.C., The size effect on flexural fracture of polyolefin fibre-reinforced concrete, *Materials*, 2019.
- [30] Gonnerman, H. F. (1925) "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete," *Proceedings, ASTM*, V.25, Part 2, 1925, pp.237-250.
- [31] Courtial M., de Noirfontaine M.-N., Dunstetter F., Mounanga P., Cherkaoui K., Khelidj A., Microstructure d'un béton de poudre réactive extrudable, Université d'Artois – École Polytechnique – Université de Nantes.
- [32] Bolić E., Gačo D., Islamović F., Manjgo M., Discretization of the finite element network along the crack line in the concrete, 6th International Scientific Conference on Defensive Technologies (OTEH 2014), Belgrade, Serbia, 9–10 October 2014.
- [33] EBAWE Anlagentechnik GmbH, Concrete bridge / structural concrete application, ArchiExpo, disponible sur : Consulter la page, consulté en 2026.
- [34] Bažant Z.P., Planas J., Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, 1998.
- [35] Carpinteri A., Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties, 1989.
- [36] Eldin N.N., Senouci A.B., Rubber-tire particles as concrete aggregate, 1993.
- [37] Li G. et al., Development of rubberized concrete, 2004.
- [38] Gupta T. et al, Effect of waste rubber on properties of concrete, 2014.
- [39] Thomas B.S., Gupta R.C., Properties of rubberized concrete, 2016.
- [40] https://ft.univtlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/tp/masse_volumiques_granulats.pdf « le dernier modification 02/12/2007 06:23:15 ».
- [41] Guelmine, L., & Merabti, S. (2025). Impact of reused tire rubber waste on liquid-phase moisture transfer properties of cement mortar. *Journal of Building Physics*. Sage Publications. <https://doi.org/10.1177/17442591251389481>

[42] Guelmine L (2017) Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et de hautes températures. Doctorat : Construction et Matériaux. Faculté de Génie Civil, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène, Alger, p.134. Available at : <https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=000000000000000837924000104> (accesse d June 2025).

[43] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. (2008) Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles Waste Management, Vol. 28, pp. 2472–2482.

[44] Pham, T.M., Elchalakani, M., Hao, H., Cuong, N.H. (2018) Behaviour of rubberized concrete under compression and impact loading Construction and Building Materials, Vol. 171, pp. 1–12.

[45] Kaloush, K.E., Way, G.B., Zhu, H. (2005) Properties of crumb rubber concrete Transportation Research Record, No. 1914, pp. 8–14.

[46] Normes utilisées :

- EN 197-1 :2011 — Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
- NA 442 :2013 — Ciments courants — Composition, spécifications et critères de conformité.
- EN 933-1 :2012 — Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats — Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage.
- EN 933-8 :2012 — Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats — Partie 8 : Évaluation des fines — Essai d'équivalent de sable.
- EN 12390-3 :2019 — Essais pour béton durci — Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes.
- EN 12390-5 :2019 — Essais pour béton durci — Partie 5 : Résistance à la flexion des éprouvettes.
- EN 12390-6 :2009 — Essais pour béton durci — Partie 6 : Résistance en traction par fendage des éprouvettes.
- EN 13057 :2002 — Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton — Méthodes d'essai — Détermination de l'absorption capillaire.