



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : DINE TAHAR MOHAMMED SÉDDIK

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : TRAVAUX PUBLIQUES

OPTION : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Thème

**CONTRIBUTION À LA FORMULATION D'UN BÉTON DE
CHAUSSÉE À BASE DES FIBRES MÉTALLIQUE ET DES
GRANULATS DE GRANITE RECYCLÉS**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Nouioua Tahar	MAA	Président
Benguit Amar	MAA	Examineur
Boukhelkhal Aboubakeur	MCA	Rapporteur
Matallah Ali	Ing LTPS	Co-rapporteur

Promotion : Septembre - 2024

Dédicace

Je dédie mon travail à :

Mes chers parents

pour leurs énorme soutiens durant mes études.

À tout ma famille

pour leurs efforts envers moi.

Mes chers camarades

qui m'ont accompagné durant ce travail.

Chers professeurs

pour leurs guidance, conseils et patience durant ma formation.

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier notre seigneur Allah.

Je remercie mes encadreur **Mr. Boukhelkhal Aboubakeur** et **Mr Mattalah Ali** pour leurs conseils, recommandation et aide pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement les **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

J'exprime ma gratitude envers **tous les enseignants** du département du génie civil pour leurs contribution à ma formation qui m'a emmené jusqu'à ici.

Je remercie les membres du laboratoire pour leurs disponibilités et leurs conseils durant la réalisation de ce travail.



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE ou INSTITUT : GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

RESUME DE MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Science et technologie

Filière : Travaux publiques

Option : Voies et ouvrages d'art

Thème : Contribution à la formulation d'un béton de chaussée à base des fibres métallique et des granulats de granite recyclés

Présenté par : Dine Tahar Mohammed Séddik

Encadré par : Boukhalkhal Aboubakeur

Résumé : Le domaine de construction routière est en croissance continue, le béton étant le matériau de construction des voies le plus utilisé ce dernier se classe en deuxième position étant la ressource la plus utilisée au monde, de ce fait ces composants (agrégats, ciment, eau) sont très consommés où l'approche des matériaux écologiques a vu le jour pour résoudre le problème de l'environnement et économique. Ce travail étudie la possibilité d'utilisation des déchets de granite comme agrégats (gravier et sable) par substitution des naturels de 10%, 20% et 30%, ainsi que leurs effets sur les performances du béton de chaussée fibré avec des fibres métalliques. L'évaluation des performances mécaniques est faite par le biais des essais destructifs tels que l'écrasement et la traction par fendage, et des essais non-destructifs comptant l'auscultation sonore ainsi que l'essai sclérométrique. Les résultats des essais montrent que l'ajout des fibres et des granulats recyclés donne une consistance ferme et améliore la résistance à la compression et à la traction au fendage pour 20% de granulats recyclés. La qualité du béton est excellente pour la plupart des mélanges.

Mots clés : Granulat recyclé, Matériau écologique, Béton fibré, Fibre métallique, Granite recyclé.

Abstract :

Roads construction field is on a continuous growth with the concrete being the second most used material on that field, aggregate, cement and water being the components are in a high consumption which leads to consider eco-materials as an alternative to solve the economic and environmental problem of such a material. This study check the possibility of incorporating granite waste recycled aggregates with 10, 20 and 30 % rate of the natural aggregates, and their effect on the performance and mechanical behaviour of a fibred pavement concrete. The mechanical performances was evaluated using destructive tests such as compressive strength and splitting strength, the ultrasonic pulse velocity (UPV) and using a Schmidt hammer. Results shows that the addition of 20% granite waste recycled aggregates and fibers give a low degree of workability and enhance the compressive and splitting strength, according to the UPV test the concrete present a excellent quality.

المخلص :

ميدان بناء الطرقات يشهد تطور مستمر بحيث ان الخرسانة هي ثاني اكثر المواد إستعمالا، مكوناتها (حصى، اسد منت و الماء) في إستهلاك كبير وهذا يدعو الى التطرق لإستعانة بمواد بناء صديقة للبيئة كيبديل لحل المشاكل الإقتصادية و البيئية المتعلقة بالميدان. في هذه الدراسة سوف يتم التحقق من قابلية إستعمال نفايات الجرانيت المعاد رسكلتها كحصلى بكمية 10, 20 و 30% في خرسانة الطرقات و الرصيف المدعمة بالألياف. الأداء الميكانيكي قد تم تحقق منه بإستعمال إختبارات مدمرة كالمقاومة للضغط و المقاومة للإنقسام، و كذلك بإستعمال إختبارات غير مدمرة كسرعة الموجات فوق الصوتية و معدل الصلابة. النتائج تشير الى أن إستعمال 20% من الحصى الجرانيت المعاد رسكلته ينتج عنه قابلية تشغيل ضعيفة وتحسن مقاومة للضغط و الإنقسام، بحيث أن سرعة الأمواج فوق الصوتية تدل على أن جودة الخرسانة ممتازة.

Tableaux des symboles et abbréviations :

GGR	Granulats de granite recyclées
FM	Fibres métallique
BGN	Béton de granulats naturel
IR	Indice de rebondissement/sclérométrique
VAS	Vitesse d'auscultation sonique

Table des matières

Dédicace.....	
Remerciement	
Résumé.....	
Introduction général	1

Chapitre 1 : Revue bibliographique sur les bétons de chaussée et les béton de granulats recyclés

1.1. Introduction.....	3
1.2. Les bétons de chaussées.....	3
1.2.1. Définition	3
1.2.2. Classification.....	4
1. Chaussée souple	5
2. Chaussée rigide	6
3. Chaussée semi-rigide	7
4. Comparatives des types de chaussées	7
1.2.3. Composition.....	8
A. Ciment.....	8
B. Granulats	9
C. Eau de gâchage.....	9
D. Adjuvants	9
1.2.4. Mise en œuvre.....	11
1.2.5. Propriétés physiques et mécanique	12
1.3. Béton de granulats recyclés	13
1.3.1. Définition	13
1.3.2. Différents types de granulats recyclés	13
1. Granulats recyclé de béton.....	13
2. Granulats recyclé d'enrobés bitumineux	13
3. Granulats recyclé de verres	13
4. Granulats recyclé de granite.....	13
1.3.3. Intérêt de l'utilisation des granulats recyclés dans le domaine de construction routière	14
1.3.4. Propriétés rhéologiques, physique et mécanique de béton de granulats recyclés	14

Chapitre 2 : matériaux utilisés et protocole expérimental

2.1. Introduction.....	19
2.2. Caractérisation des matériaux	19
2.2.1. Ciment.....	19
2.2.2. Granulats	20
1. Granulats naturels	20
2. Granulats recyclé de granite.....	21

2.2.3. Sable.....	22
2.2.4. Fibres métalliques	24
2.2.3. Eau de gâchage	25
2.3. Formulation du béton de chaussée.....	25
2.3.1. Formulation selon la méthode de Faury.....	26
A. Particularité de la méthode.....	26
B. Courbe optimale	26
C. Origine.....	26
D. Extrémité.....	26
2.4. Procédure de malaxage	28
2.5. Expérimentations	29
2.5.1. Essais sur béton frais.....	29
A. Essai d'affaissement.....	29
2.5.2. Coulage et démoulage des éprouvettes	31
2.5.3. Condition de cure.....	32
2.5.2. Essais sur béton durci.....	32
A. Résistance à la compression.....	32
B. Résistance à la traction par fendage	33
C. Vitesse d'auscultation sonique	34
D. Essai au scléromètre.....	34

Chapitre 3 : Analyse et discussion des résultats

3.1. Introduction.....	36
3.2. Propriétés à l'état frais	36
3.2.1. Composition des mélanges	36
3.2.2. Maniabilité	36
3.3. Performances à l'état durcis.....	38
3.3.1. Résistance à la compression.....	38
3.3.2. Résistance à la traction par fendage.....	39
3.3.3. Vitesse d'auscultation sonique (VAS).....	40
3.3.4. Indice sclérométrique (rebondissement) (IR)	41
Conclusion général.....	43
Références bibliographiques.....	44

Liste des figures

Figure 1.1 : La mise en œuvre du béton de chaussée.....	3
Figure 1.2 : La composition de chaussée souple.....	5
Figure 1.3 : Le comportement flexible de chaussée souple	6
Figure 1.4 : La composition de chaussée de chaussée rigide.....	6
Figure 1.5 : La composition de chaussée de chaussée semi-rigide.....	7
Figure 1.6 : Le comportement des différentes chaussées sous sollicitation	8
Figure 1.7 : Coulage d'une chaussée rigide	11
Figure 1.8 : Granulats recyclés	14
Figure 1.9 : Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclé selon la taux de remplacement	15
Figure 1.10 : La porosité du béton à base de granulats recyclé selon la taux de remplacement.....	15
Figure 1.11 : a) relation du taux de remplacement en granulats recyclés et la porosité ouverte du béton	
b) relation de la densité du béton avec ça porosité ouverte	16
Figure 1.12 : La résistance à la compression du béton par rapport à la porosité ouverte du béton.....	16
Figure 1.13 : Comparative des propriétés mécaniques du BAP	17
Figure 2.1 : Ciment Biskria CEMII/A-L 42.5 R.....	19
Figure 2.2 : Gravier naturel 8/15.....	20
Figure 2.3 : Gravier naturel 15/25.....	20
Figure 2.4 : Gravier naturel 3/8.....	20
Figure 2.5 : Processus de préparation des granulats de granite recyclé.....	22
Figure 2.6 : Caractéristique granulométrique d'un bon sable pour béton.....	23
Figure 2.7 : L'analyse granulométrique des granulats naturel et sable alluvionnaire .	24
Figure 2.8 : Les fibres métallique employé : a) Fibre N1 b) Fibre N2	25
Figure 2.9 : Courbe granulométrique selon M.Faury	27
Figure 2.10 : Mode de malaxage.....	28
Figure 2.11 : Phase de bétonnage	28
Figure 2.12 : Éprouvettes après coulage	29
Figure 2.13 : Le cône d'Abrams et sont utilisation.....	30
Figure 2.14 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	31
Figure 2.15 : Spécimens préparés	32
Figure 2.16 : Essai de compression.....	33
Figure 2.17 : Dispositif de l'essai de traction par fendage	33
Figure 2.18 : Essai d'auscultation sonique sur béton.....	34
Figure 2.19 : Essai de contrôle de qualité au scléromètre.....	34
Figure 3.1 : Résultats d'affaissement des différents mélanges	36
Figure 3.2 : La résistance à la compression du béton de chaussée fibré avec granulats recyclés de granite.....	38
Figure 3.3 : La résistance à la traction par fendage du béton de chaussée fibré à base de granulats recyclé de granite.....	39

Figure 3.4 : La vitesse d'auscultation sonore des différentes compositions du béton de chaussée fibré à base de granulats recyclés de granite.....	40
Figure 3.5 : Courbe de la résistance à la compression selon l'indice de rebondissement des spécimens cubique et cylindrique respectivement.....	41
Figure 3.6 : La résistance à la compression selon l'indice sclérométrique du béton de chaussée fibré à base de granulats de granite recyclés	42

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Comparatives des différentes types de chaussées	8
Tableau 1.2 : Recommandations concernant la composition des bétons de routes	10
Tableau 1.3 : Recommandations de résistance à la compression selon le type de voirie	12
Tableau 1.4 : Guide pour le choix des classes de résistance du béton de chaussée.....	12
Tableau 2.1 : Les propriétés des granulats naturel.....	21
Tableau 2.2 : Les propriétés des granulats recyclé de granite	21
Tableau 2.3 : Les propriétés du sable.....	23
Tableau 2.4 : Caractéristique des fibres utilisées.....	25
Tableau 2.5 : Valeur de A (relative à la formulation).....	27
Tableau 2.6 : Les classes de maniabilité avec la cône d'Abrams	30
Tableau 3.1 : Compositions des différents mélanges.....	37
Tableau 3.2 : La classification de qualité du béton selon la vitesse des ondes ultrasonique.....	41

Introduction générale

La croissance et le développement du monde ne cesse d'augmenter, ceci dit une infrastructure le supportant est devenue nécessaire, comptant le domaine de construction comme l'un des plus importants d'où plusieurs recherches sont menées dans les quatre coins du monde incitant la production de nouveaux matériaux, méthodes et projets, qui répondent aux exigences de ce nouveau monde qui prend en compte le développement socio-économique et durable ainsi la conservation de l'environnement.

La construction routière est une partie crucial du domaine de construction, elle établit l'infrastructure que la civilisation compte sur pour le quotidien, les voiries sont conçus tout en répondant à deux conditions importante qui sont la résistance et la durabilité de cette dernière. Le bitume est utilisée couramment comme liant, certes ça production et mise en œuvre sont plus simple mais même avec leurs grande souplesse et flexibilité, sous la charge du trafic et les sollicitations répétées facilitent leur dégradation ce qui exigent des maintenances ou leur destruction avec le temps.

L'utilisation d'une chaussée plus résistance et plus durable peux répondre aux exigences cité précédemment en garantissant une infrastructure plus adapté au développement de la civilisation. La chaussée rigide à vue le jour résolvant ainsi les problèmes de la chaussée souple à base de bitume, en utilisant un liant hydraulique telle que le ciment pour faire des voiries en béton ayant des performances élevées qui lui permettent de supporter plus de charge roulante et donnant l'avantage la faible nécessité de maintenance.

Le présent travail vise à produire un béton de chaussée en utilisant des matériaux recyclés tel que les déchets de granite. L'emploi d'un matériau recyclé comme granulats qui remplacent une partie des granulats naturels peut contribuer à diminuer la consommation des ressources naturelles tout en réduisant le cout de production du béton. Des fibres métalliques seront également utilisées dans l'objectif d'améliorer la résistance à la flexion.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres avec introduction et conclusion générales. Le premier chapitre consiste dans la bibliographie et le recueil de connaissances sur le béton de chaussée et l'emploi des granulats recyclés dans le béton. Ensuite la deuxième partie traite la caractérisation des matériaux employés ainsi que le protocole expérimental choisi pour le contrôle de qualité du béton. En fin la dernière partie consiste à la présentation, analyse et discussion des résultats obtenus. Les principaux résultats sont regroupés dans la conclusion générale.

Chapitre 1 : Revue bibliographique sur les bétons de chaussée et les bétons de granulats recyclés

1.1. Introduction :

Le domaine routier pousse ces ingénieurs et chercheurs à l'innovation et le développement de matériaux pour répondre au besoin de l'infrastructure urbaine, tout en soulevant les défis qui s'imposent que ce soit les critères relatifs aux matériaux de construction et environnemental. D'où l'usage de granulats recyclés comme alternative aux agrégats naturels à vue le jour pour relever le défi relatif à la gestion des ressources naturelles.

En premier lieu, on abordera les différents types, classification, propriétés et performances des bétons de chaussées, puis on discutera le cas des bétons à base de granulats recyclés.

1.2. Les bétons de chaussées :

1.2.1. Définition :

Ce sont des bétons spécialement conçus pour répondre aux exigences élevées des infrastructures routières en termes de résistance mécanique, de durabilité et de comportement sous trafic.

Ils se caractérisent par une granulométrie optimisée, un dosage en ciment plus élevé et l'utilisation d'adjuvants spécifiques. Leurs principaux avantages sont leur résistance élevée à la compression et à la flexion, leur faible retrait et leur bonne durabilité.

Ils sont largement utilisés pour la construction et la réparation des chaussées, des pistes d'aéroport, des trottoirs et autres infrastructures soumises à des charges de trafic importantes.



Figure 1.1 : La mise en œuvre du béton de chaussée [1]

1.2.2. Classification :

Le choix du type de béton de chaussée dépend des sollicitations attendues (trafic, environnement, etc.), des performances requises et des contraintes de chantier. Une formulation appropriée est alors nécessaire pour répondre à les différents critères.

La classification suivante permet de définir les exigences techniques et les domaines d'application des différents types de bétons de chaussées. Elle tient compte des propriétés mécaniques, de durabilité, de mise en œuvre et de la composition du béton.

1. Classification selon la résistance mécanique :

- ♦ Béton de résistance normale : $R_c \geq 35$ MPa
- ♦ Béton de haute résistance : $R_c \geq 50$ MPa

2. Classification selon l'environnement d'exposition :

- ♦ Béton non exposé aux intempéries
- ♦ Béton exposé aux intempéries
- ♦ Béton soumis aux sels de déverglaçage

3. Classification selon l'utilisation :

- ♦ Béton de fondation
- ♦ Béton de base
- ♦ Béton de couche de roulement

4. Classification selon la mise en œuvre :

- ♦ Béton coulé en place
- ♦ Béton préfabriqué

5. Classification selon la texture de surface :

- ♦ Béton lisse
- ♦ Béton texturé (brossé, balayé, rainuré, etc.)

6. Classification selon la composition :

- ◆ Béton traditionnel
- ◆ Béton à haute performance
- ◆ Béton fibré
- ◆ Béton de granulats recyclés

Chacun de ces types de bétons présente des caractéristiques techniques, des domaines d'application et des procédés de mise en œuvre spécifiques, qui doivent être pris en compte dans la conception et la réalisation des chaussées.

Du point de vue constructif les chaussées peuvent être groupées en trois grandes catégories :
Chaussée souple.

1. Chaussée souple :

La chaussée souple est un type de chaussée doté d'une flexibilité et la simplicité de son mise en œuvre, elle se compose principalement de 4 couches : couche de roulement (surface), de base, de fondation et la couche de forme (le sol d'assise) comme le démontre la Figure 2 adjacente.

La couche de roulement est à base d'enrobée de granulats et un liant hydrocarbure (Bitume) d'où la souplesse et la flexibilité lors de la sollicitation (Figure 3), mais son cycle de vie est faible qui nécessite des réparations et un entretien régulier car la souplesse est accompagnée d'une déformabilité élevée.

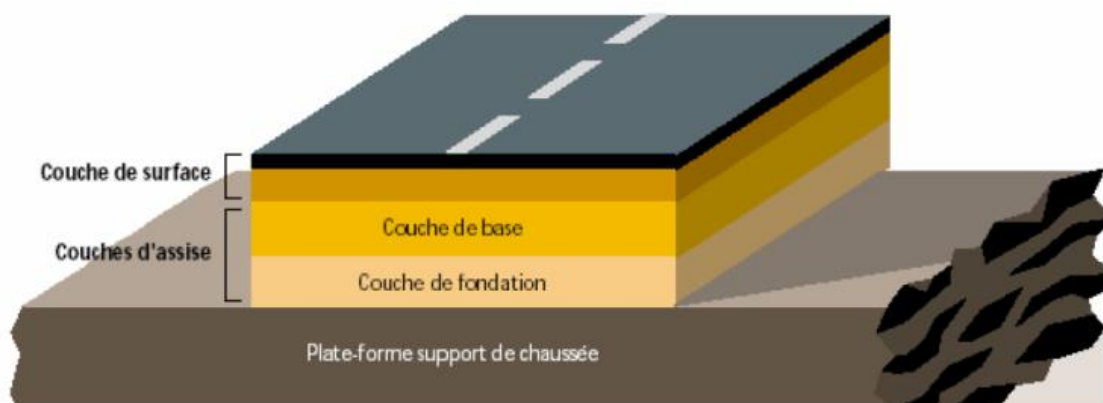


Figure 1.2 : La composition de chaussée souple [2]

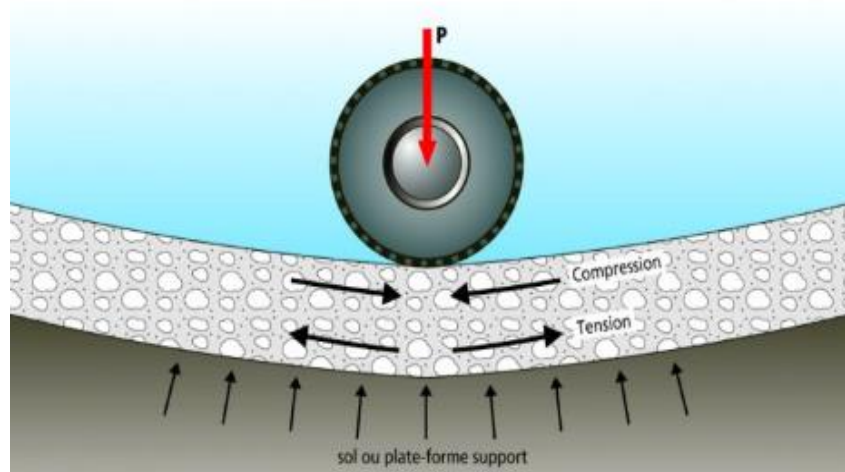


Figure 1.3 : Le comportement flexible de chaussée souple [3]

2. Chaussée rigide :

Doté d'une portance et résistance importante, la chaussée rigide est un type de chaussée qui utilise le béton comme couche de roulement. Ce type de chaussée est conçu pour être une très bonne solution à l'emménagement urbain ceci en procurant une résistance considérable ainsi utilisée pour les voies à trafics importants et spéciaux. Le béton à l'encontre du bitume des chaussées souples procure une durée de vie plus importante qui le rend économique avec ça faible nécessité d'entretien.

Ce type de chaussée procure de nombreux avantages par rapport au souple dont esthétique, économique, écologique [1].

Cette chaussée est constituée principalement d'une couche de forme accompagnée d'une couche de fondation où des granulats compactés sont utilisés pour faire une assise à la dalle de béton.

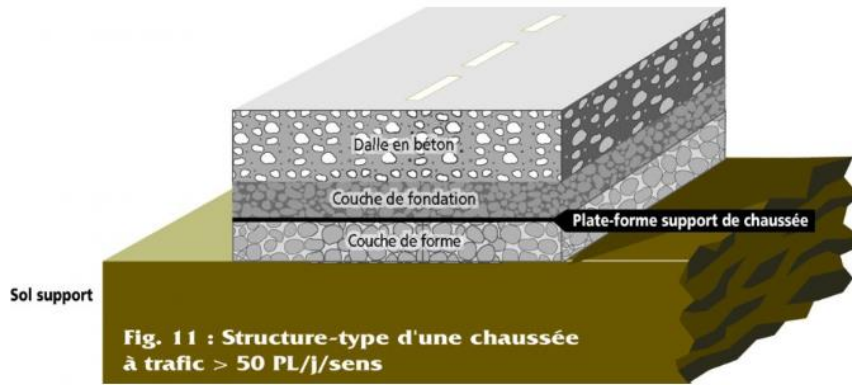


Figure 1.4 : La composition de chaussée rigide [4]

3. Chaussée semi-rigide :

Les chaussées comportant une couche de base (quelques fois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, granulat, ...). La couche de roulement est en enrobé hydrocarboné et repose quelques fois par l'intermédiaire d'une couche de liaison également en enrobé, l'épaisseur minimale doit être de 15cm. Ce type de chaussée n'existe à l'heure actuelle qu'à titre expérimental en Algérie.

Ce type de chaussée est certes doté des avantages des deux type souple et rigide, mais le fait que ça couche de base utilise un liant hydraulique la rend susceptible au retrait, les fissuration remonte vite de la couche de base à la couche de roulement [1].

Les chaussées comportant une couche de base ou une couche de fondation en sable gypseux.

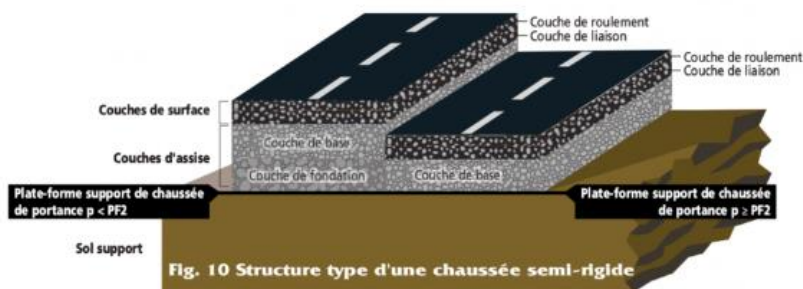
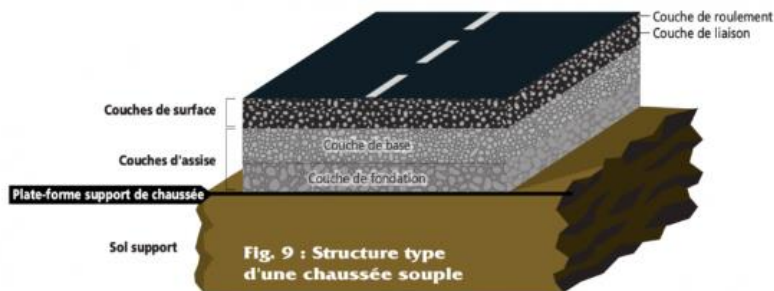


Figure 1.5 : La composition de chaussée semi-rigide [4]

4. Comparative des types de chaussées : Les principales différences selon différents critères entre les types de chaussée sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1.1 : Comparatives des différents types de chaussées

Critères	Chaussée Souple	Chaussée Rigide	Chaussée Semi-Rigide
Matériau principal	Enrobé bitumineux	Béton de ciment	Enrobé bitumineux + matériaux stabilisés
Flexibilité	Élevée	Faible	Moyenne
Durabilité	Moyenne	Élevée	Moyenne à élevée
Coût initial	Moyen à élevé	Élevé	Moyen
Entretien	Fréquent et simple	Moins fréquent, mais réparations complexes	Modéré
Résistance aux charges	Modérée (susceptible à l'orniérage)	Élevée	Bonne
Réparabilité	Facile et rapide	Difficile et coûteuse	Relativement facile
Sensibilité à la température	Susceptible aux variations	Moins sensible	Modérée
Durée de vie	10-20 ans (variable selon entretien)	20-40 ans	15-30 ans

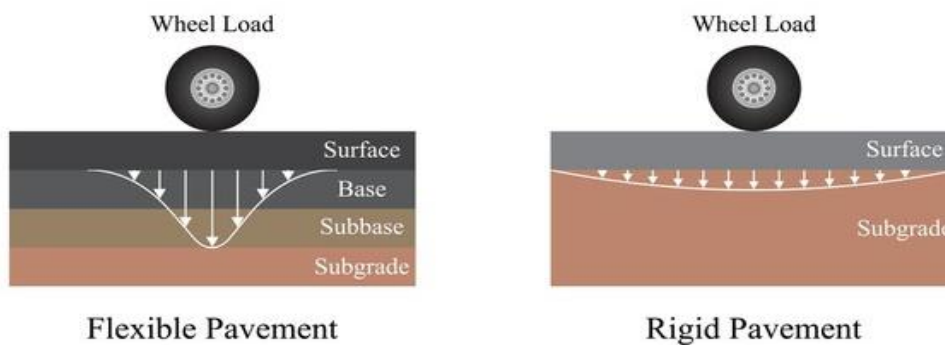


Figure 1.6 : Le comportement des différentes chaussées sous sollicitation [5]

1.2.3. Composition :

A. Ciment : est le liant hydraulique par excellence. Ce dernier est généralement composé de calcaire et d'argile. Il fait partie des principaux composants du béton, liant ses constituants entre eux, et lui confère certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance.

La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories :

- ♦ Le CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- ♦ Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniabiles. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- ♦ Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- ♦ Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.
- ♦ Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants.

B. Granulats : d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. En tant que principaux composants du béton, ils lui transmettent certaines caractéristiques techniques et esthétiques, notamment sa résistance. Le choix du type de granulats utilisés ne doit donc pas être fait à la légère car il aura une influence sur la durabilité de votre béton. On distingue alors différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts.

C. Eau de gâchage : est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. L'eau utilisée doit être propre ! (Évitez d'utiliser de l'eau de mer) et prenez garde à ne pas l'ajouter avec excès sous risque d'altérer les performances de votre béton. En effet, cela pourrait diminuer sa résistance et sa durabilité.

D. Adjuvants : Les adjuvants sont principalement utilisés pour contrôler l'heure de prise, l'utilisation d'un retardateur de prise est fréquent lorsque la centrale produisant le béton est loin du site pour garantir la bonne réception du béton frais prêt à l'emploi.

Notamment la maniabilité des béton routier (chaussée) à base de ciment est généralement améliorée en utilisant un réducteur d'eau qui se soit plastifiant ou super plastifiant, ceci pour aboutir à une ouvrabilité appropriée.

La Fédération de l'Industrie Cimentière Belge «FEBELCEM» [2] propose une composition optimal selon l'usage que ce soit pour des voies à trafic important, vois communal ou rural.

Tableau 1.2 : Recommandation concernant la composition des bétons de routes

Type de revêtement	Dimension nominale maximale des granulats Dmax	Teneur minimale en ciment (kg/m ³)	Facteur E/C	Teneur en air (%-v)
Autoroutes et routes à trafic lourd				
Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	> 20 mm	400	≤ 0,45	-
	6 < Dmax ≤ 20 mm	400	≤ 0,45	3 ≤ v ≤ 6
	(Dmax ≤ 6 mm)	425	de 0,40 à 0,45 (0,42)	5 ≤ v ≤ 8
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	> 20 mm	375	de 0,40 à 0,45 (0,48)	3 ≤ v ≤ 6
Routes régionales et communales				
Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	> 20 mm	375	≤ 0,50	-
	6 < Dmax ≤ 20 mm	375	≤ 0,50	3 ≤ v ≤ 6
	(Dmax ≤ 6 mm)	400	de 0,45 à 0,50	3 ≤ v ≤ 6
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	> 20 mm	350	≤ 0,50	3 ≤ v ≤ 6
Routes rurales, pistes cyclables et espaces piétonniers				
Couche supérieure (revêtement monocouche ou bicouche)	> 20 mm	350	≤ 0,50	-
	6 < Dmax ≤ 20 mm	350	≤ 0,50	3 ≤ v ≤ 6
	(Dmax ≤ 6 mm)	375	≤ 0,50	3 ≤ v ≤ 6
Couche inférieure dans le cas d'un revêtement bicouche	> 20 mm	325	≤ 0,55	3 ≤ v ≤ 6

1.2.4. Mise en œuvre : La mise en œuvre du béton pour les chaussées est un processus crucial pour garantir la qualité et la durabilité de la chaussée. Voici quelques points clés à considérer lors de la mise en œuvre :

1. Choix des matériaux :
 - Sélectionnez des granulats de haute qualité (sable, gravier, cailloux) et un ciment adapté, tout en Assurant que les matériaux respectent les normes et spécifications requises.
2. Préparation du sol :
 - La surface doit être propre, stable et bien compactée. Si nécessaire, ajoutez une couche de fondation pour renforcer le sol.
3. Préparation du béton :
 - Mélangez le ciment, les granulats et l'eau conformément aux proportions spécifiées.
 - Utilisez des adjuvants si nécessaire pour améliorer certaines propriétés du béton.
4. Mise en place du béton :
 - Utilisez des machines à coffrage glissant pour les grandes épaisseurs.
 - Pour des épaisseurs plus faibles, utilisez des aiguilles vibrantes ou une vibration de surface.
 - Contrôlez la consistance du béton pour assurer une répartition uniforme.
5. Traitement de surface :
 - Choisissez le type de traitement de surface approprié (béton dénudé, désactivé, etc.).
 - Assurez-vous que le traitement répond aux exigences d'adhérence, d'esthétique et de bruit de roulement.
6. Contrôle qualité :
 - Effectuez des contrôles à chaque étape (préparation, mise en place, finition).
 - Vérifiez l'épaisseur, la planéité et la résistance du béton.
 - Planéité et la résistance du béton.



Figure 1.7 : Coulage d'une chaussée rigide. [6]

1.2.5. Propriétés physiques et mécanique :

Voici les principales propriétés physiques et mécaniques des bétons utilisés pour les chaussées :

Le béton de chaussée doit avoir la capacité de résister au sollicitation causé par le trafic qu'il supporte, de ce fait la classe de résistance de ce dernier varie selon le type de chaussée que sa soit celle d'un autoroute, voie communal ou rural, de ce fait FEBELCEM [2] propose des recommandations de résistance selon le type de chaussée et ça classe :

Tableau 1.3 : recommandations de résistance à la compression selon le type de voirie

Types de voirie	Autoroutes et routes où le trafic lourd est important	Routes régionales et communales	Routes rurales, pistes cyclables et espaces piétonniers
Couche supérieure des revêtements bicouche Essais sur cubes (15 cm de côté) à 28 jours			
Résistance à la compression moyenne minimum (MPa)	50	40	35
Résistance à la compression individuelle minimum (MPa)	40	30	25

Pour ce qui est des béton destinés à l'usage routier se caractérise selon leurs classe de résistance au fendage, car en pratique les béton de couche de roulement sont évalué utilisant l'essai de fendage selon la norme NF P 18-406 et ceux destinée au couche de fondation (pour les chaussée semi-rigide) sont évalué avec l'essai de compression. Le tableau 4 présente le choix de classe de béton de chaussée [3] :

Tableau 1.4 : guide pour le choix des classes de résistance du béton de chaussée

Classe de résistance	résistance caractéristique en fendage à 28j en MPa	résistance moyenne à 28j à viser lors de l'étude en MPa	Destination
6	3 ou 3.3	3.6 ou 4	Couche de roulement
2	1.7	2.1	Couche de fondation
1	1.3	1.6	

1.3. Bétons de granulats recyclés :

1.3.1 Définition :

Le béton est un matériau composite qui a plusieurs constituants, principalement le squelette solide est à base de granulats (des gravillons et de sable) qui servent à augmenter la compacité ainsi procurant une résistance au matériau. L'utilisation de granulats est crucial pour le domaine de construction se qui épuise les ressources naturel, où la recherche d'alternative deviens nécessaire, les granulats recyclé sont la solution. ces granulats peuvent être remplacer ceux naturel (concassée ou roulée), ceci produisant de nouvelles alternatives au béton ordinaire, que se soit l'utilisation de déchet, chutes ou matériaux recyclé. Ainsi plusieurs types de béton peuvent être obtenu, dont le béton léger, ordinaire ou même lourd.

1.3.2. Différents types de granulats recyclés :

Les différents types de granulats recyclés utilisés dans les bétons de chaussée sont les suivants :

- 1. Granulats recyclés de béton :** Le béton étant très répandu, son utilisation est abondante ainsi produisant de gigantesque quantité de déchet lors des démolition, d'où l'idée de l'utiliser comme granulats. Les débris de démolition peuvent être récupérer du site puis concassée et triés en différentes fraction granulaire (0/3, 0/5, 3/8, 8/15, 15/25 ...) destiné à être employer dans le domaine de la construction.
- 2. Granulats recyclés d'enrobés bitumineux :** Le revêtements routier se compose d'un grand pourcentage en granulats, ces derniers peuvent être réutiliser en recyclant les anciens revêtement. Les anciens revêtement sont concasser puis traiter pour en avoir des granulats qui passe au trie pour aboutir à plusieurs fractions granulaire visant à les réutiliser.
- 3. Granulats recyclés de verre :** Les débris de verre que se soit des bouteilles cassées ou des vitres, peuvent être recyclée pour les utiliser dans le domaine de construction comme alternative au granulats. Le processus est certes simple mais des précaution s'impose, où ces déchet de verre sont concassé, nettoyé et triés.
- 4. Granulats recyclés de granite :** Le granite est très répandu tout comme le marbre pour sont utilisation dans la décoration et construction, ainsi des grande quantité de déchet et chutes sont laisser derrière par les industrie. Ces derniers peuvent être réutiliser en les

recyclant en granulats destinée au béton, où ils passent par un processus de nettoyage, concassage et trie pour avoir des fraction granulaire utile au domaine de construction (utilisation dans le béton).

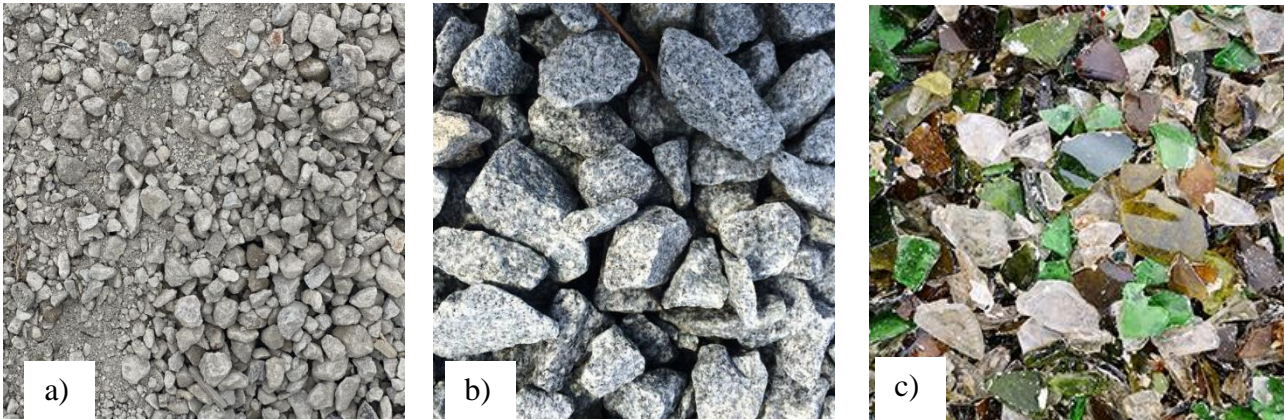


Figure 1.8 : granulats recyclés : a) Béton, b) Granite, c) Verre [7-9]

1.3.3. Intérêt de l'utilisation des granulats recyclés dans le domaine de la construction routière :

L'utilisation de ces granulats recyclés dans les bétons de chaussée présente des avantages environnementaux (réduction des déchets, diminution de l'extraction de matériaux naturels), mais aussi des défis techniques (qualité, homogénéité, compatibilité avec le liant, etc.) qui doivent être maîtrisés.

Des normes et des procédures de contrôle spécifiques ont été développées pour encadrer l'utilisation de ces granulats recyclés dans les bétons routiers.

1.3.4. Propriétés rhéologiques, physique et mécanique de béton de granulats recyclés :

L'utilisation des granulats recyclé dans le béton à pour but d'avoir des alternatives aux granulats naturel, mais ceci tout en garantissant certains critères dont les propriétés rhéologique et physique approprié, de bonnes performances mécaniques.

L'ajout de granulats recyclé peut améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais et durci, mais ceci nécessite des optimisations et ajustement sur la formulation pour garantir un effet favorable de ces derniers.

Des études sont déjà fait sur l'utilisation de granulats de béton recyclé [4-6], où le travail de Pierre MATAR et al '2012' [5] qui porte sur le remplacement des granulats naturel dans un béton des taux 10%, 20%, 30% avec des granulats de béton recyclé sains et d'autre incendié

issues de démolition. L'étude démontre que l'utilisation des granulats de béton recyclé diminue la résistance à la compression comme le démontre la Figure 9.

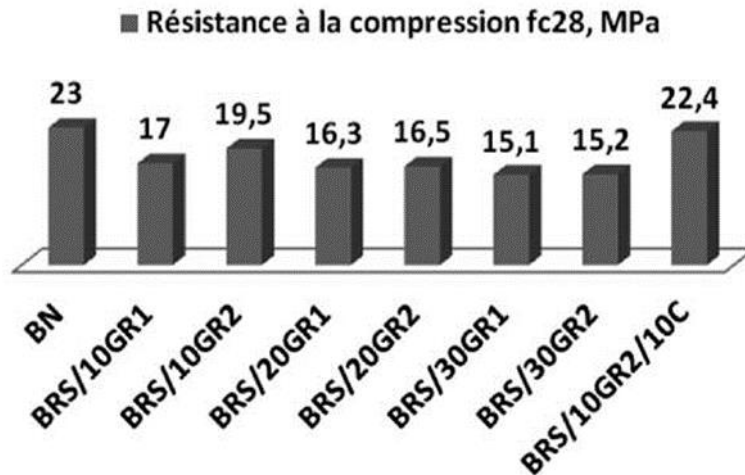


Figure 1.9 : résistance à la compression du béton à base de granulats recyclé selon le taux de remplacement

Les résultats démontrent que le béton au granulat naturel est doté d'une résistance à la compression plus élevée que ceux en granulats recyclés, ceci est attribué au fait que les granulats recyclés sont plus poreux qui rend le béton ainsi et qui fait diminuer la résistance comme le démontre la Figure 10.

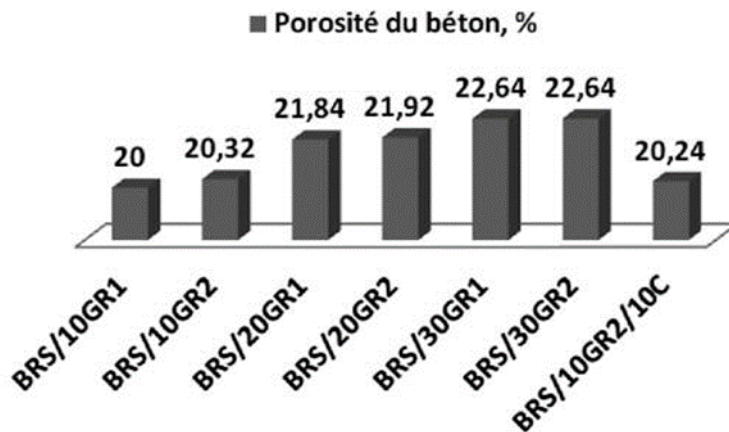


Figure 1.10 : La porosité du béton à base de granulats de béton recyclé selon le taux de remplacement

Le même truc est observé dans le travail de Elhem Ghorbel et al '2016' [7], son travail porte sur l'effet de des propriétés des granulats de béton recyclé sur les propriétés du béton fait avec. Il a aperçus que les granulats de béton recyclé sont très poreux ceci due au fait que le mortier est attachée à ces derniers ainsi augmentant leurs porosité.

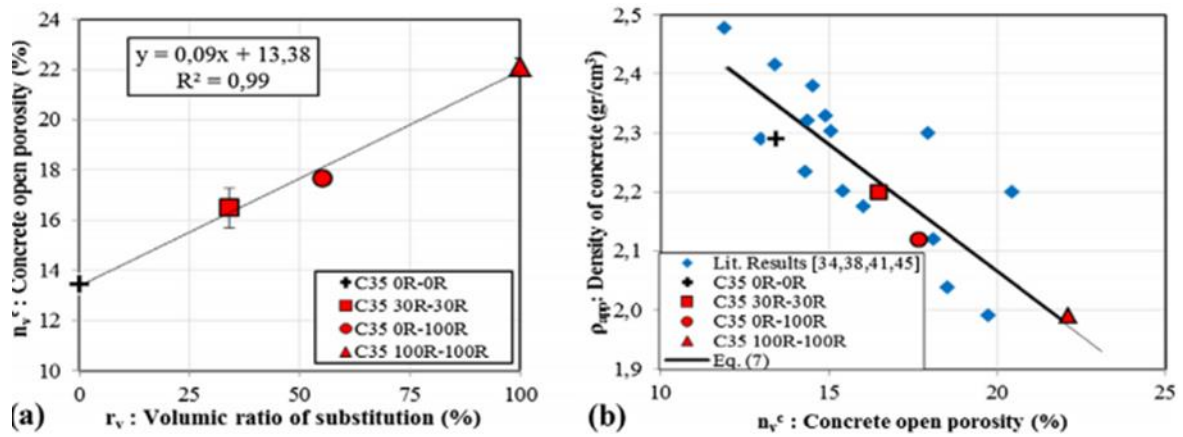


Figure 1.11 : a) relation du taux de remplacement en granulats recyclés et la porosité ouverte du béton b) relation de la densité du béton avec sa porosité ouverte

La porosité ouverte du béton augmente ainsi la densité de ce dernier diminue qui affectent la résistance à la compression du béton d'âge 28 jours (Figure 12).

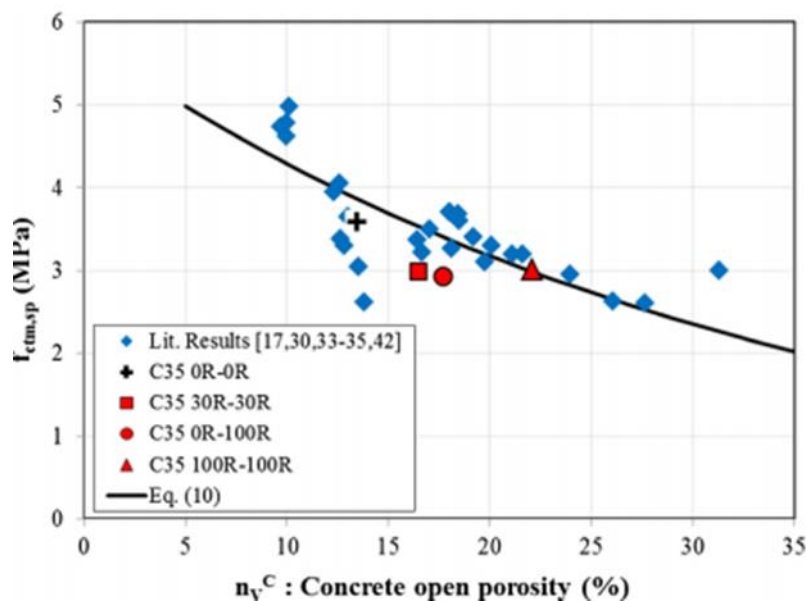


Figure 1.12 : la résistance à la compression par rapport à la porosité ouverte du béton

Chandrasekaran Palanisamy et al '2022' [8] ont conduit une étude sur l'effet d'utilisation de sable de déchet de marbre et déchet de granite sur les propriétés rhéologique et des propriétés mécanique du béton autoplaçant. L'étude est portée sur trois mélanges : un béton autoplaçant conventionnel et d'autres avec un taux de remplacement de 25% du sable avec celui de marbre et de granite.

Leurs résultats montrent que l'utilisation de 25% de marbre et de granite donne des résultats satisfaisant concernant les propriétés rhéologiques. Pour ce qui est des performances mécaniques, l'utilisation de déchet marbre et granite améliore considérablement la résistance que ce soit à la compression, traction par fendage et la flexion.

Comme le démontre la figure 13, l'utilisation du sable de marbre et granite aboutit en une résistance à la compression, traction par fendage et la flexion plus élevée que le conventionnel et où un maximum de performance est atteint avec l'usage de sable en granite.

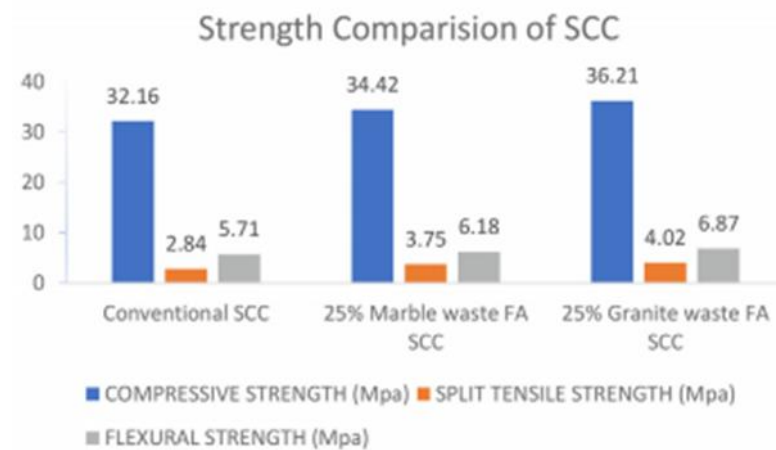


Figure 1.13 : comparative des propriétés mécaniques du BAP

Chapitre 2 : matériaux utilisés et protocole expérimental

2.1. Introduction :

Le béton de chaussée à base de granulats de granite recyclé présente un comportement rhéologique et mécanique complexe qui résulte d'une interaction complexe entre ses différents composants. C'est pour quoi nous allons d'abord étudier les matériaux utilisés dans cette étude en présentant leurs caractéristiques chimiques et physiques. Nous indiquons également les diverses approches d'essais employées .

2.2. Caractérisation des matériaux :

2.2.1. Ciment:

Un ciment Portland CEM II /A-L 42.5 R a été utilisé dans tous les mélanges. Ce ciment de couleur grise, provient de cimenterie de Biskra. Il est composé de :

- 80 à 94 % de clinker.
- 6 à 20 % de calcaire.
- 0 à 5 % de constituants secondaires.



Figure 2.1 : Ciment Biskria CEM II/A-L 42.5 R [10]

2.2.2. Granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leur granulométrie (distribution dimensionnelle des grains). Ils sont désignés par le couple d/D avec d, la dimension inférieure du granulat et D, sa dimension supérieure.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons routiers sont les sables, les gravillons. Elles ne sont donc pas à conseiller. Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2000kg/m³ et légers si elle est inférieure à 2000 kg/m³. Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration. Dans le présent travail, nous avons utilisé deux types de granulats :

- **Granulats naturels** : le granulat naturel désigne un matériau granulaire formé par la désagrégation naturelle des roches, utilisé principalement dans le secteur construction. Ces granulats comprennent des particules de différentes tailles, telles que le sable, le gravier les cailloux, et les pierres concassées.

Trois classe granulaire de gravier calcaire concassé ont été employé 3/8, 8/15 et 15/25. Comme granulat fin, un sable alluvionnaire provenant d'Oued M'zi a été utilisé.



Figure 2.2 : Gravier naturel 8/15



Figure 2.3 : Gravier naturel 15/25



Figure 2.4 : Gravier naturel 3/8

Tableau 2.1 : Les propriétés des granulats naturel

Fraction		3/8	8/15	15/25
Masse volumique	Apparente	1.38	1.31	1.31
	Absolue	2.58	2.58	2.74
Coefficient d'absorption		0.72%	0.66%	3.09%
Dureté		22%	24%	21%

♦ **Granulat recyclée :**

Les granulats recyclé sont ceux de granite, ce dernier proviens des chutes de rénovation, décoration et de l'industrie de granite, les déchets de granite ont était récupérer pour être recyclé en granulat pour être utilisé dans le béton de chaussée.

Le granite récupéré en forme de chute laisser comme déchet par les sites de construction à était concassé dans un concasseur de laboratoire puis trié par tamisage pour aboutir au fraction granulaire désirable dont 3/8, 8/15 et 15/25, ainsi que les déchets issue du processus de concassage sont utiliser comme sable. Enfin les agrégats sont lavée pour se débarrasser de la poussière issue du concassage qui peut augmenter le taux de fines dans le béton si laissé.

Ré-cap de la Procédure de préparation des matériaux

Étape 1 Récupération des déchets de granite	Étape 2 Concassage du granite	Étape 3 Trié et tamisage des différentes classes	Étape 4 Nettoyage et lavage des granulats
---	-------------------------------------	--	---

Tableau 2.2 : Les propriétés des granulats recyclé de granite

Fraction		3/8	8/15	15/25	Sable
Masse volumique	Apparente	1.279	1.238	1.242	1.479
	Absolue	2.77	2.70	2.70	2.70
Coefficient d'absorption					
Dureté		35%	27%	23%	

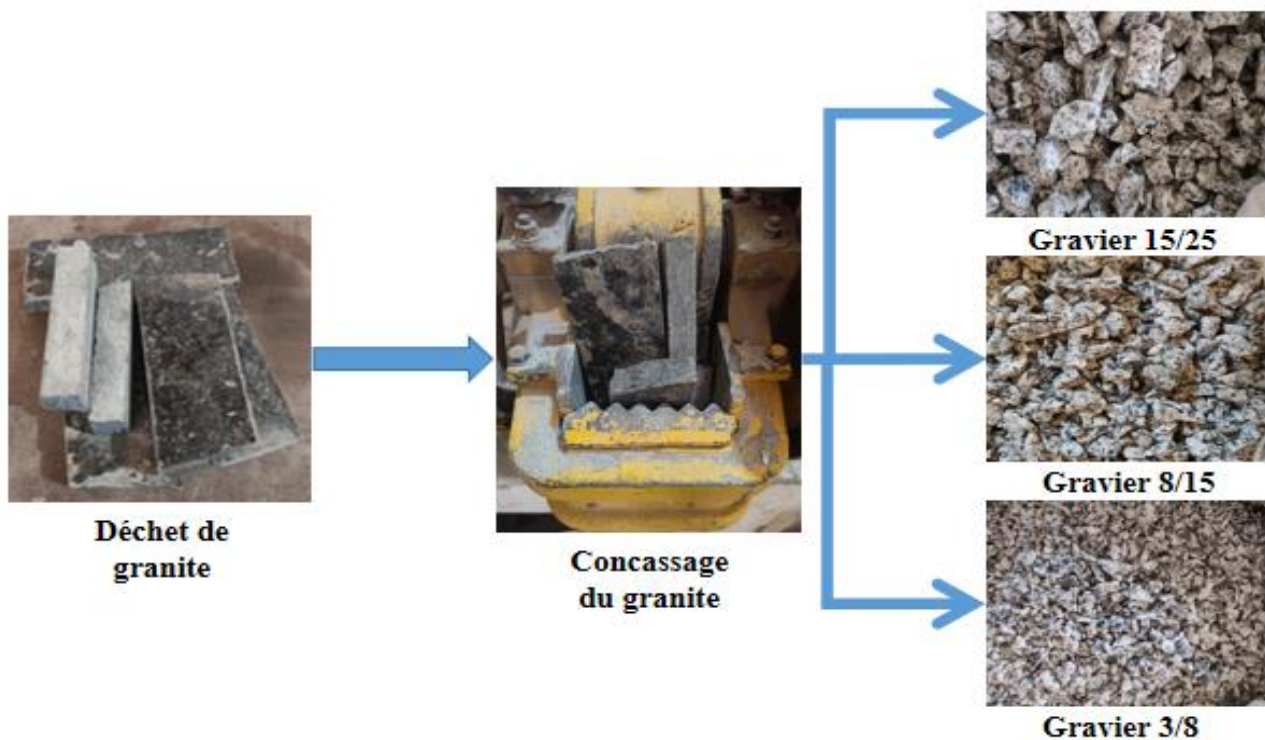


Figure 2.5 : Processus de préparation des granulats de granite recyclé

2.2.3. Sable :

La qualité du sable a une influence primordiale à tout point de vue. Elle influence directement l'ouvrabilité, la durabilité et la résistance du béton. Le gros sable de rivière 0/2 à 0/4 ayant un module de finesse supérieur à 2,4 est le sable pour béton le plus approprié pour les revêtements routiers.

La norme NBN EN 12620 précise également les directives pour les sables ; celles applicables aux bétons routiers sont reprises aux cahiers des charges. On retiendra essentiellement la granularité et la variabilité de la granularité ainsi que la teneur en fines. Cette dernière doit être inférieure à 3%. D'une manière générale, un bon sable pour béton possède les caractéristiques reprises à la figure 5. Le béton de route est, quant à lui, caractérisé par une teneur en sable relativement faible. Un surcroît de sable augmente en effet le besoin en eau et peut donner lieu à un béton moins dense et moins durable.

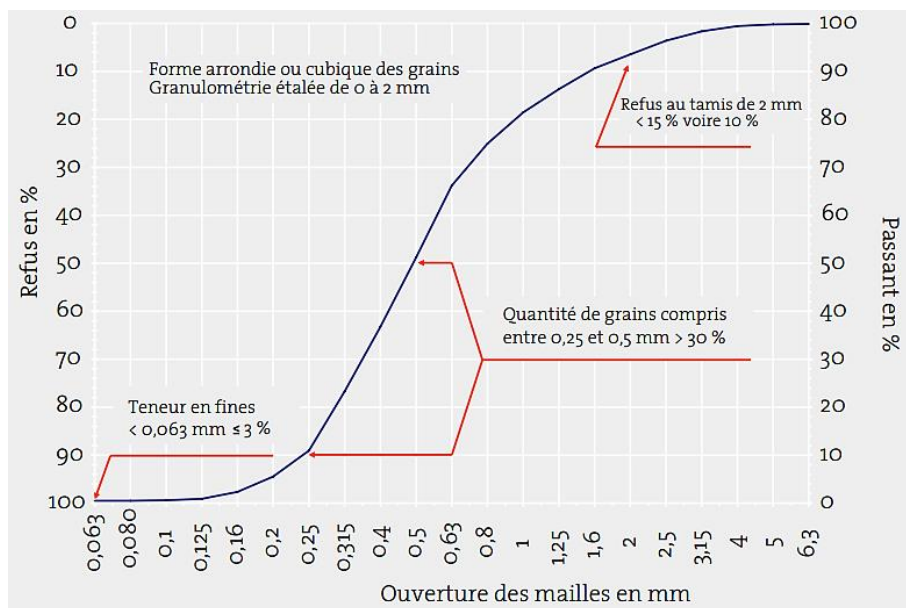


Figure 2.6 : Caractéristiques granulométriques d'un bon sable pour béton

Dans cette étude on à utiliser deux types de sable :

- ✓ Un sable alluvionnaire a été extrait de l'oued M'Zi (région de Laghouat)
- ✓ Un sable de granite a été extrait par broyage du granite

Tableau 2.3 : Les propriétés du sable

Fraction		0/5
Masse volumique	Apparente	1.58
	Absolute	2.7
Absorption		0.84%
Module de finesse		2.35

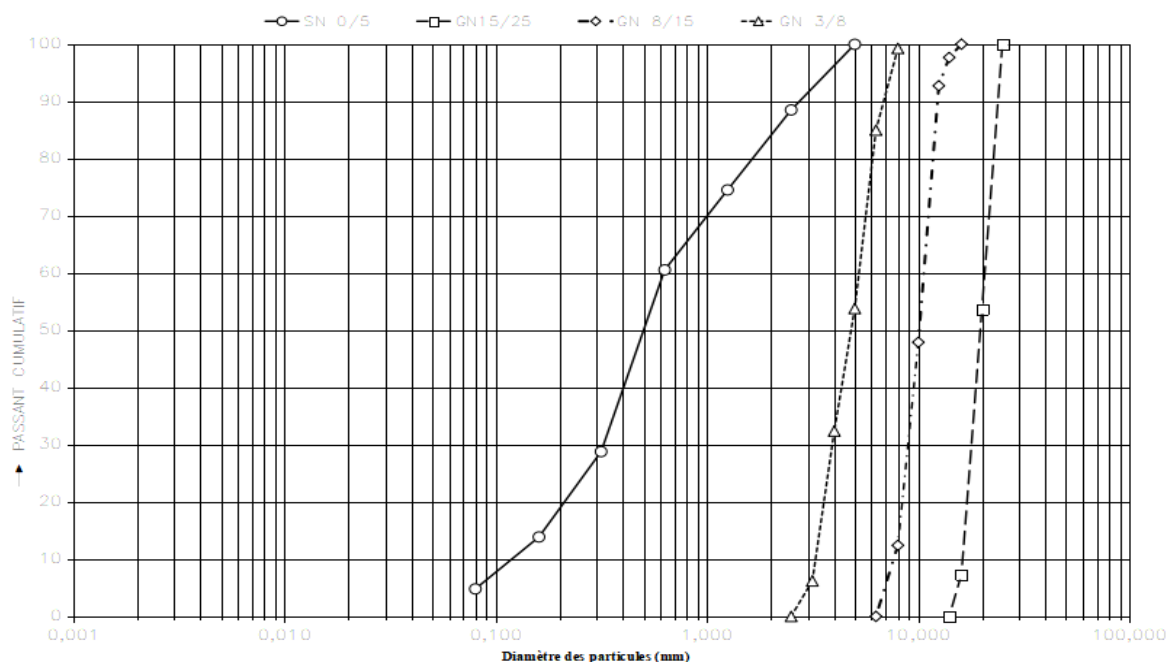


Figure 2.7 : L'analyse granulométrique des granulats naturel et du sable alluvionnaire

2.2.4. Fibres métalliques :

Les fibres métalliques à base d'acier au carbone offrent des propriétés de résistance à la traction plus élevée, un meilleur indice de fragilité à froid et une plus faible ténacité et ductilité.

Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour résister à la traction ainsi leur comportement est semblable au treillis soudé, due à la faible résistance du béton à la traction, des renforts pour en résister s'impose. Dans le domaine routier les fibres métalliques ont la capacité de contrer le retrait qui est l'un des principaux problèmes que le béton de chaussée en est sollicité et donc limite considérablement les fissurations.

Les fibres métalliques en acier inoxydable Melt Extract (ME) sont fabriquées en différents alliages, longueurs et diamètres. Parmi les plus courants figurent les alliages ME304, ME310, ME330 et ME446

Dans ce cas on utilise les deux types suivants :

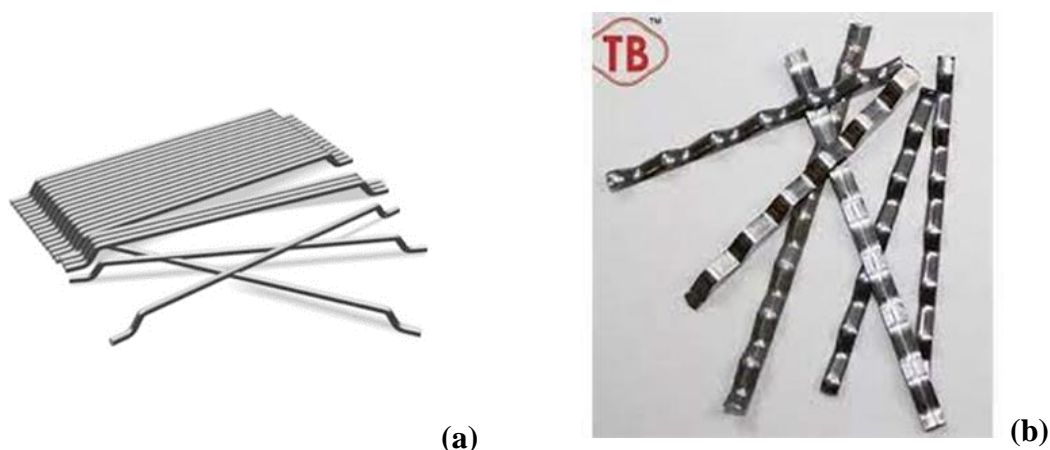


Figure 2.8 : Les fibres métalliques employées : a) Fibre N1 , b) Fibre N2

Tableau 2.4 : Caractéristiques des fibres utilisées [9-10]

Propriétés	Fibre N1	Fibre N2
Longueur (mm)	50	50
Diamètre (mm)	1	3
Ratio d'aspect	50	16.66
Résistance à la traction (MPa)	> 1100	600
Module d'élasticité (MPa)	210000	

2.2.5. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant ; le mouillage des granulats et la facilité de mise en œuvre du béton. L'eau utilisée pour la préparation de différents mélanges du béton est celle du robinet.

2.3. Formulation du Béton chaussée :

La composition d'un béton consiste à déterminer les quantités (en litres ou en kilogrammes) de granulats (sables et graviers), de ciment et d'eau nécessaire à mettre pour obtenir un mètre cube de béton. Deux critères essentiels doivent guider cette étude : l'ouvrabilité. c-à-d la facilité de mise en œuvre du matériau et la résistance mécanique à la compression. Ces critères sont en fonction de la nature de l'ouvrage et de l'élément de l'ouvrage à réaliser. De nombreuses méthodes de formulation du béton sont

proposées par des chercheurs spécialistes tels que la méthode de Bolomey, De Faury, De Dreux-Gorisse et bien d'autres.

2.3.1. Formulation selon la méthode Faury :

Cette méthode est venue en 1941 compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury donne des bétons comportant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront une résistance mécanique supérieure au bétons Bolomey correspondants.

A. Particularités de la méthode :

La théorie de Caquot exprime que la loi de granulation est une loi en fonction de $\sqrt[5]{D}$, c'est pour cela que Faury adopte une échelle des abscisses graduées en $\sqrt[5]{D}$.

Pour le diamètre des grains $< \frac{D}{2}$ parle à des grains fins et moyens.

Pour le diamètre des grains $> \frac{D}{2}$ parle à des grains gros.

B. Courbe optimale :

Ce n'est plus un segment de droite ; mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut définir : l'origine, l'extrémité et le point de brisure.

C. Origine :

Point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0065 mm, on représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis et sur l'axe des ordonnées

le % des tamisât cumulés en volume absolu.

D. Extrémité :

point d'abscisse D et d'ordonnée 100.

• point de brisure :

abscisse $D/2$; ordonnée $Y_{D/2}$ donnée par la formule

$$Y_{D/2} = A + 17.8 \sqrt[5]{D_{max}} + \frac{B}{\left(\frac{R}{D}\right) - 0.75}$$

Tel que :

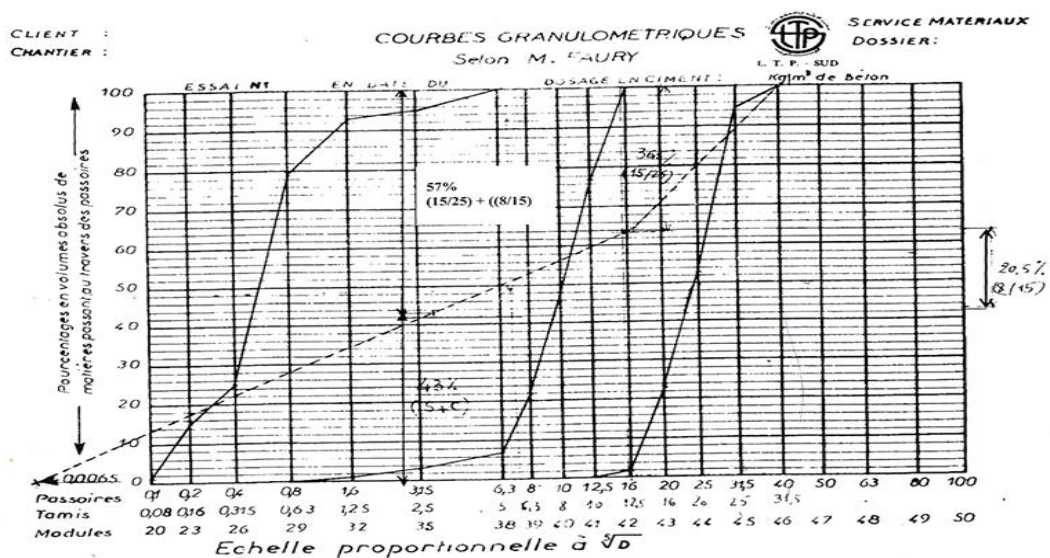
A : Coefficient dépend de la nature des granulats (roulés, concassés) et la mise en œuvre de coulage (se choisit dans le tableau au-dessous Tableau 5).

B : Varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou

Tableau 2.5: valeurs de A (relative à la formulation)

	sables et graviers roulés	Sables roulés et graviers concassés	Sables et graviers concassés
Consistance très fluide sans serrage	>32	>34	>38
Consistance fluide faible serrage	30-32	32-34	36-38
Consistance molle Serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme Serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme Serrage puissante	24-26	26-28	30-32
Serrage exceptionnellement puissante	<22	<24	<28

Figure 2.9 : Courbe granulométriques selon M.faury



2.4. Procédure de malaxage :

Le malaxage du béton de chaussée est une étape cruciale pour obtenir un mélange homogène et de bonnes caractéristiques mécaniques

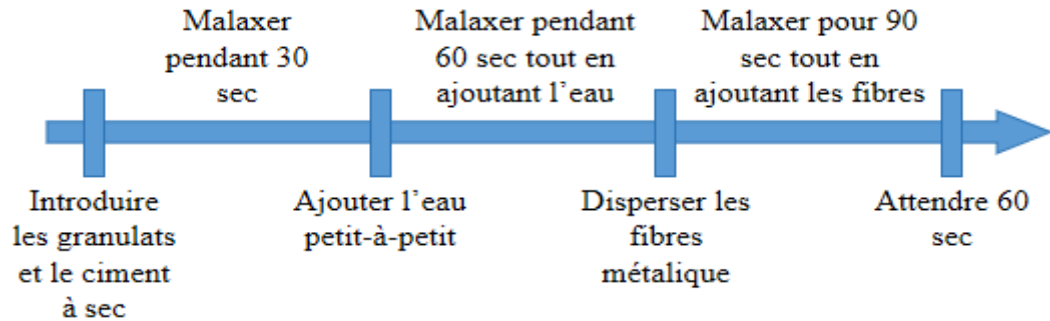


Figure 2.10 : Mode de malaxage

Mode opératoire détaillé :

Étape 1 : En premier lieu il faut assurer d'humidifier la bétonnière en l'essuyant avec une petite quantité d'eau, puis on introduit les agrégats secs tels que le sable, les granulats naturels et les granulats recyclés (comme le granite) et aussi le ciment.

Lancez le bétonnage pour une durée de 30 secondes.

Étape 2 : Ensuite faudra ajouter progressivement l'eau totale de gâchage pendant une minute entière tout en continuant tout en malaxant. Afin d'obtenir un mélange ferme et homogène.



Figure 2.11 : phase de bétonnage

Étape 3 : Après l'ajout d'eau de gâchage, on passe aux fibres. Les fibres risquent toujours de s'emmêler aussi appelé «Fiber balling», donc pour éviter ceci on disperse manuellement les fibres pendant le malaxage, le tout pendant 90 secs.

Étape 4 : Après la troisième étape, laissez le mélange pendant une minute dans le mixeur.



Figure 2.12 : échantillon de béton frais

2.5. Expérimentation :

2.5.1 Essais sur béton frais :

A. Essai d'affaissement :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est une méthode utilisée pour mesurer et contrôler la fluidité du béton frais. Aussi appelé "slump test", cet essai permet de déterminer la consistance du béton, qui est essentielle pour sa maniabilité.

Voici comment il fonctionne :

Matériel requis :

- Le cône d'Abrams : un moule en métal tronconique (dimensions : $D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm).
- L'entonnoir de remplissage pour faciliter le remplissage du cône.
- Le plateau support en métal pour poser le cône pendant le remplissage.

- Une tige de piquage en acier (16 mm de diamètre, 60 cm de long) pour compacter le béton.
- Une potence en acier avec une règle graduée pour mesurer l'affaissement du béton.
- Une main écope et une truelle.

Mode opératoire :

- Après avoir humidifier le cône et le plateau, on place le cône sur le plateau et le maintenir bien en place.
- Remplir le cône en trois couches, en piquant chaque couche 25 fois avec la tige de piquage.
- Lors du piquage de la 2ème et 3ème couche, la tige doit pénétrer légèrement la couche sous-jacente.
- Après avoir piqué la couche supérieure, retirer l'entonnoir et araser la surface de béton avec la truelle.
- Mesurer l'affaissement du béton à l'aide de la potence.

Cet essai est couramment utilisé par les producteurs de béton et les entreprises de construction pour contrôler la qualité du béton.

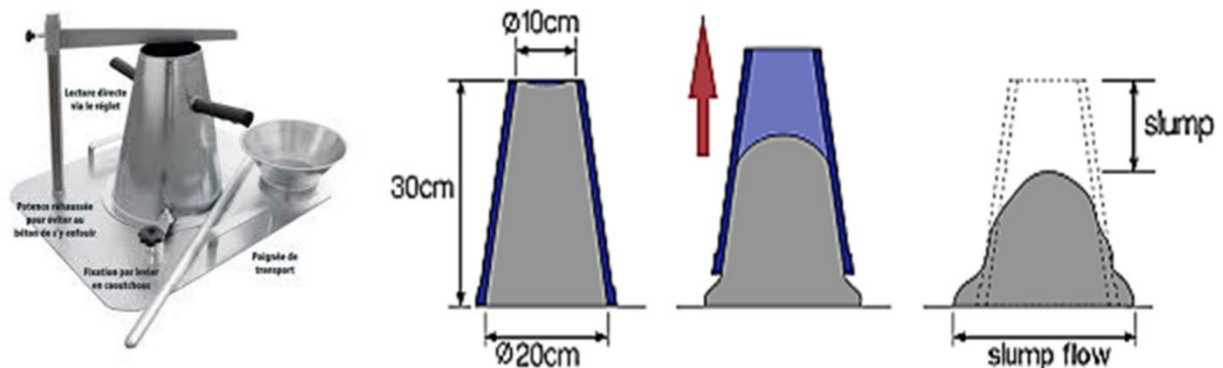


Figure 2.13 : Le cône d'Abrams et son utilisation [11]

Tableau 2.6 : Les classes de maniabilité avec le cône d'Abrams

Plasticité	Ferme	Plastique	Très-plastique	Fluide	Très fluide
intervalle	1 à 4cm	5 à 9cm	10 à 15cm	16 à 21cm	≥22cm



Figure 2.14: Essai d'affaissement au cône d'Abrams

2.5.2. Coulage et démoulage des éprouvettes :

Les éprouvettes envisagé pour cette étude sont des spécimens cubiques de 15x15cm et des cylindre de 16Ø32cm où les moules sont soigneusement huilé pour garantir une extraction facile du béton.

Après la confection du béton on procède au essais à l'état frais (évaluer l'affaissement), juste après on passe au moulage des éprouvette.

Les éprouvettes cubiques sont fait de deux couches qu'on vibre pendant 10 secs, pour se qui est des cylindrique on fait trois couche qu'on vibre pour 10 secs chacune, enfin on traite la surface des éprouvette pour assuré une bonne surface de libre et sans irrégularité.

Le démoulage des spécimens et après 24h du coulage pour assurer la prise et la bonne adhérence béton.



Figure 2.15 : Spécimens préparés

2.5.3. Condition de cure :

Après le démoulage les éprouvettes ont été conservées dans une chambre humide à une température de 20 °C et humidité relative supérieure ou égale à 80% pendant 28 jours.

2.5.4. Essais sur béton durci :

Le béton développe ces performances mécaniques et physique avec le temps, où il atteint 90% de sa résistance après 28 jours de son confection, pour cela ce matériau nécessite des contrôles de qualité, où ces propriétés physiques et mécaniques sont évalués avec des essais spécifiques que se soit destructif effectués dans les laboratoires de contrôle de qualité ou des essais non-destructifs qui se tiennent sur site (in-situ).

A. Résistance à la compression :

Le béton est très utilisé dans le domaine de la construction pour sa résistance à la compression, de ce fait lors de son confection on vise toujours à garantir une certaine résistance qui varie selon son domaine d'usage donner ainsi des classes de béton.

La résistance à la compression est déterminée en évaluant la charge maximale qu'il peut supporter avant sa rupture, on utilise une presse de béton pour effectuer l'essai où le principe de fonctionnement est de solliciter petit-à-petit l'éprouvette de béton avec une force croissante jusqu'à l'écrasement de cette dernière aussi appelé essai d'écrasement ainsi on se retrouve avec la force maximale qu'il a supporté avant rupture pour déterminer sa résistance.



Figure 2.16 : Essai de compression

B. Résistance à la traction par fendage

La détermination de la résistance à la traction du béton est une tâche compliqué d'où des essais alternatives à la traction direct sont utilisé, dont l'essai de traction par fendage aussi appelé 'essai brésilien'. L'essai consiste à la détermination de la force maximale que l'éprouvette cylindrique peut supporter avant de se rompre, ainsi on peut évaluer la résistance du béton à la traction. L'essai consiste une force verticale tout le long du cylindre avec un support parallèle pour causer un effort de traction orthogonal à celui de compression comme démontré dans la Figure 2.17.



Figure 2.17 : Dispositif de l'essai de traction par fendage

C. Vitesse d'auscultation sonique (VAS) :

L'essai VAS est un essai de contrôle de qualité non-destructif effectuer principalement sur site pour vérifier la qualité du béton, où sont principe repose sur le fait que les ondes ultrasoniques se propage plus efficacement dans des milieux dense et compacte. En effet, la vitesse de ces ondes se propageant dans le béton peut donner une idée claire sur la compacité de ce dernier ainsi de déterminer si y a présence de fissurations ou de vide dedans qui nuise à la résistance à la compression de ce dernier, car la résistance du béton est proportionnel à sa compacité, tant que la compacité augmente la résistance augmente avec et l'inverse.



Figure 2.18 : Essai d'auscultation sonique sur béton

D. Essai au scléromètre :

L'essai est tout comme le VAS, il est apprécié sur site pour sa rapidité et simplicité pour évaluer la qualité du béton. Le principe est de projeter une masse pour ensuite évaluer la réponse du béton suite au rebondissement de la masse indiquant un indice de rebondissement qui donner une idée claire sur la qualité du matériau.



Figure 2.19 : Essai de contrôle de qualité au scléromètre

Chapitre 3 : Analyse et discussion des résultats

3.1. Introduction

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats acquis lors des essais expérimentaux ainsi que leur analyse et discussion. Nous commençons par les essais réalisés à l'état frais pour contrôler la maniabilité du béton, on passe ensuite aux essais réalisés à l'état durcis pour vérifier la performance mécanique de différentes compositions.

3.2. Propriétés à l'état frais :

3.2.1. Composition des mélanges :

L'étude est menée sur 7 mélanges de béton, un mélange de référence comptant que des granulats naturels (BGN) ensuite des mélanges de béton fibrés de deux types de fibres métalliques (FM1 et FM2) ainsi qu'à certains taux de remplacement des granulats naturels par ceux recyclés (déchets de granite) de 10, 20 et 30% comme montré dans le tableau 3.1.

3.2.2. Maniabilité :

Le critère de maniabilité est le premier paramètre à optimiser, d'où un essai d'affaissement au cône d'Abrams est mené en premier temps sur le mélange BGN de référence suivi du reste des mélanges fibrés contenant des granulats de granite recyclés (GGR). La Figure 3.1 présente les résultats d'affaissement des différents mélanges où on constate que les mélanges présentent un affaissement qui varie entre 1.5 et 2.5 cm à l'exception des mélanges contenant 20% de granulats recyclés qui présentent un affaissement de 4.5 et 5 cm pour les deux types de fibres FM1 et FM2 respectivement. La maniabilité est dite ferme ainsi répondant aux recommandations où les bétons de chaussée doivent avoir une consistance ferme et homogène.

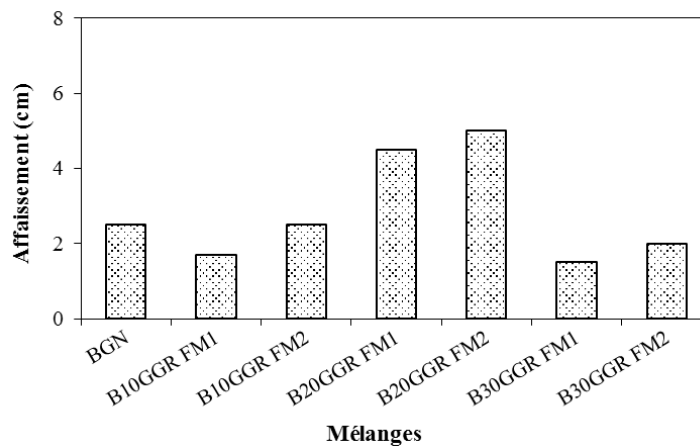


Figure 3.1 : Résultats d'affaissement des différents mélanges

Mélange	% GGR	Ciment (Kg)	Fibre (%)	Fibre (g)	Sable (Kg)	G15/25 (Kg)	G 8/15 (Kg)	G3/8 (Kg)	Eau (l)	GGR 15/25 (Kg)	GGR 8/15 (Kg)	GGR3/8 (Kg)
BGN	0	3,500	0,00	0,000	7,670	7,560	1,470	2,090	1,890	0	0	0
B10GGR - FM1	10		1,00	78,500		6,804	1,323	1,881	1,901	0,756	0,147	0,209
B20GGR - FM1	20		1,00	78,500		6,048	1,176	1,672	1,913	1,512	0,294	0,418
B30GGR - FM1	30		1,00	78,500		5,292	1,029	1,463	1,924	2,268	0,441	0,627
B10GGR - FM2	10		1,00	78,500		6,804	1,323	1,881	1,901	0,756	0,147	0,209
B20GGR - FM2	20		1,00	78,500		6,048	1,176	1,672	1,913	1,512	0,294	0,418
B30GGR - FM2	30		1,00	78,500		5,292	1,029	1,463	1,924	2,268	0,441	0,627

Tableau 3.1 : Compositions des différents mélanges

3.3. Performances à l'état durcis :

3.3.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression des différentes compositions est évaluée sur des spécimens cubiques de 15*15*15 cm à 28 jours où les résultats sont illustrés dans la Figure 3.2. l'analyse de cette figure nous permet de tirer les constatations suivantes :

- ◆ La résistance à la compression varie entre 28.8 et 36 MPa.
- ◆ Le béton de référence présente une résistance de 33.5 MPa.
- ◆ Le béton contenant 20% de granulats recyclés et fibres FM1 (B20GGR FM1) présente la meilleure résistance à la compression.
- ◆ La substitution des granulats naturels à 10% provoque une diminution de la résistance par-rapport au béton de référence.
- ◆ La présence des fibres FM1 dans le mélange contenant 10% des granulats de granite contribuer à diminuer légèrement la résistance par comparaison aux fibres FM2, alors qu'un effet contradictoire a été noté dans les mélanges incorporant 20 et 30% de granulats de granite.

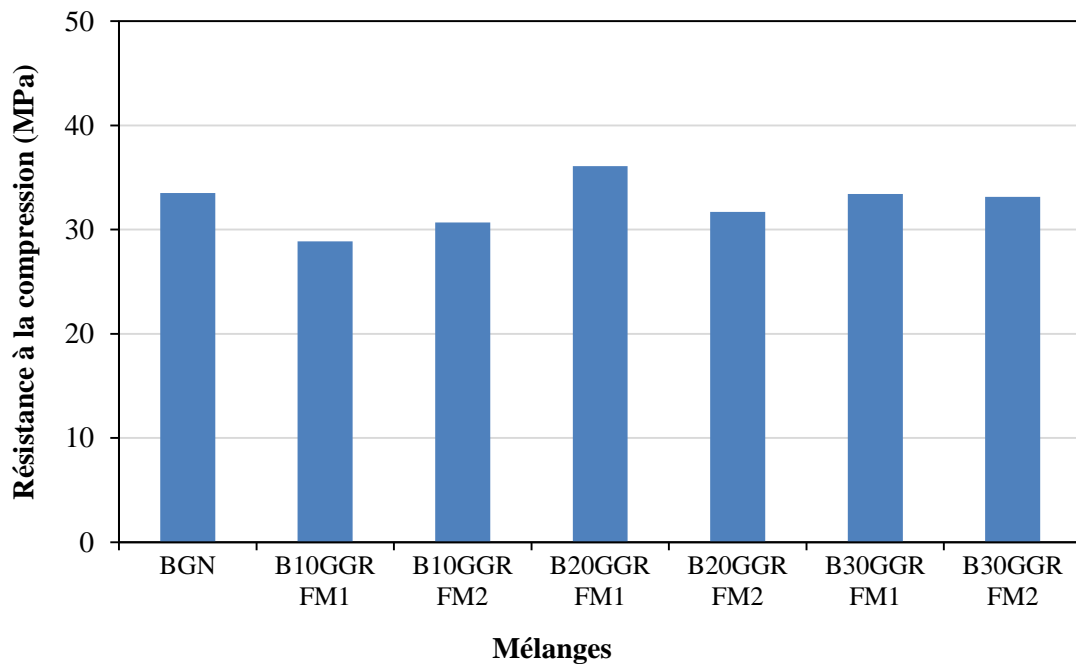


Figure 3.2 : La résistance à la compression du béton de chaussée fibré à base de granulats recyclés de granite

3.3.2. Résistance la traction par fendage :

La résistance à la traction par fendage est réalisée sur des éprouvettes de 16Ø32 cm à l'âge de 28 jours, les résultats des différents mélanges sont présentés dans la Figure 3.3. Selon les résultats obtenus :

- ◆ La résistance à la traction par fendage varie entre 2.3 à 2.88 MPa.
- ◆ Le mélange de référence BGN présente une résistance de 2.51 MPa à la traction par fendage.
- ◆ Les mélanges de béton fibré avec les fibres FM2 présentent des résistances supérieures par comparaison aux fibres FM1.
- ◆ Les compositions à base de granulats recyclés de granite présentent une résistance relativement supérieure par comparaison à la composition de référence (BGN) à l'exception de celle incorporant 20 % de granulats recyclé et des fibres FM1 (B20GGR FM1).
- ◆ La meilleure résistance à la traction est développée par le mélange contenant 10 % de granulats recyclés et fibres FM1 et FM2 (B10GGR FM1 et B10GGR FM2).

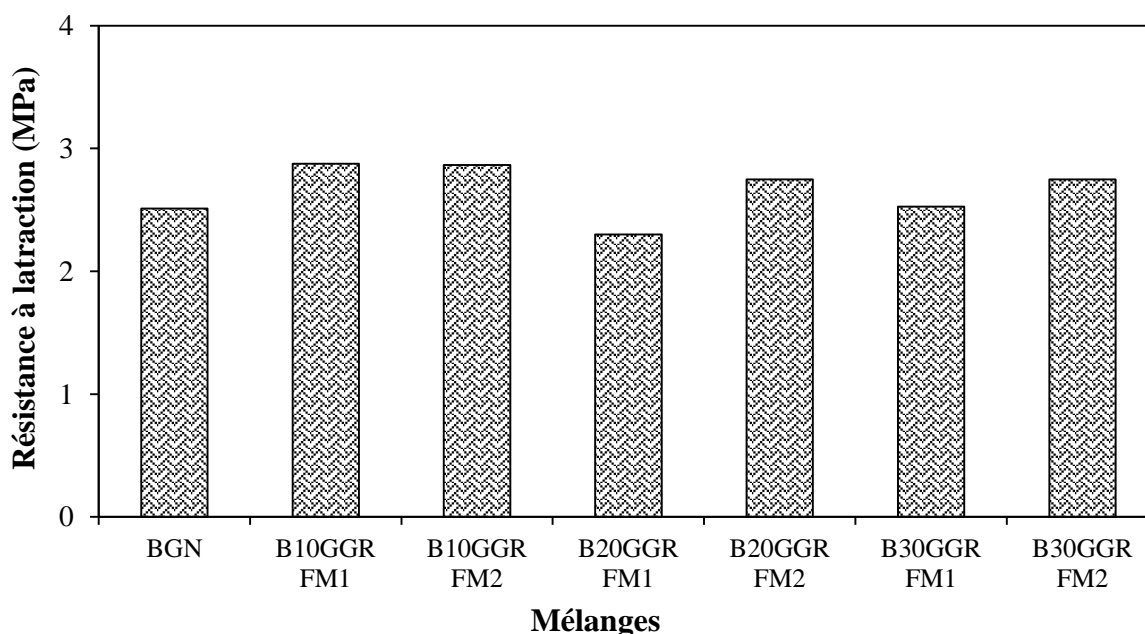


Figure 3.3 : La résistance à la traction par fendage du béton de chaussée fibré à base de granulats recyclé de granite

3.3.3. Vitesse d'auscultation sonore (VAS) :

La vitesse d'auscultation sonore est menée sur des éprouvettes cubiques de 15*15*15cm âgées de 28 jours, les résultats de l'essai sont présentés dans la Figure 3.4. D'après les résultats obtenus, nous constatons ce qui suit :

- ◆ La vitesse d'auscultation sonore varie entre 4444.4 et 4807.6 m/s.
- ◆ Le mélange BGN de référence montre une vitesse de 4807.6 m/s.
- ◆ La vitesse d'auscultation diminue légèrement avec l'incorporation des granulats de granite recyclés et des fibres métalliques.
- ◆ Selon le tableau 3.2, le mélange B10GGR FM1 présente une bonne qualité (densité et homogénéité) avec une vitesse de 4444.4 m/s, alors que les autres mélanges présentent une excellente qualité de béton.
- ◆ Le mélange de référence est celui qui présente la meilleure qualité en termes de densité et homogénéité avec une vitesse de 4807.6 m/s.

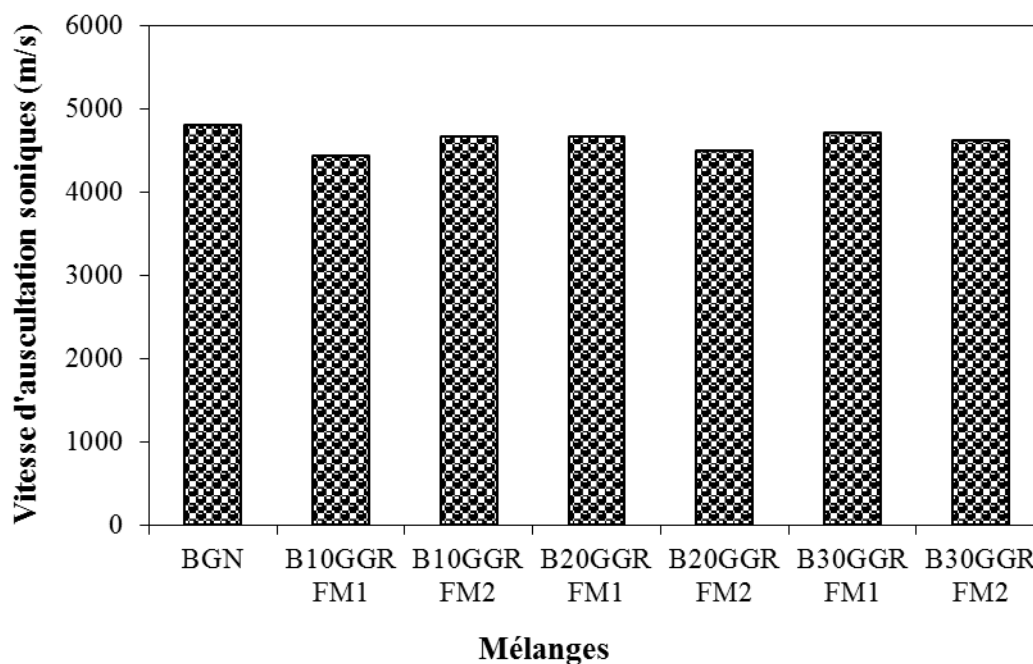


Figure 3.4 : La vitesse d'auscultation sonore des différentes compositions du béton de chaussée fibré à base de granulats recyclés de granite

Tableau 3.2 : La classification de qualité du béton selon la vitesse des ondes ultrasonique

Vitesse des ondes ultrasonique	Qualité du béton
> 4500 m/s	Excellente
De 3500 à 4500 m/s	Bonne
De 3000 à 3500 m/s	Assez bonne
De 2000 à 3000 m/s	Médiocre
< 2000 m/s	Très mauvaise

3.3.4. Indice sclérométrique (rebondissement) (IR) :

Une série d'essai sclérométrique est mené sur les éprouvettes cubique de 15*15*15 cm avant leurs écrasement, ainsi la moyenne de l'indice de rebondissement des différentes prises de chaque spécimen est convertie en résistance à la compression selon les courbes de la Figure 3.5. Les valeurs de la résistance à la compression issue de l'indice de rebondissement de chaque compositions est illustrée sur la Figure 3.6.

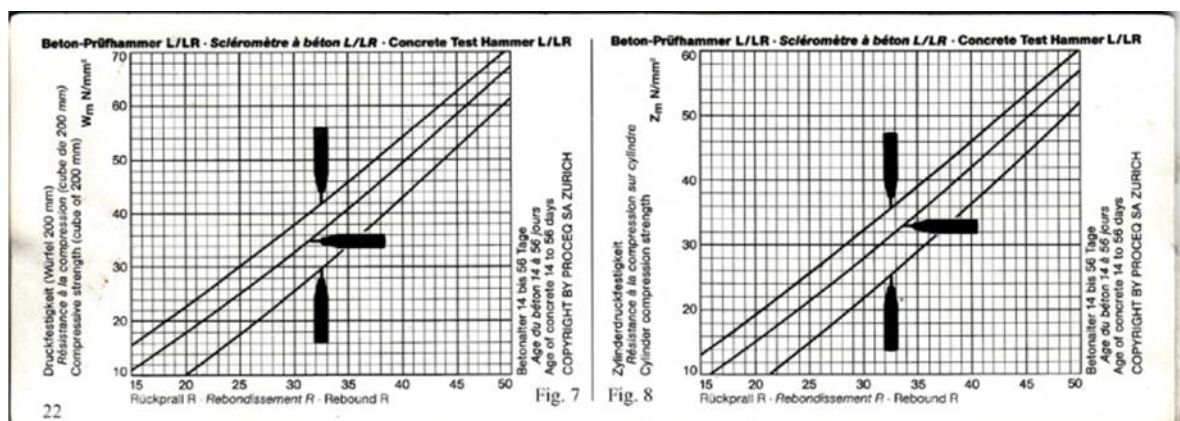


Figure 3.5 : Courbe de la résistance à la compression selon l'indice de rebondissement des spécimens cubique et cylindrique respectivement.

La résistance à la compression des différents mélanges varie entre 26 MPa et 30.5 MPa. Le mélange BGN présente une résistance de 26 MPa. L'addition de granulats recyclé et des fibres améliore légèrement la résistance à la compression où les mélange

B20GGRFM1 et B30GGRFM1 atteignent une résistance de 30 MPa qui est la meilleure parmi les différentes compositions testées, alors que ceux contenant des fibres FM2 présentent une résistance supérieure par environ 1 à 2 MPa par rapport au mélange de référence BGN.

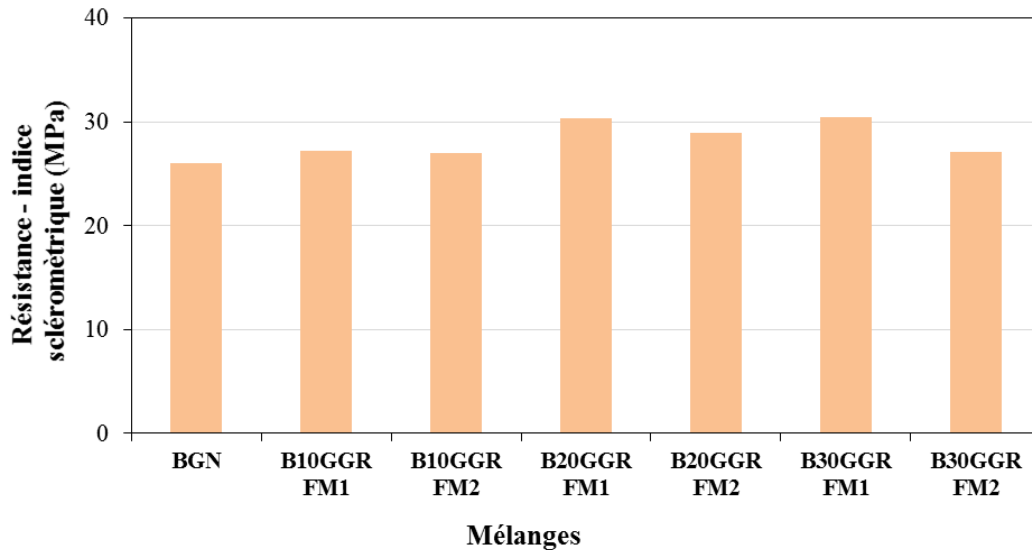


Figure 3.6 : La résistance à la compression selon l'indice sclérométrique du béton de chaussée fibré à base de granulats de granite recyclés

Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude a été réalisé dans le but de formuler un béton de chaussée à faible impact environnemental. Des granulats de déchets de granite recyclés ont été utilisés par substitution partielle aux granulats naturels. Deux types de fibres métalliques produisent localement ont été incorporé afin d'améliorer la résistance de béton en flexion. Les résultats issus de cette étude permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La consistance recommandée (ferme) des bétons de chaussée est atteint sans l'emploi d'un adjuvant plastifiant avec des valeurs d'affaissement entre 1.5 et 4.5 cm.
- L'incorporation de 20% de granulats de granite recyclé permet d'atteindre une très bonne résistance à la compression de 36 MPa.
- L'utilisation des fibres FM2 ainsi que l'incorporation des granulats recyclés augmentent la résistance à la traction par fendage par comparaison aux fibres FM1 et le mélange témoin.
- L'ajout de fibres et la substitution des granulats naturels avec ceux recyclés diminuent légèrement la vitesse d'auscultation sonore,
- Toutes les mélanges de béton présentent une qualité bonne à excellente en termes de densité et d'homogénéité.
- Selon l'indice de rebondissement, une légère augmentation de résistance à la compression du béton de surface est observée lors de l'ajout des fibres et des granulats recyclés.

À partir des résultats expérimental acquis, on déduit que ce matériau constitue une alternative valable aux matériaux conventionnels utilisés dans le domaine de voirie tout en offrant un meilleur compromis entre aspect économique et environnemental.

Références bibliographiques

- Références documentaire :

- [1] Dimensionnement optimal des chaussées rigides, BOUMEHRAZ NADA, 2018.
- [2] FEBELCEM Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, vers une composition optimale des bétons routiers.
- [3] Guide Technique : CHAUSSÉES AÉRONAUTIQUES EN BÉTON HYDRAULIQUE, Février 2000, LCPC.
- [4] caractérisation expérimentale des bétons et mortiers à base de granulats recyclés : Béton de démolition et déchets de briques.
- [5] caractéristiques du béton à base de granulats recyclés étude expérimentale.
- [6] Modélisation du comportement à long terme des bétons de granulats recyclés.
- [7] Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concrete properties.
- [8] Experimental investigation on self-compacting concrete with waste marble and granite as fine aggregate.
- [9] Fiche produit TBW Métal Fibres Ondulées-50.
- [10] Fiche technique MACCAFERRI WIRAND® STEEL FIBRES FOR CONCRETE REINFORCEMENT.

- Références des figures (site web) :

- [1] <https://www.infociments.fr/route/conception-des-voies-et-amenagements-urbains-en-beton>
- [2] <https://geniecivilpdf.com/les-caracteristiques-geometriques-de-la-voie/>
- [3] <https://www.infociments.fr/route/generalites-sur-le-fonctionnement-des-chaussees>
- [4] <https://www.infociments.fr/route/caracteristiques-generales-des-chaussees>
- [5] https://www.shutterstock.com/fr/search/asphalt-concrete-wearing-course?image_type=illustration
- [6] <https://aramtradingllc.com/what-we-offer/>

- [7] <https://www.pepinierecitedesjeunes.com/fc/produits-en-vrac/pierres-gravier/>
- [8] <https://www.ouagadougou.online/produit/gravillons-de-granite/>
- [9] <https://actueco.bycci.fr/2021/03/15/la-filiere-du-verre-recycle-trouve-des-solutions-au-port-de-chalon/>
- [10] <https://grey.biskriaciment.com/>
- [11] <https://blog.certifiedmtp.com/slump-test-table-measure-workability-of-concrete/>