



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : Génie Civil et Architecture

DÉPARTEMENT : Génie Civil

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Habchi Safaa

Bouakaz Dhiyaeddine

DOMAINE : Sciences et technologies

FILIERE : Travaux publics

OPTION : Voies et ouvrages d'art

Thème

**Effet de la pouzzolane naturelle sur les performances de
béton de chaussée à base de granulats de marbre recyclé**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Bederina Madani	Professeur	Président
Hadj aissa Yacine	Maître de conférences B	Examineur
Boukhelkhal Aboubakeur	Maître de conférences A	Rapporteur
Benguit Amar	Maître-assistant A	Co-rapporteur

Promotion : Juin - 2024

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents.

J'espère également que cet humble travail sera

l'accomplissement de leurs désirs bien formulés, leur innombrables sacrifices, même si je ne les paierai jamais assez.

Que Dieu, Tout- Puissant leur accorde santé, bonheur et longue vie.

À tous chers frères, je les remercie pour leur compréhension et leurs encouragements, qui ont été pour moi le principal soutien, et je leur souhaite beaucoup de bonheur et de réussite dans leur vie. Merci pour les bons conseils et le soutien moral qui nous ont beaucoup aidés pendant cette période.

Pour toute ma famille, j'espère qu'elle trouvera, dans cet acte humble, une expression d'amour.

A tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Je voudrais enfin remercier toutes les personnes qui ont cru en nous et qui nous ont donné envie à partir en avant.

A Mes frères HAZEL, ZBARI, BLGASMI, DINE, HADOU, EL GHOTB,

KHADROUN et HABCHI.

A toutes les promos de Master 2,

Sans oublier mes amis et mes frères de la city 2000 LAHOUEL RAMZI, BENDIDA
MOUHAMED et BOUMAAZA NASER EDDINE

Dhiyaeddine

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents.

J'espère également que cet humble travail sera
l'accomplissement de leurs désirs bien formulés, leur innombrables sacrifices, même si je ne
les paierai jamais assez.

Que Dieu, Tout- Puissant leur accorde santé, bonheur et longue vie.

À tous chers frères, je les remercie pour leur compréhension et leurs encouragements, qui ont
été pour moi le principal soutien, et je leur souhaite beaucoup de bonheur et de réussite dans
leur vie. Merci pour les bons conseils et le soutien moral qui nous ont beaucoup aidés pendant
cette période.

Pour toute ma famille, j'espère qu'elle trouvera, dans cet acte humble, une expression
d'amour.

A tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Je voudrais enfin remercier toutes les personnes qui ont cru en nous et qui nous ont donné
envie à partir en avant.

Au promos de Master 2 VOA

À mes amis les plus proches

A ma sœur Rima Cherifi

Safaa

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre reconnaissance envers notre promoteur Monsieur Boukhelkhal Aboubakeur. Nous le remercions pour son aide précieuse, sa grande disponibilité, ses conseils et orientations et sa gentillesse qui nous a permis de mener à bien ce projet de fin d'étude. Nos remerciements vont également à Monsieur Benguit Amar, notre co promoteur pour sa contribution et ses encourageants, tout au long de la préparation de ce travail.

Nous remercions le Professeur Monsieur Bederina Madani de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire de Master. De même Nous adressons nos remerciements à Monsieur Hadj aissa Yacine, d'avoir accepté d'examiner ce projet de fin d'étude et de participer au jury de soutenance.

Nos remerciements vont également au directeur du Laboratoire de Recherches de Génie Civil de l'Université de Laghouat, ainsi que tout le personnel qui a assuré le bon déroulement de la partie expérimentale de ce travail par la mise en disposition des matériaux et appareillage nécessaires.

Nous adressons nos remerciements au directeur du laboratoire des travaux publics de Sud (LTPS-Laghouat) et à son personnel, pour nous avoir donné la facilité de l'accès et la réalisation de certains essais au sein de leur laboratoire.

Nos remerciements s'adressent finalement à nos collègues du département de Génie civil à l'université de Laghouat et à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'achèvement de ce mémoire de Master



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : Génie civil et d'Architecture

DEPARTEMENT : Génie civil

RESUME DE MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Travaux publics

Option : Voies et ouvrages d'art

Thème : Effet de la pouzzolane naturelle sur les performances de béton de chaussée à base de granulats de marbre recyclé

Présenté par : Bouakaz Dhiyaeddine et Habchi Safaa

Encadré par : Boukhelkhal Aboubakeur

Résumé :

L'utilisation de matériaux recyclés dans le béton de chaussée est une pratique croissante visant à améliorer l'impact socio-économique des infrastructures tout en réduisant l'empreinte environnementale. La pouzzolane naturelle, un matériau siliceux et alumineux, est reconnue pour ses propriétés cimentaires. Cette étude examine l'impact de la pouzzolane naturelle sur les performances du béton de chaussée fabriqué à partir de granulats de marbre recyclé.

Des éprouvettes de béton ont été préparées en remplaçant une partie des granulats naturels par des granulats de marbre recyclé 10%,20% et 30%. La pouzzolane naturelle a été ajoutée à différents pourcentages (5% et 15%) en remplacement partiel du ciment. Les propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, vitesse d'auscultation sonique et résistance au scléromètre ont été évaluées.

Les résultats montrent que l'incorporation des granulats de marbre recyclé et de pouzzolane naturelle peut améliorer les performances du béton de chaussée. L'utilisation combinée de 5 % de PZ et 30% de GMR conduit à un béton de haute résistance (~60 MPa). Les valeurs de la vitesse d'auscultation sonique montrent que toutes les compositions testées possèdent de bonnes à excellentes qualités en termes d'homogénéité et de densité.

Mots clés : béton de chaussée, marbre recyclé, poudre de pouzzolane, résistance.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة عمار ثليجي - الأغواط

كلية/معهد: الهندسة المعمارية والهندسة المدنية
قسم: الهندسة المدنية

ملخص مذكرة الماستر

الميدان: : علوم وتكنولوجيا

الشعبة: اشغال عمومية

التخصص: طرق ومنشآت فنية

عنوان المذكرة: تأثير البوزولان الطبيعي على أداء خرسانة الطرقات المكونة من ركام الرخام المعاد تدويره.

تقديم الطالب: بوعكاز ضياء الدين وحبشي صفاء

الأستاذ المؤطر: بوخلخال أبوبكر

ملخص المذكرة:

يعد استخدام المواد المعاد تدويرها في خرسانة الطرقات ممارسة متنامية تهدف إلى تحسين الأثر الاجتماعي والاقتصادي للبيئة التحتية مع تقليل التأثيرات البيئية. يشتهر البوزولان الطبيعي، وهو مادة سيليسية وألومينية بخصائصه الإسمنتية. تبحث هذه الدراسة تأثير البوزولان الطبيعي على أداء خرسانة الرصف المصنوعة من ركام الرخام المعاد تدويره.

تم تحضير عينات الخرسانة عن طريق استبدال بعض الركام الطبيعي بركام الرخام المعاد تدويره. 30%، 20%، 10%. تمت إضافة البوزولان الطبيعي بنسب مختلفة (5% و 15%) ليحل محل الأسمنت جزئياً. تم تقييم الخواص الميكانيكية للخرسانة، مثل قوة الانضغاط، وقوة الشد، سرعة الموجات الصوتية.

أظهرت النتائج أن دمج الرخام المعاد تدويره وركام البوزولان الطبيعي يمكن أن يحسن أداء خرسانة الطرقات. ينتج عن الاستخدام المشترك لـ 5% من البوزولان الطبيعي و 30% من ركام الرخام المعاد تدويره خرسانة عالية القوة (حوالي 60 ميجا باسكال). حسب نتائج الاختبار بالموجات الصوتية لاحظنا أن كل التركيبات المختبرة تتمتع بصفات جيدة إلى ممتازة من حيث التجانس والكثافة.

الكلمات المفتاحية: خرسانة الطرقات، الرخام المرسله، بودة البوزولان، المقاومة.

Table de matières

Dédicaces

Remerciements

Résumé, ملخص

Introduction générale1

Chapitre 1. Revue bibliographique sur le béton de chaussée et les granulats recyclés

1.1. Introduction1

1.2. Généralité sur les chaussées.....1

1.2.1. Les chaussées souples.....1

1.2.2. Les chaussées semi-rigides.....4

1.2.3. Les chaussées rigides.....4

1.3. Béton de chaussée5

1.3.1. Définition5

1.3.2. Composition du béton de chaussée6

1.3.2.1. Ciment6

1.3.2.2. Granulats.....7

1.3.2.3. Eau8

1.3.2.4. Adjuvants8

1.3.2.5. Colorants (pigments)8

1.3.3. Propriétés physiques et mécaniques du béton de chaussée.....8

1.3.3.1. Propriétés physiques8

1.3.3.2. Propriétés mécaniques et durabilité.....9

1.4. Bétons de granulats recyclés :

1.4.1. Définition.....10

1.4.2. Effet des granulats recyclés sur l'ouvrabilité et les propriétés physiques et mécaniques

1.4.2.1. Ouvrabilité	11
1.4.2.2. Propriétés physico-mécaniques et durabilité	11

Chapitre 2. Matériaux utilisés et protocole expérimental

2.1. Introduction.....	14
2.2. Caractérisation des matériaux.....	14
2.2.1 Ciment	14
2.2.2 Pouzzolane naturelle.....	15
2.2.3. Granulats	16
2.2.3.1. Granulats naturels	16
2.2.3.2. Granulats de marbre recyclé.....	17
2.2.5 Adjuvant	19
2.2.6 Eau de gâchage	19
2.3. Formulation	19
2.4. Procédure de malaxage	22
2.5. Expérimentation	23
2.5.1 Essais sur béton frais	23
2.5.2 Coulage, démoulage des éprouvettes	24
2.5.3 Condition de cure	25
2.5.4 Essais sur béton durci	25
2.5.4.1 Résistance à la compression.....	25
2.5.4.2 Résistance à la traction par fendage	26
2.5.4.3 Vitesse d'auscultation sonique (VAS).....	27
2.5.4.4 Essai au scléromètre	28

Chapitre 3. Analyse et discussion des résultats

3.1. Introduction	30
3.2. Analyse et discussion des résultats.....	30
3.2.1. Béton frais.....	30
3.2.2. Béton durci.....	31
3.2.2.1. Résistance à la compression.....	31
3.2.2.2. Résistance à la traction	32
3.2.2.3 Vitesse d'auscultation soniques	33
3.2.2.4 Résistance - indice sclérométrique.....	34
Conclusion générale	36
Références Bibliographiques.....	37

Liste des figures

Figure 1.1. Dégradation des chaussées souples.....	4
Figure 1.2 : Béton de chaussée	6
Figure 1.3. Caractéristiques granulométriques d'un bon sable pour béton.....	7
Figure 1.4 : Granulats de debris de béton.....	10
Figure 1.5 : (a) déchet de verre, (b) sable de verre recyclé.....	10
Figure 1.6. Variation des résistances à la compression des bétons.....	12
Figure 1.7 : Absorption d'eau des bétons à base de granulats de briques et de béton concassé.....	13
Figure 2.1 Ciment utilisé CEM I 42.5 N SR5.....	14
Figure.2.2. Gravieres utilisés 3/8, 8/15, 15/25.....	16
Figure 2.3 : Analyse granulométrique des granulats utilisés	16
Figure 2.4 : Transformation des déchets de marbre en granulat.....	18
Figure 2.5 : Adjuvant type plastifiant	19
Figure 2.1 - Courbe granulaire de référence.....	20
Figure 2.7 : malaxeur utilisé.....	23
Figure 2.8 : (a) cône d'Abrams, (b) mesure de l'affaissement.....	24
Figure 2.12 : compactage du béton.....	24
Figure 2.11 : coulage des moules.....	25
Figure 2.13 : démoulage des éprouvettes.....	25
Figure 2.14 : Essai d'écrasement.....	26
Figure 2. 15: Essai de traction par fendage.....	27
Figure 2.16 : essai d'auscultation sonique.....	27
Figure 2.17: scléromètre.....	28
Figure 2.18 : Grille de mesure sur ouvrage.....	28
Figure 2.19 : essais au scléromètre.....	29

Figure 2.20 : Courbe de transformation unique.....	29
Figure 3.1. Résultats d’essai d’affaissement.....	30
Figure 3.2. Évolution de la résistance à la compression à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.	32
Figure 3.3. Évolution de la résistance à la traction par fendage à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.....	33
Figure 3.4. Évolution de la vitesse d'auscultation sonore à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.....	34
Figure 3.5. Évolution de la résistance sclérométrique à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.....	35

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques du béton à base de granulats naturels, mixtes et recyclés...	2
Tableau 2.1 : Propriétés chimique du ciment.....	14
Tableau 2.2 Propriété physiques et mécaniques du ciment.....	15
Tableau 2.3 : Composition chimique	15
Tableau 2.4 : Propriété des granulats utilisés.....	18
Tableau 2.5 : Valeur de A.....	22
Tableau 2.6. Classe d'affaissement du béton.....	24
Tableau 3.1. Compositions des bétons de chaussées étudiées.....	30
Tableau 3.2 : qualité du béton en fonction de la vitesse du son.....	34

Introduction générale

Le développement de tout pays passe par la réalisation d'infrastructures adaptées. L'Algérie compte l'un des réseaux routiers les plus importants du Maghreb et d'Afrique, d'une longueur de 133 741 km, le réseau routier est en plein développement grâce au programme de modernisation des transports routier et ferroviaire qui après la réalisation de l'Autoroute Est-Ouest de (1 216 km) prévoit la réalisation de l'autoroute des hauts plateaux de (1 330 km), et la réalisation de 19 000 km de nouvelles routes, ainsi la finition de la route transsaharienne (nord-sud). Ce réseau routier est complètement réalisé en béton bitumineux. Toutefois le problème le plus fréquent de ces chaussées souples se manifeste d'abord par l'apparition de déformations permanentes du type *orniérage* à grand rayon, flaches et affaissements qui détériorent les qualités du profil en travers et du profil en long. Ces déformations croissent avec le trafic cumulé, en gravité (amplitude verticale) et en étendue, selon la qualité moyenne de la structure et la dispersion des caractéristiques mécaniques du corps de chaussée et du sol. Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une dégradation par fatigue, sous la forme de fissures d'abord isolées puis évoluant peu à peu vers un faïençage à maille de faibles dimensions. L'eau s'infiltrant alors plus facilement provoque une accélération des phénomènes : épaufrures aux lèvres des fissures avec départ de matériaux, puis formation de nids de poule. Si la chaussée était alors laissée sans entretien, elle évoluerait très rapidement vers une destruction complète.

Les chaussées rigides peuvent remédier à ce problème en fournissant un support rigide, durable et résistant au trafic routier lourd. Un intérêt croissant pour les routes en béton se développe dans le monde entier, tant pour la réalisation des grands axes routiers et autoroutiers que pour les voiries urbaines ou pour des applications plus modestes, mais très nombreuses, telles que les routes secondaires et la voirie rurale, forestière ou de lotissement.

La présente étude expérimentale a pour but de démontrer que l'utilisation du béton dans les routes peut constituer une solution durable pour notre pays, et ce, en respectant les trois piliers de la construction durable : l'environnement, l'économique et le social. Pour arriver à ce but

nous avons préféré de remplacer les granulats naturels par des granulats de marbre recyclé avec l'incorporation de la pouzzolane naturelle par substitution partielle au ciment.

Le présent mémoire se subdivise en trois chapitres avec une introduction générale et conclusion générale. Le premier chapitre comprend des généralités sur le béton de chaussée, les différents types de chaussée ainsi que sur les bétons à base de granulats recyclés. Le deuxième chapitre est consacré à présentation des matériaux utilisés et leur caractérisation, formulation du béton de chaussée et les essais réalisés sur bétons frais et durci. Le dernier chapitre est consacré à la présentation, analyse et discussion des résultats obtenus.

CHAPITRE I

**Revue bibliographique sur les bétons
de chaussée et les bétons de granulats
recyclé**

1.1. Introduction

Le béton constitue une excellente solution dans le cadre de revêtements routiers et autoroutiers ou encore d'aménagements urbains. La route en béton utilise efficacement les ressources naturelles pendant l'entièreté de son cycle de vie. Elle contribue à l'amélioration des conditions de déplacement et rend des services à l'ensemble de la société en termes de mobilité, de sécurité et de confort. De plus, de par l'absence d'entretien, elle est économique.

1.2. Généralité sur les chaussées :

Les caractéristiques générales des chaussées reposent sur le trafic, élément essentiel de leur dimensionnement. Il correspond à un nombre de passages de véhicules sur une période déterminée. Le poids des véhicules est transmis à la chaussée, sous forme de pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques. Les matériaux situés sous les roues subissent alors des efforts, très différents suivant que passe une voiture ou un camion. Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue en général trois (03) types de structures [1] à savoir :

- les chaussées souples ;
- les chaussées semi-rigides ;
- les chaussées rigides.

1.2.1. Les chaussées souples

Les chaussées souples sont encore appelées chaussées flexibles. C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent, sont traitées aux liants hydrocarbonés.

La couche de fondation et la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée. Elle se déforme de 1 à 3 mm contre 0 à 0,5 mm pour une chaussée rigide à assise traitée. Elle comporte plusieurs avantages mais aussi des inconvénients à savoir :

Avantages :

- absence de retrait, chaussée continue ;
- module d'élasticité E moyen (1000 à 15000 MPa), structure souple acceptant les déformations et les surcharges accidentelles ;
- dosage en liant faible (3 à 6%), dont un avantage économique.

Inconvénients :

- module d'élasticité variable en fonction de la température et de la durée d'application de la charge donc un risque d'orniérage ;
- sensibilité aux hydrocarbures ;
- résistance à la fatigue moyenne.



Figure 1.1. Dégradation des chaussées souples.

1.2.2. Les chaussées semi-rigides

C'est une structure de chaussée constituée d'une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants (hydrauliques ou hydrocarbonés). Elle est disposée en une couche (base) ou en deux couches (base et fondation).

Avantages :

- Module pratiquement indépendant de la température ($E = 23\,000\text{ MPa}$; Grave-Ciment) ;
- Caractéristiques mécaniques élevées : $R_t = 1,5 \text{ à } 2\text{ MPa}$.

Inconvénients :

- Fissuration du retrait ;
- Impossibilité de réaliser des couches minces (15 cm minimum) ;
- Courbe de fatigue plate (comportement très sensible à un sous dimensionnement ou aux surcharges éventuelles).

1.2.3. Les chaussées rigides

C'est une structure de chaussée constituée de revêtement en béton de ciment. Elle est composée de deux couches en générale à partir du sol support à savoir :

- une couche de fondation ;
- une couche de roulement en béton de ciment.

Dans le cas de chaussée neuve à faible trafic ($trafic \leq 50Pl/j/sens$), la couche de fondation n'est pas nécessaire. Il existe plusieurs types de structures en béton à savoir :

- les chaussées à dalles courtes non armées et non goudonnées (BC) ;
- les chaussées à dalles courtes non armées et goudonnées et goudonnées (BCg) ;
- les chaussées en béton armé continu (BAC).

Avantages :

- module d'élasticité E élevée, indépendant de la température et de la durée d'application de la charge $E = 35\,000\text{ MPa}$ donc absence d'orniérage.
- résistance à la compression très élevée
- résistance à la traction appréciable : $R_{tf} = 2,7 \text{ à } 3,3\text{ MPa}$

Courbe de fatigue relativement plate : résistance élevée à la répétition des charges

Inconvénients :

- retrait hydraulique et thermique : Susceptibilité à la fissuration, donc nécessité de réaliser des joints, d'où la discontinuité.
- taux de liant élevé : 12 à 15% d'où un handicap économique.

1.3. Béton de chaussée

1.3.1. Définition :

Appelé aussi béton routier ou béton de routes, le béton de chaussée (BC) est un béton destiné à la réalisation de couche de roulement de chaussées fortement sollicitées. Ce béton, destiné aux applications de construction routière, se distingue du béton pour ouvrages par leur traitement (placement) et par la charge (e.a. gel-dégel, charge dynamique) auxquels ils sont soumis. Cette technique permet de réaliser des couches d'assises et de roulements dédiées aux chaussées et plateformes fortement sollicitées : fort trafic, Poids lourds, trafic d'engins spéciaux & exposition à des climats exigeants.

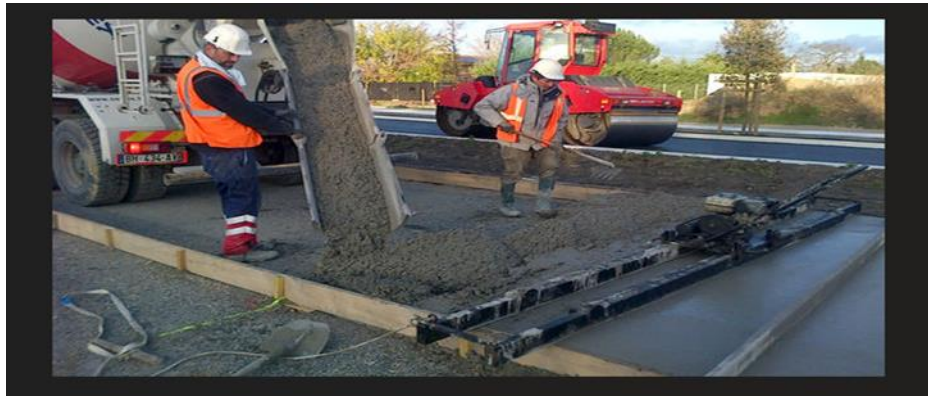


Figure 1.2. Béton de chaussée

1.3.2. Composition du béton de chaussée :

Les mélanges de béton routier sont constitués de gravillons ou de gravier, de sable, de ciment, d'eau et d'adjuvants, qui se transforment en un matériau durable en durcissant le ciment. La composition du béton pour une chaussée est un facteur crucial qui détermine ses propriétés mécaniques et sa performance à long terme. Elle doit être soigneusement définie en fonction des exigences du projet, du type de chaussée et des conditions locales. Les constituants principaux du béton pour chaussée sont :

1.3.2.1. Ciment :

Le ciment est la matière qui lie les granulats et assure la résistance du béton. Le type de ciment utilisé dépend des caractéristiques souhaitées pour le béton, telles que la résistance à la compression, la durabilité et la prise. Les types de ciments les plus couramment employés pour la confection de bétons routiers sont les ciments de classe de résistance 42,5 (N ou R). Le choix est laissé entre un ciment Portland (CEM I) ou un ciment de haut fourneau contenant au maximum 65 % de laitier (CEM III/A). Du ciment de classe de résistance 52,5 est parfois utilisé pour des applications particulières comme le béton à durcissement rapide utilisé, par exemple, pour les réparations.

1.3.2.2. Granulats :

Les granulats représentent environ 70 à 80 % du volume total du béton. Ils comprennent des graviers et du sable de différentes tailles et granulométries. La nature et la qualité des granulats influencent la résistance, la durabilité et l'ouvrabilité du béton.

la pierre naturelle concassée ainsi que le gravier concassé sont autorisés comme gravillons pour la fabrication de bétons routiers. L'emploi des gravillons roulés est à éviter pour les revêtements soumis à un trafic automobile. En effet, les matériaux de rivière ou de mer sont à surface lisse ou légèrement rugueuse ce qui est défavorable à l'obtention d'une bonne rugosité de la surface de la route. De plus, la rugosité de la pierraille concassée est favorable à la bonne adhérence au mortier. Cet avantage se traduit par une meilleure résistance en traction du béton et par un meilleur accrochage des gravillons en surface des bétons soumis à usure par frottement.

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 ci-après.

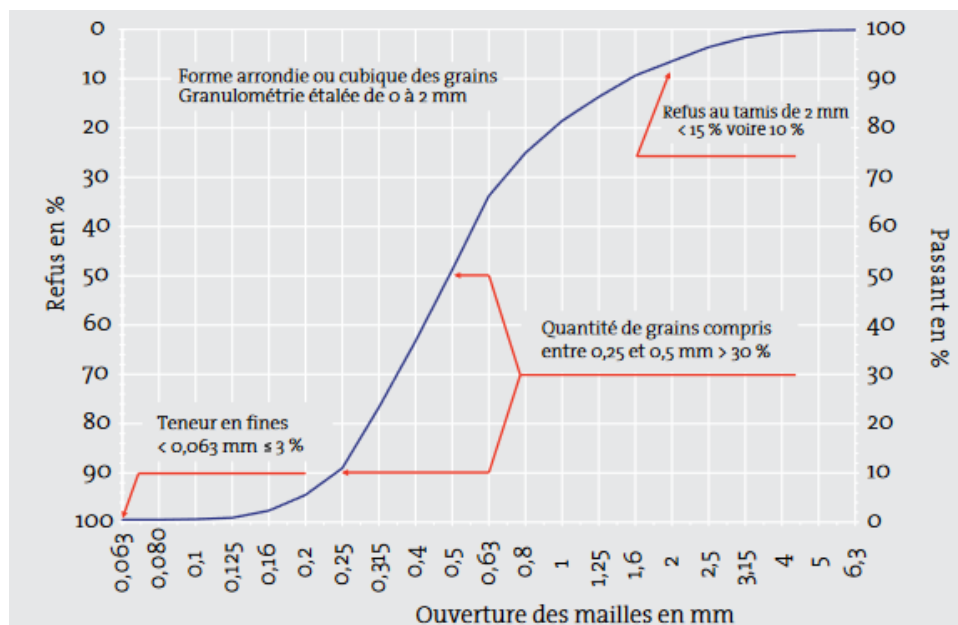


Figure 1.3. Caractéristiques granulométriques d'un bon sable pour béton

1.3.2.3. Eau :

L'eau de gâchage est indispensable au béton. Elle est nécessaire à l'hydratation du ciment et à la mise en œuvre du béton. La quantité d'eau utilisée doit être soigneusement contrôlée pour obtenir un béton de consistance adéquate et de bonnes propriétés mécaniques. En quantité trop élevée, elle devient cependant un de ses pires ennemis : un excès d'eau augmente le risque de fissuration du béton et diminue sa résistance ainsi que sa durabilité.

L'eau de gâchage doit être propre. Elle doit être exempte de toute matière susceptible d'influencer la prise et le durcissement du béton ou de corroder les armatures.

1.3.2.4. Adjuvants :

Des adjuvants peuvent être ajoutés au béton pour améliorer ses propriétés, telles que la fluidité, le temps de prise, la résistance à l'air et la durabilité. Les plastifiants/réducteurs d'eau, les super- plastifiants/hautement réducteurs d'eau et les entraîneurs d'air sont les principaux adjuvants utilisés dans les bétons routiers. Exceptionnellement, des régulateurs de vitesse de prise (retardateurs et accélérateurs) peuvent être utilisés. Ces adjuvants doivent être conformes à la norme EN 934-2.

1.3.2.5. Colorants (pigments)

Une coloration du béton est parfois prescrite pour des raisons esthétiques ou de sécurité (aménagements urbains, pistes cyclables, îlots directionnels, etc.). Il existe deux types de colorants : les colorants organiques et les colorants minéraux (naturels ou de synthèse).

1.3.3. Propriétés physiques et mécaniques du béton de chaussée

Le béton utilisé pour les chaussées doit posséder des propriétés physiques et mécaniques spécifiques pour garantir sa durabilité et sa performance à long terme sous des charges de trafic importantes et des conditions climatiques variées.

1.3.3.1. Propriétés physiques

a) Densité :

La densité du béton pour chaussée est généralement comprise entre 2300 et 2500 kg/m³. Une densité élevée assure une résistance accrue et une meilleure durabilité.

b) Porosité :

La porosité du béton représente le volume d'air et d'eau présent dans le matériau. Une porosité trop élevée peut affecter la résistance et la durabilité du béton.

c) Ouvrabilité :

L'ouvrabilité du béton est sa capacité à être mis en œuvre et compacté facilement. Une bonne ouvrabilité est essentielle pour obtenir une surface lisse et uniforme.

d) Retrait-gonflement :

Le béton a tendance à se rétrécir en durcissant, ce qui peut entraîner la formation de fissures. Le retrait peut être minimisé en utilisant des adjuvants et en contrôlant le processus de cure.

1.3.3.2. Propriétés mécaniques et durabilité

a) Résistance à la compression :

La résistance à la compression est la capacité du béton à résister à des charges qui tentent de l'écraser. La résistance à la compression minimale pour le béton de chaussée est généralement de 35 MPa.

b) Résistance à la flexion :

La résistance à la flexion est la capacité du béton à résister à des charges qui le plient. La résistance à la flexion est importante pour les chaussées en béton car elle permet de prévenir la fissuration et la rupture.

c) Module d'élasticité :

Le module d'élasticité du béton représente sa rigidité. Un module d'élasticité élevé permet au béton de supporter des charges de trafic importantes sans se déformer excessivement.

d) Résistance à l'usure :

La résistance à l'usure du béton est sa capacité à résister à l'abrasion et à l'érosion causées par le trafic. Une bonne résistance à l'usure est importante pour prolonger la durée de vie de la chaussée.

e) Durabilité :

La durabilité du béton pour chaussée fait référence à sa capacité à résister aux effets de l'environnement, tels que les cycles de gel-dégel, les produits chimiques et l'eau salée. Une bonne durabilité est essentielle pour garantir une performance à long terme.

1.4. Bétons de granulats recyclés :

1.4.1. Définition :

Les bétons de granulats recyclés sont des types de béton dans lesquels une partie ou la totalité des granulats utilisés proviennent de matériaux recyclés, tels que des débris de construction, du béton concassé ou de l'asphalte recyclé. Cette approche vise à réduire la quantité de déchets envoyés en décharge et à réduire la demande de matériaux vierges, tout en offrant des performances adéquates pour diverses applications de construction. Les granulats recyclés sont nombreux, on cite :

- Granulats de debris de beton
- Granulats de debris de maconneries
- Granulats de debris hydrocarbonnes
- Granulats de debris mixtes
- Granulats de debris de marbre et granite
- Granulats de debris de verre

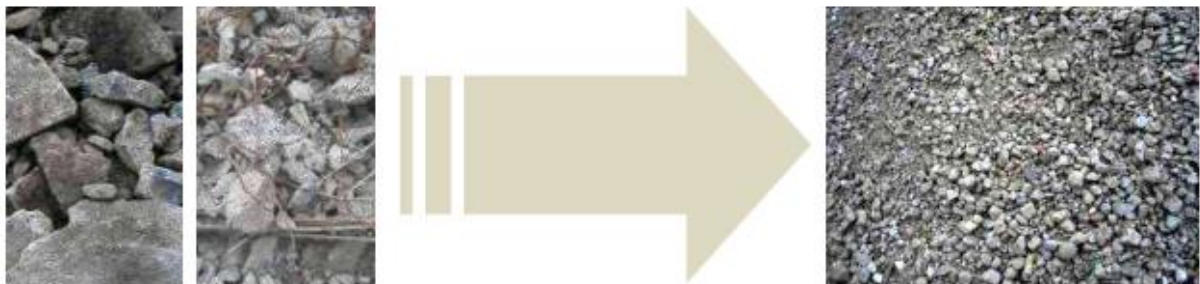


Figure 1.4. Granulats de débris de béton



Figure 1.5. (a) déchet de verre, (b) sable de verre recyclé

1.4.2. Effet des granulats recyclés sur l'ouvrabilité et les propriétés physiques et mécaniques

Les bétons de granulats recyclés sont un domaine d'étude intéressant. De par leurs propriétés spécifiques, la présence de granulats recyclés dans les bétons influence à la fois les propriétés du matériau à l'état frais comme durci.

1.4.2.1. Ouvrabilité

Plusieurs paramètres des granulats recyclés peuvent influencer l'ouvrabilité des bétons conçus, toujours en la réduisant. La maniabilité est d'autant plus faible lorsque le taux de substitution des granulats recyclés est supérieur à 50 % [2]. La demande en eau est fortement augmentée lorsque que l'ouvrabilité du matériau doit être importante. Ainsi, Mukai et al [3] ont trouvé que l'augmentation de 5% d'eau dans les bétons contenant des graviers recyclés et des sables naturels permettraient d'avoir des propriétés à l'état frais sensiblement identiques à celles des bétons de granulats naturels ; dans le cas des granulats recyclés à 100%, une quantité de 15 % est requise.

1.4.2.2. Propriétés physico-mécaniques et durabilité :

L'utilisation de granulats recyclés, provenant du concassage de bétons, peut entraîner des propriétés mécaniques supérieures ou égales à celles des granulats naturels. Cependant, il est important de noter que les granulats recyclés présentent souvent des caractéristiques moins favorables, telles qu'une absorption plus élevée et une résistance à l'abrasion plus faible. Pour compenser ces différences, une quantité importante d'adjuvant (environ 3 %) peut être ajoutée au béton de granulats recyclés. Cela permet de maintenir l'objectif de résistance égale tout en améliorant la maniabilité du béton.

La figure 1.4 présente l'évolution des résistances à la compression de béton ordinaire et béton recyclé. L'analyse de la figure 4, montre une cinétique d'évolution des contraintes des bétons étudiés au cours du temps pratiquement identique. Cependant, les valeurs de résistances du béton à granulats naturels sont supérieures à celles du béton à granulats recyclés. Cette différence de l'ordre de 16% à 28 jours passe à 18% à 45 jours. Cet écart de résistance est attribué à la porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés, la mauvaise interface granulats/liant (figure 5) ainsi que qualité même des granulats du béton de recyclage.

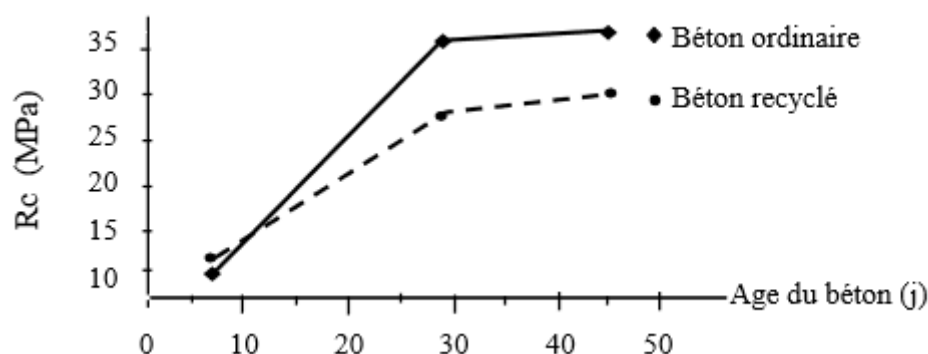


Figure 1.6. Variation des résistances à la compression des bétons.

A des échéances de 28 jours, les bétons de granulats recyclés présentent des faibles densités qui varient en fonction des conditions environnementales et qui ne dépendent pas uniquement de la nature des granulats utilisés (Tableau 1.1).

De même, la porosité augmente aussi en fonction du milieu de stockage des bétons, il est constaté que cette porosité augmente lorsque les bétons sont conservés à l'air (de 2 à 7% pour les bétons de granulats et de 13 % pour les bétons de granulats naturels).

Tableau 1.1. Caractéristiques du béton à base de granulats naturels, mixtes et recyclés.

Conditions de stockages	Affaissement [mm]	Densité [kg/m ³]		Résistances mécaniques [MPa]		Porosité [%]	
		Conditions de conservation					
		Eau	Air	Eau	Air	Eau	Air
NAC1	65	2345	2315	42,6	37,7	11,2	12,6
NAC2	45	2440	2380	54,8	47,7	7,2	8,1
MAC	55	2370	2305	43,3	37,8	12,5	14,2
RAC1	50	2195	2155	31,5	29,5	22,6	23,1
RAC2	90	2205	2160	35,4	34,2	22	22,8
RAC3	50	2225	2190	39,4	38,1	19,7	21,1

NAC : béton de granulat naturel

MAC : béton mixte constitué de granulats naturels et de granulats recyclés

RAC : béton de granulats recyclé

Kenai et Debieb [4] ont étudié l'effet des granulats de béton et de brique recyclés sur la quantité d'eau absorbée (fig 1.5). On remarque que les mélanges contenant des granulats de brique absorbent davantage l'eau que ceux contenant des granulats de béton. Ils ont conclu que la perméabilité à l'eau du béton recyclé, augmente en fonction du pourcentage de substitution en granulats recyclés. Les bétons recyclés à base de granulats de briques concassées sont un peu plus perméables que les autres bétons recyclés. Ils présentent une pénétration à l'eau qui peut atteindre le double de celle du béton de référence. La perméabilité

à l'eau des bétons recyclés est fort influencée par la nature et le pourcentage des granulats recyclés.

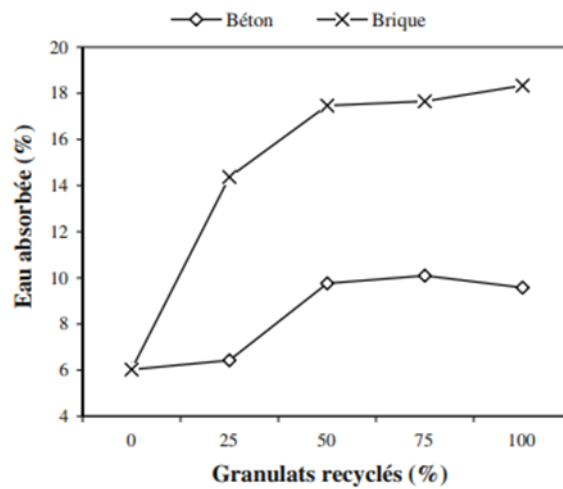


Figure 1.7 : Absorption d'eau des bétons à base de granulats de briques et de béton concasse

Les granulats recyclés ont une porosité élevée qui est à l'origine de leur forte capacité d'absorption. Afin de pallier ce problème tout en maintenant la quantité d'eau efficace constante au sens de la norme, il est parfois préconisé d'augmenter la quantité d'eau totale [5-10].

En résumé, bien que les granulats recyclés puissent présenter certaines limitations, des ajustements adéquats et l'utilisation des additions pouzzolaniques, d'adjuvants ou des fibres appropriés permettent d'obtenir des bétons de qualité comparable à ceux utilisant des granulats naturels.

2.1. Introduction

Le comportement rhéologique et mécanique du béton de chaussée à base de granulats de marbre recyclé est le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, pour cette raison, nous allons dans un premier temps caractériser les matériaux utilisés dans cette étude en présentant leurs propriétés chimiques et physiques. Nous décrivons également les différentes méthodes d'essais réalisés sur bétons frais et durci.

2.2. Caractérisation des matériaux :

2.2.1 Ciment :

Un ciment de type AL ESSES CEM I 42.5 N SR5, conçu pour résister aux sulfates, a été utilisé pour la confection de différents mélanges. Il est idéal pour les ouvrages en contact avec des milieux agressifs tels que l'eau, le sol et l'air. Ce ciment provient de l'usine d'Amouda Cement à El Baida



Figure 2.1 Ciment utilisé CEM I 42.5 N SR5

Tableau 2.1 : Propriétés chimique du ciment

Propriétés chimique	Valeur moyenne (%)
SO ₃	1.96
SiO ₂	14.61
Al ₂ O ₃	6.05
Fe ₂ O ₃	5.52
CaO	70.61
C ₃ A	5

Tableau 2.2 Propriété physiques et mécaniques du ciment

Propriétés physique et mécanique	Valeur moyenne
Surface spécifique	2657
Masse volumique	3.24/3.22
RC après 2 jours (MPa)	> 10
RC après 28 jours (MPa)	42.5 < R < 62.5
Durée de prise (min)	> 60

2.2.2 Pouzzolane naturelle :

La pouzzolane naturelle est une roche naturelle de composition silico- alumineuse et de texture majoritairement vitreuse généralement d'origine volcanique. Il existe toutefois des pouzzolanes d'origine sédimentaire (Diatomite, radiolarite, Gaize) et des pouzzolanes artificielles (cendres volantes, argiles calcinées, ...). Les pouzzolanes développent par hydratation en présence de chaux des hydrates liants de nature analogue à ceux du clinker. Elles sont reconnues comme constituant principal des ciments autre que le clinker. Le terme pouzzolane tire son nom de Pouzzole, une localité près de Naples en Italie, riche cendres volcaniques issues du Vésuve.

La pouzzolane en poudre est utilisée dans le béton comme un ajout cimentaire actif. Elle améliore les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires et peut servir de granulat pour la confection de béton.

Tableau 2.3 : Composition chimique

Éléments	Valeur moyenne en %
SiO ₂	63.70
Al ₂ O ₃	15.40
Fe ₂ O ₃	8.60
CaO	3.20
MgO	1.75
Na ₂ O	2.83
K ₂ O	1.88
So ₃	0.87
Paf	1.77

2.2.3. Granulats :

2.2.3.1. Granulats naturels :

Les mélanges de béton utilisent principalement des granulats naturels (gravier), c'est un gravier calcaire concassé provenant de Djelfa. Trois classes granulaires ont été utilisées dans ce travail 3/8, 8/15 et 15/25. Dans cette étude on a utilisé un sable alluvionnaire extrait de l'oued M'Zi (région de Laghouat).



Figure.2.2. Gravier utilisés 3/8, 8/15, 15/25

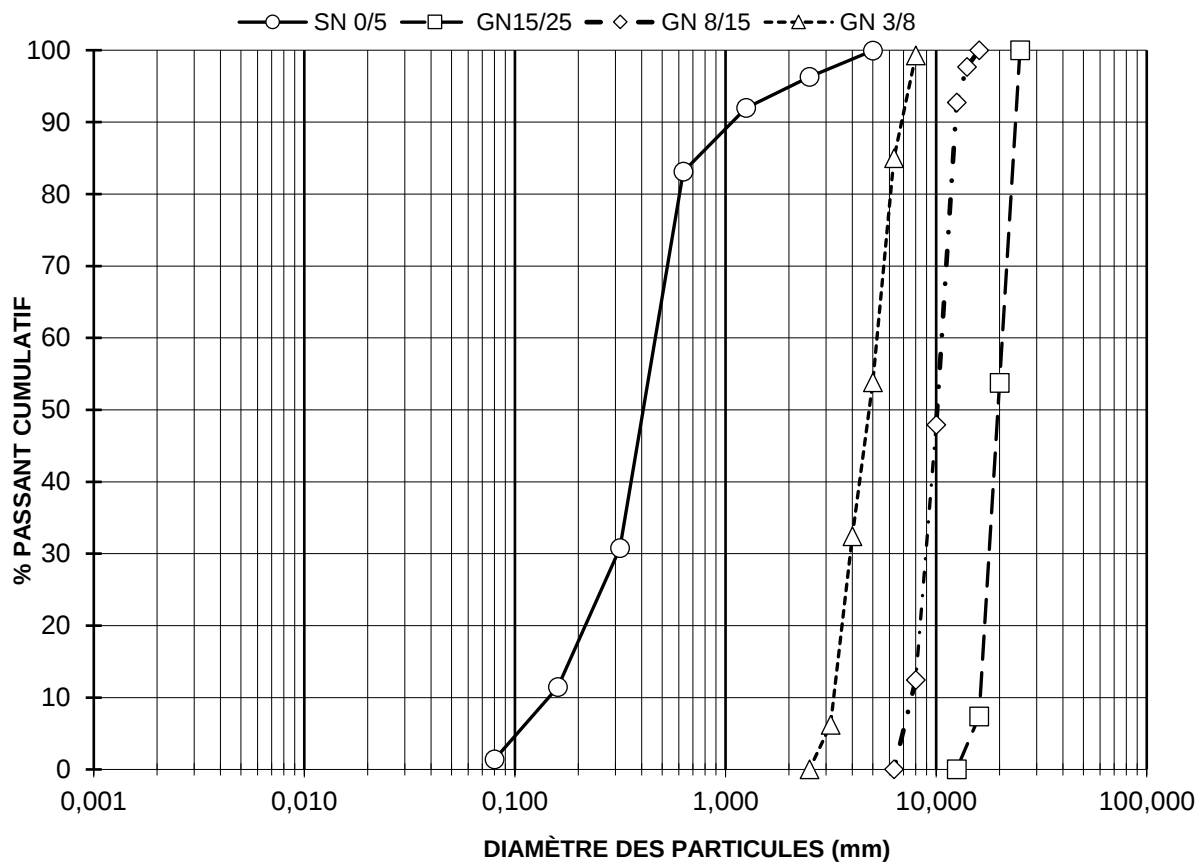


Figure 2.3 : Analyse granulométrique des granulats utilisés

2.2.3.2. Granulats de marbre recyclé :

Le marbre est une pierre naturelle d'origine calcaire qui met des années pour sa formation. Elle est caractérisée par sa beauté, sa grande variété et son aspect lisse et brillant qui font d'elle l'une des roches les plus nobles que puisse exister. Chaque marbre a son originalité de par sa composition et de par de ses couleurs. Le marbre est couramment utilisé pour fabriquer des objets esthétiques aussi bien pour les maisons (revêtements muraux, des dallages, éléments sanitaires), les jardins publics que pour l'aménagement des voies. Lorsque la pierre de marbre est transportée de la carrière vers l'usine, elle est découpée en de petites pierres dépendant des dimensions recherchées. Ces petites pierres sont ensuite façonnées et lustrées de telle manière à obtenir la taille et l'aspect souhaités. Pendant ces opérations une quantité importante de marbre qui représente presque 20% à 30% de la matière première est perdue et souvent rejetée dans la nature [11]. L'utilisation de ces déchets est très bénéfique, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger et conserver les ressources naturelles fortement consommées par l'industrie de béton. Le recyclage des déchets de marbre dans la fabrication des bétons est très avantageux en termes de coût, de durabilité et d'écologie [11].

Le marbre utilisé dans ce travail est issu d'un déchet solide qui a été fourni par la société de marbre et de granite Gueddouda Allal installée à Laghouat. La préparation de marbre comme granulats passe par les étapes suivantes :

- ❖ Craquage le marbre manuellement des morceaux avec un marteau (figure 2.3 a)
- ❖ Concassage des morceaux moyennant (Figure 2.3 b)
- ❖ Le produit final est tamisé au tamis 3,8, 16 mm et 25 mm (figure 2.3 c)
- ❖ Nettoyage des granulats
- ❖ Séchage des granulats



a



b



c

Figure 2.4 : Transformation des déchets de marbre en granulat

Tableau 2.4 : Propriété des granulats utilisés

	Gravier naturel			Gravier de marbre recyclé			Sable naturel
	15/25	8/15,	3/8,	15/25	8/15,	3/8,	
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,60	2,60	2,60	2,60	2,40	2,60	2,62
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.32	1.33	1.33	1.21	1.12	1.2	1,48
Absorption (%)	3,09	0,66	0,72	2,51	1,81	1,81	0,67
Dureté (%)	21,00	24,00	22,00	29	30	27	-
Module de finesse	-	-	-	-	-	-	1,90

2.2.5 Adjuvant :

Le MEDAFLUID 40 est un plastifiant réducteur d'eau. Il est compatible avec tous les types de ciment. Les caractéristiques de ce produit sont les suivants :

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8 / 9
- Densité $1,19 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 0,1 \text{ g/l}$
- Extrait sec..... 40 %



Figure 2.5 : Adjuvant type plastifiant

2.2.6 Eau de gâchage :

L'eau est l'ingrédient principal dans le processus de mélange de la pâte de béton, de sorte qu'elle joue le rôle le plus important dans la combinaison de tous les ingrédients. L'eau utilisée dans la fabrication du béton est celle du robinet.

2.3. Formulation :

La formulation est une étape principale de conception du béton, dans cette étape on va fixer le pourcentage des matériaux (gravier, sable, ciment, eau) pour obtenir la meilleure composition avec bonnes propriétés. Différentes méthodes de formulation existent pour déterminer la composition optimale du béton, on cite : les méthodes de Bolomey, Dreux-Gorisse, Goisel et Faury. Pour le cas d'un béton de chaussée la méthode qui va être utilisée est celle de Faury.

La méthode de Faury repose sur la loi de granulation continue s'inspirant d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un

serrage moyen. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite.

La courbe granulaire de référence (figure 2.1) doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du premier au point de 5 % de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

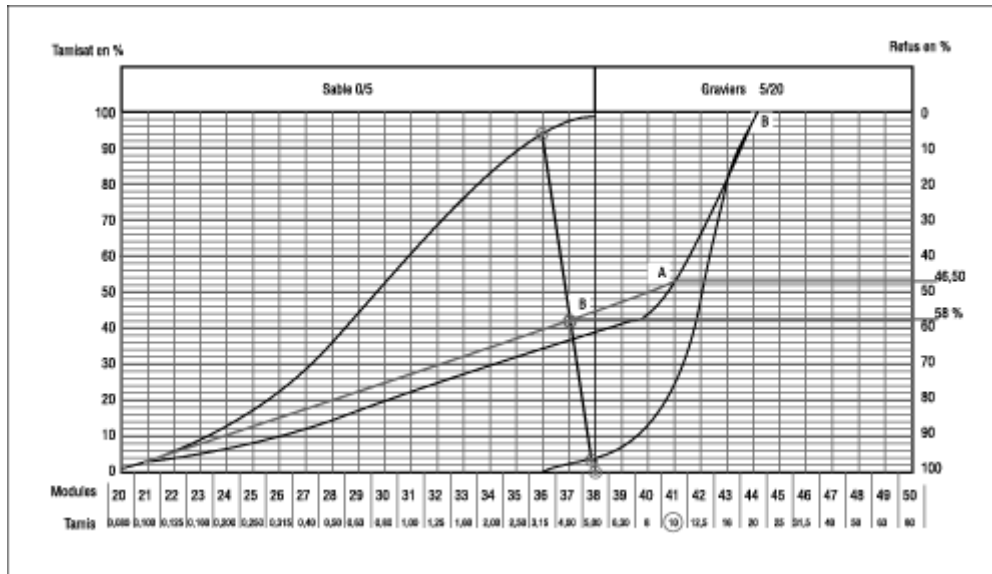


Figure 2.1. Courbe granulaire de référence.

Il faut distinguer les grains fins et moyens de diamètre inférieur à $D/2$ des gros grains de diamètre supérieur à $D/2$, car la pente de la droite de référence est différente pour chacune de ces deux classes.

La courbe granulaire de référence est donc formée de deux droites. Sur un système d'axes gradués en abscisse, on reporte :

- l'abscisse de l'intersection de ces deux droites (point de brisure) qui se trouve à $D/2$;
- l'ordonnée Y , qui est donnée par la formule suivante :

$$Y_{\frac{D}{2}} = A + 17,8 \sqrt[5]{d} + \frac{B}{\frac{R}{1,25D} - 0,75}$$

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)

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

R : le rayon moyen de moule.

- La quantité d'eau E est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{0.39}{\sqrt[5]{D_{max}}} \times 1000$$

- Détermination du volume absolu de béton sec :

$$V_a = 1000 - E$$

Avec :

V_a : le volume absolu du béton sec

- Détermination du pourcentage de ciment dans le volume du béton sec :

Soit X le dosage du ciment en Kg/m, sa masse spécifique Y est égale à 3,1 g/cm

$$C\% = \frac{\frac{X}{Y}}{V_a} * 100$$

- Détermination des pourcentages de granulats d'après la courbe de référence et les courbes granulométriques des granulats.
- Détermination des quantités des granulats :

$$\text{Sable} = V_a * \%S * d$$

Avec :

%S : pourcentage de sable

d : Densité du sable

$$\text{Gravier} = V_a * \%G * d$$

Avec :

G : pourcentage du gravier

d : Densité du gravier

- Détermination de la quantité du ciment :

$$\text{Ciment} = V_a \cdot \%C \cdot d$$

Avec :

C : pourcentage du ciment

d : Densité du ciment

Tableau 2.5 : Valeur de A

	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
Consistance de terre humide Serrage très puissante	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissante	<22	<24	<28

2.4. Procédure de malaxage :

Le malaxage du béton est une étape cruciale dans le processus de fabrication. Le malaxage de nos bétons passe par les étapes suivantes : une fois que toutes les quantités seront calculées et pesées, on procède à un malaxage des ingrédients secs (ciment, sable, agrégats, agrégats recyclés et poudre de pouzzolane) pendant 30 s. Puis on ajout 70% de l'eau de gâchage avec un début régulier dans les 60 secondes suivantes. Durant toute la minute suivante, on introduit régulièrement le plastifiant avec l'eau restante (après les avoir mélangés). Le malaxage est continué pendant 90 secondes.



Figure 2.7. Malaxeur utilisé

2.5. Expérimentation :

2.5.1 Essais sur béton frais

- Essai d'affaissement :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais pour déterminer sa consistance. L'affaissement est aussi connu sous le nom de slump provenant de l'anglais. La norme NF EN 12350-2 décrit cet essai. Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- * la plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante

- * le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm². Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams.

- * une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois fois. À chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige
- Le cône est arasé avec une tige
- Le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler
- L'affaissement du béton frais est mesuré, et ensuite comparé aux résultats du tableau 2.6.



Figure 2.8. (a) cône d'Abrams, (b) mesure de l'affaissement

Tableau 2.6. Classe d'affaissement du béton.

ENV 206		NFP 18-305 et fascicule 65A CCTG		
Consistance	Affaissement (mm)	Consistance	Affaissement (cm)	tolérances
S ₁	10 à 40	Ferme (F)	0 à 4	± 1 cm
S ₂	50 à 90	Plastique (P)	5 à 9	± 2 cm
S ₃	100 à 150	Très Plastique (TP)	10 à 15	± 3 cm
S ₄	160 à 210	Fluide (F)	≥ 16	
S ₅	≥ 220			

2.5.2 Coulage, démoulage des éprouvettes :

Deux types de moules ont été utilisés dans cette campagne expérimentale, cubique (15*15*15 cm) et cylindrique (16*32 cm). Le remplissage des moules se fait en deux couches moyennant une table vibrante.



Figure 2.12. Compactage du béton



Figure 2.11. Coulage des moules

Le démoulage des éprouvettes se fait après 24 h



Figure 2.13. Démoulage des éprouvettes

2.5.3 Condition de cure :

Après le démoulage les éprouvettes ont été conservé dans une chambre humide à une température de 20C° et humidité relative égale à 80% pendant 28 et 90 jours.

2.5.4 Essais sur béton durci :

2.5.4.1 Résistance à la compression :

La résistance à la compression peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques ou cubique selon NF P18-4300 L'essai de compression se fait, dans. Notre cas, sur éprouvettes

prismatiques 15*15*15 cm qui ont été préalablement écrasées par compression. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture moyennant une presse hydraulique de capacité de 2000 kN, cette presse est munie d'un affichage digital permettant d'entrer la surface de l'éprouvette, la vitesse de chargement (2,5 kN/s) et d'obtenir la force et la résistance à la compression.



Figure 2.14. Essai d'écrasement

2.5.4.2 Résistance à la traction par fendage :

La résistance à la traction par fendage peut être mesurée sur des éprouvettes cylindriques 32*16 cm qui ont été préalablement écrasées par traction. L'essai de traction par fendage consiste à appliquer une force de compression aux longues deux génératrices opposées comme l'indique la figure. L'effort de compression engendre une force de traction perpendiculaire ce qui permet d'obtenir la résistance aux forces de traction par fendage.

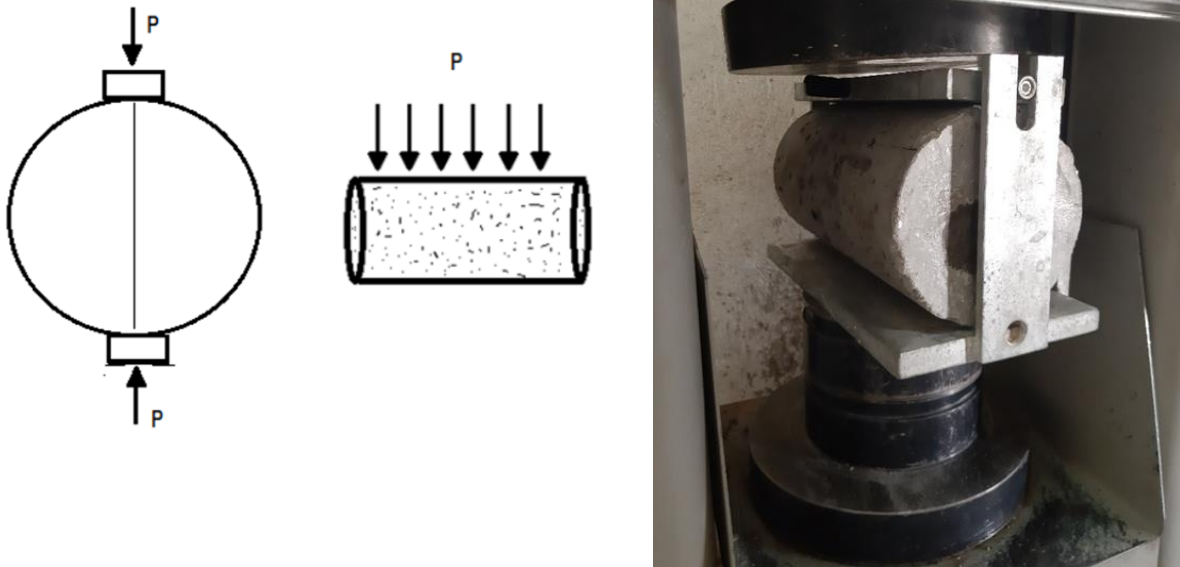


Figure 2. 15. Essai de traction par fendage

2.5.4.3 Vitesse d'auscultation sonique (VAS) :

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode à parcourir une distance connue.



Figure 2.16. essai d'auscultation sonique

2.5.4.4 Essai au scléromètre :

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de :

- ❖ L'énergie de recul ;
- ❖ Caractéristiques des systèmes de ressorts,

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.



Figure 2.17. scléromètre

a) Points de mesures :

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30 \div 50$ mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

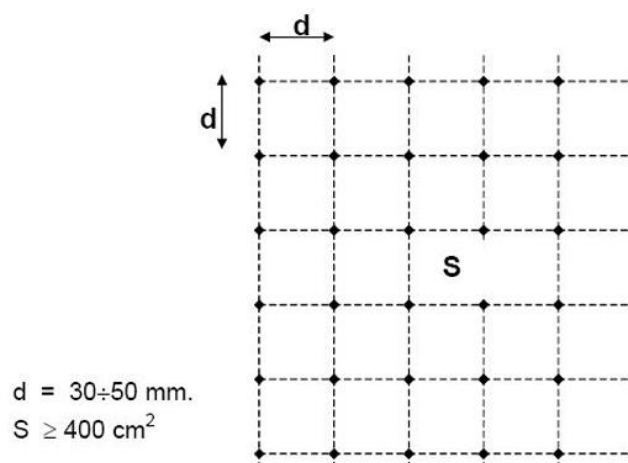


Figure 2.18. Grille de mesure sur ouvrage



Figure 2.19. essais au scléromètre

b) Méthode de la courbe unique :

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation affectant la corrélation « Indice sclérométrique – Résistance du béton » sont inconnues. On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil fourni par le fabricant. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe peut être évaluée à $\pm 50 \%$.

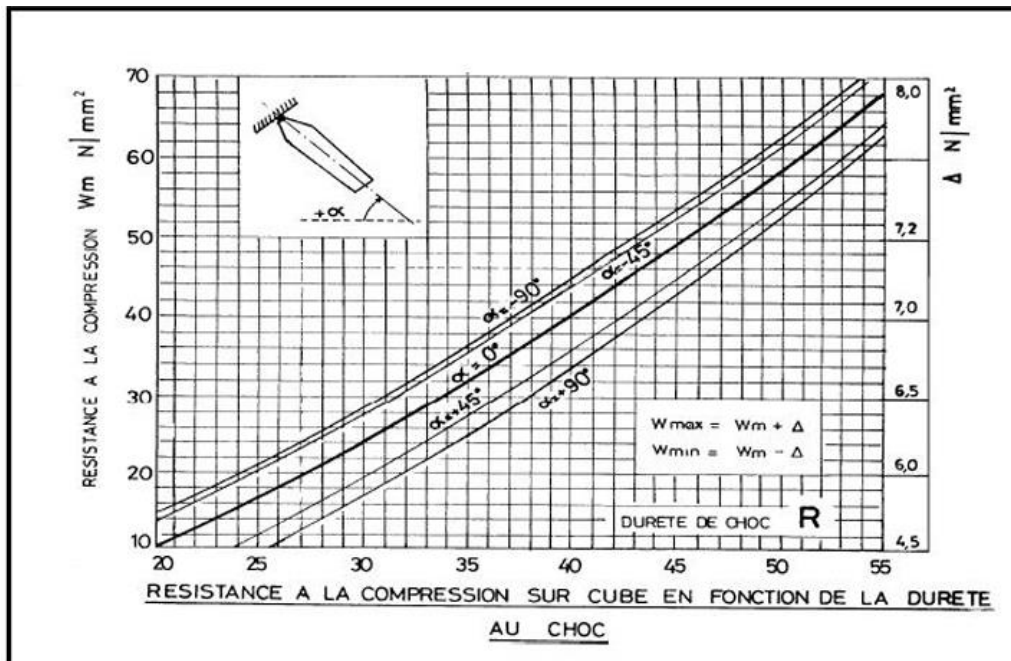


Figure 2.20. Courbe de transformation unique

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter, discuter et interpréter les différents résultats obtenus. Nous commençons par l'optimisation dosage en plastifiant, on passe ensuite à la discussion des résultats des essais : affaissement, résistance à la compression, résistance à la traction par fendage, vitesse d'auscultation soniques et auscultation sclérométrique.

3.2. Analyse et discussion des résultats :

Dans ce travail nous avons préparé et testé dix mélanges de béton, un mélange à base de granulats naturels et ciment Portland servant comme référence et neuf mélanges dans lesquels les granulats naturels sont remplacés par des granulats de marbre recyclé à différents pourcentages 10, 20, 30 et/ou le ciment Portland est substitué par la poudre de pouzzolane naturelle avec 5 % et 15 %. Le tableau 3.1 récapitule les différentes compositions désignées.

3.2.1. Béton frais :

L'objectif de ces essais est la détermination le dosage de plastifiant qui permet d'obtenir un béton ferme et homogène. Pour cela, l'essai d'affaissement a été effectué premièrement sur le béton à base de sable et granulats 100% naturels, puis sur des bétons qui contiennent différents pourcentages de granulats de marbre recyclé. La figure 3.1 présente les résultats obtenus. Dans cette figure, nous remarquons que l'affaissement varier entre 1,9 et 5 cm. Nous constatons que la majorité des mélanges ont un affaissement inférieur par rapport au mélange de référence, à l'exception des deux mélanges B10GMR et B20GMR-15PZ. Il a été noté que la consistance des bétons testés appartient à classe S1 c'est à dire béton de consistance ferme, ce qui est bien sûr recommandé pour un béton de chaussée.

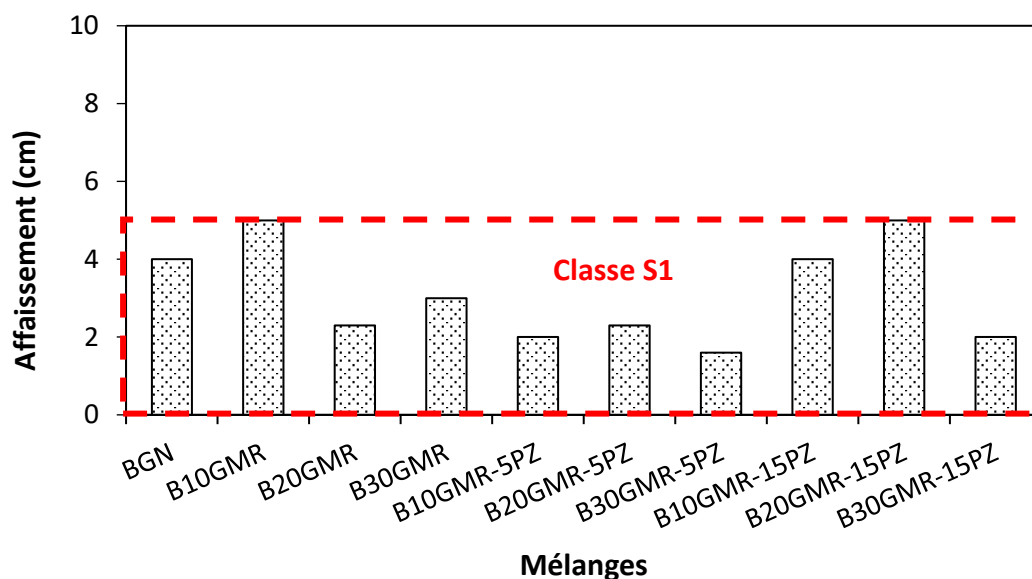


Figure 3.1. Résultats d'essai d'affaissement

Tableau 3.1. Compositions des bétons de chaussées étudiées.

Mélange	% GMR	% PZ	Ciment	Pouzzolane naturelle	Sable	G15/25	G 8/15	G3/8	Eau	Plastifiant %	Plastifiant	GMR 15/25	GMR 8/15	GMR 3/8
BGN	0	0	350,000	0	830,892	616,980	308,490	154,245	180,278	1,05	3,6750	0	0	0
B10GMR	10					555,282	277,641	138,821	180,129	0,90	3,1500	61,698	30,849	15,425
B20GMR	20					493,584	246,792	123,396	179,979	0,90	3,1500	123,396	61,698	30,849
B30GMR	30					431,886	215,943	107,972	179,829	0,85	2,9750	185,094	92,547	46,274
B10GMR- 5PZ	10	5	332,500	17,500		555,282	277,641	138,821	180,129	0,95	3,3250	61,698	30,849	15,425
B20GMR- 5PZ	20	5	332,500	17,500		493,584	246,792	123,396	179,979	0,90	3,1500	123,396	61,698	30,849
B30GMR- 5PZ	30	5	332,500	17,500		431,886	215,943	107,972	179,829	0,80	2,8000	185,094	92,547	46,274
B10GMR- 15PZ	10	15	297,500	52,500		555,282	277,641	138,821	180,129	1,00	3,5000	61,698	30,849	15,425
B20GMR- 15PZ	20	15	297,500	52,500		493,584	246,792	123,396	179,979	0,90	3,1500	123,396	61,698	30,849
B30GMR- 15PZ	30	15	297,500	52,500		431,886	215,943	107,972	179,829	0,90	3,1500	185,094	92,547	46,274

3.2.2. Béton durci :

3.2.2.1. Résistance à la compression :

L'influence des granulats de marbre recyclé et de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression des bétons de chaussée à 28 et 90 jours est présenté sur figure 3.2. L'analyse des résultats obtenus permet de faire les constations suivantes :

- ❖ Les résistances obtenues varient de 24 à 34 MPa (à 28 jours) et de 39 à 58 MPa (à 90 jours) ;
- ❖ Le mélange à base de granulats naturels présente des résistances de 29 MPa à 28 jours et 48 MPa à 90 jours ;
- ❖ L'ajout des granulats de marbre recyclé améliore légèrement la résistance du béton de chaussée à 28 jours;
- ❖ Le remplacement partiel du ciment par la pouzzolane naturelle entraine une légère diminution de la résistance du béton de chaussée à 28 jours, à l'exception du mélange B30GMR-5PZ qui présente la meilleure résistance 34,34 MPa (contre 30,28 MPa pour le mélange de référence) ;
- ❖ Il a été noté que les bétons contenant GMR et PZ (15%) sont ceux qui présentent les résistances les plus faibles à 28 et à 90 jours, toutefois ces résistances restent acceptables puisqu'ils sont supérieures à 25 MPa ;
- ❖ Les valeurs obtenus à 90 jours montrent que l'utilisation de 20 et 30 de GMR avec ou sans PZ (5%) est très avantageux car un gain de résistance de 5 à 10 MPa a été observé ;
- ❖ La composition contenant 5 % de PZ et 30% de GMR est celle qui présente la meilleure résistance soit 58 MPa, cette résistance est supérieure à celle de la composition de référence par 21%.

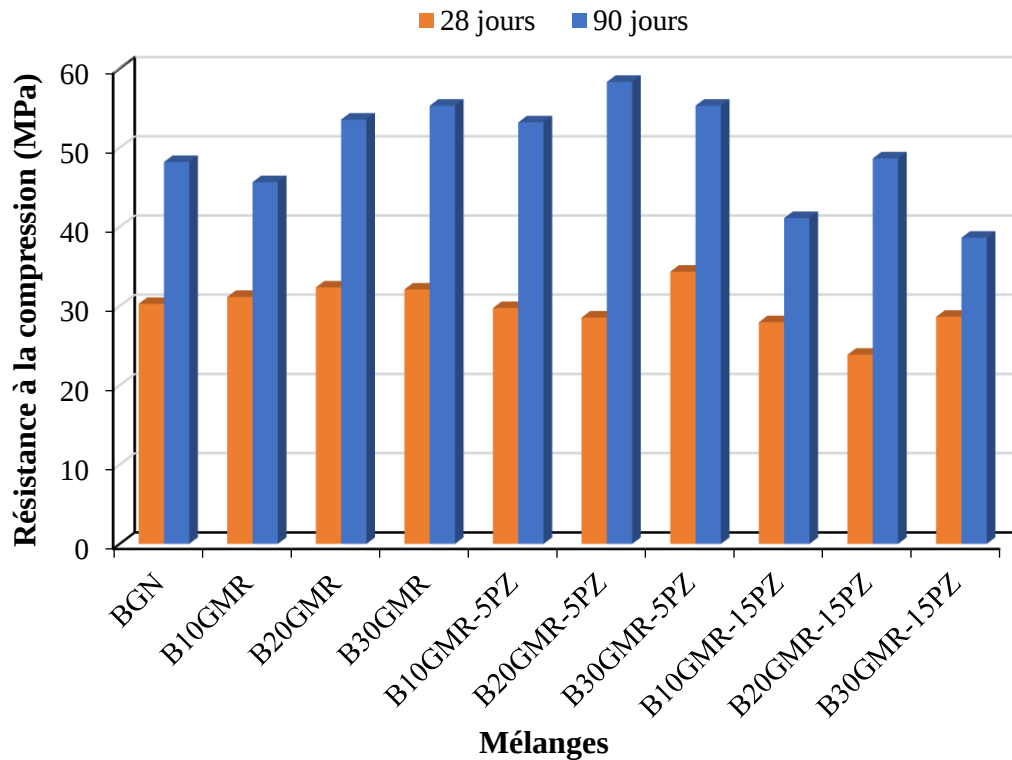


Figure 3.2. Évolution de la résistance à la compression à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.

3.2.2.2. Résistance à la traction :

La figure 3.3 présente l'évolution de la résistance à la traction par fendage :. L'analyse des résultats obtenus permet de tirer les points suivants :

- Les résistances obtenues varient de 1,98 à 2,80 MPa (à 28 jours) et de 2,46 à 3,46 MPa (à 90 jours) ;
- Le mélange à base de granulats naturels présente des résistances de 2,28 MPa à 28 jours et de 2,59 MPa à 90 jours ;
- L'utilisation combinée de GMR avec 5% de PZ permet de développer des résistances supérieures à celle du béton de référence à 28 et à 90 jours ;
- Les meilleures résistances à 28 jours ont été développée respectivement par les mélanges B10GMR-5PZ et B20GMR-5PZ. Leurs résistances sont supérieures par environ 20 et 23% par comparaison au mélange témoin ;
- Les meilleures résistances à 90 jours ont été développée respectivement par les mélanges B20GMR-5PZ et B10GMR-15 PZ. Leurs résistances sont supérieures par environ 34 et 28% par comparaison au mélange témoin ;

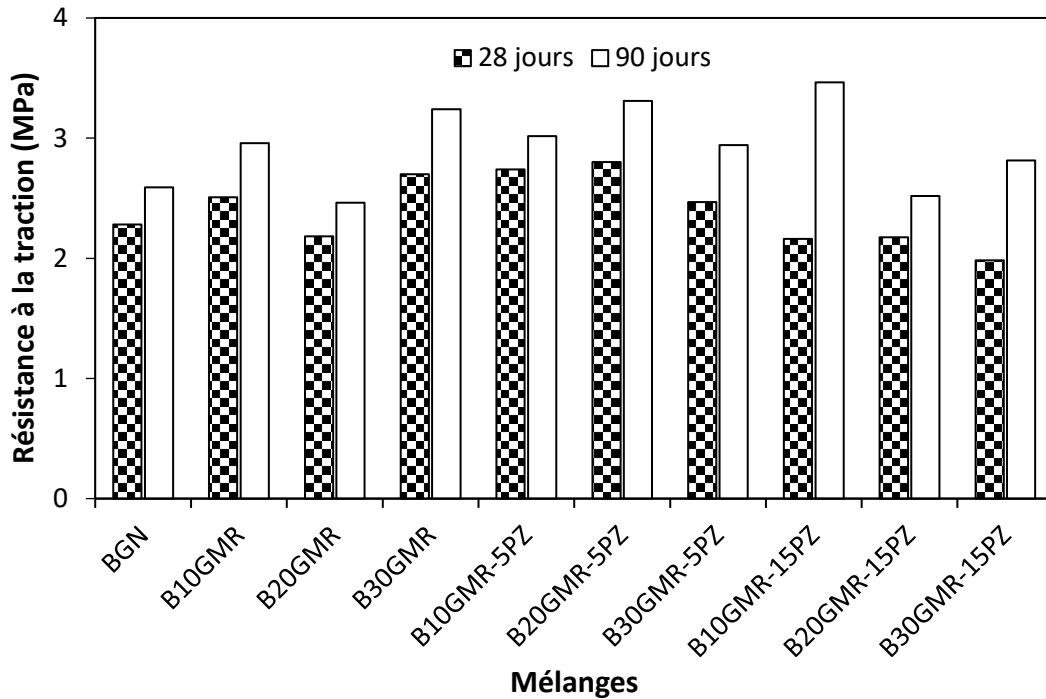


Figure 3.3. Évolution de la résistance à la traction par fendage à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.

3.2.2.3 Vitesse d'auscultation soniques :

La figure 3.4 illustre les résultats de la vitesse d'auscultation sonique à 28 et à 90 jours. Les valeurs obtenues varient entre 4300 et 4617 m/s à 28 jours et entre 4567 à 4719 m/s à 90 jours. L'addition des granulats de marbre et de la poudre de pouzzolane mène à une augmentation de la vitesse d'auscultation sonique à 28 et à 90 jours. Le mélange B20GMR-5PZ est celui qui présente la vitesse d'auscultation sonique la plus grande à 28 jours, tandis que la meilleure valeur à 90 jours a été enregistrée par le mélange B20GMR. L'accroissement de la vitesse d'auscultation sonique avec reflète une amélioration de la qualité du mélange en termes de densité et de homogénéité.

Whitehurst [12] a classifié les bétons selon leur qualité comme suit : excellente, bonne, modérée, mauvaise et très mauvaise pour des VAS de 4500 et plus, 3500-4500, 3000-3500, 2000-3000 et ≤ 2000 m/s. Cette classification indique que toutes les compositions testées ont de bonnes à excellentes qualités.

Tableau 3.2 : qualité du béton en fonction de la vitesse du son

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

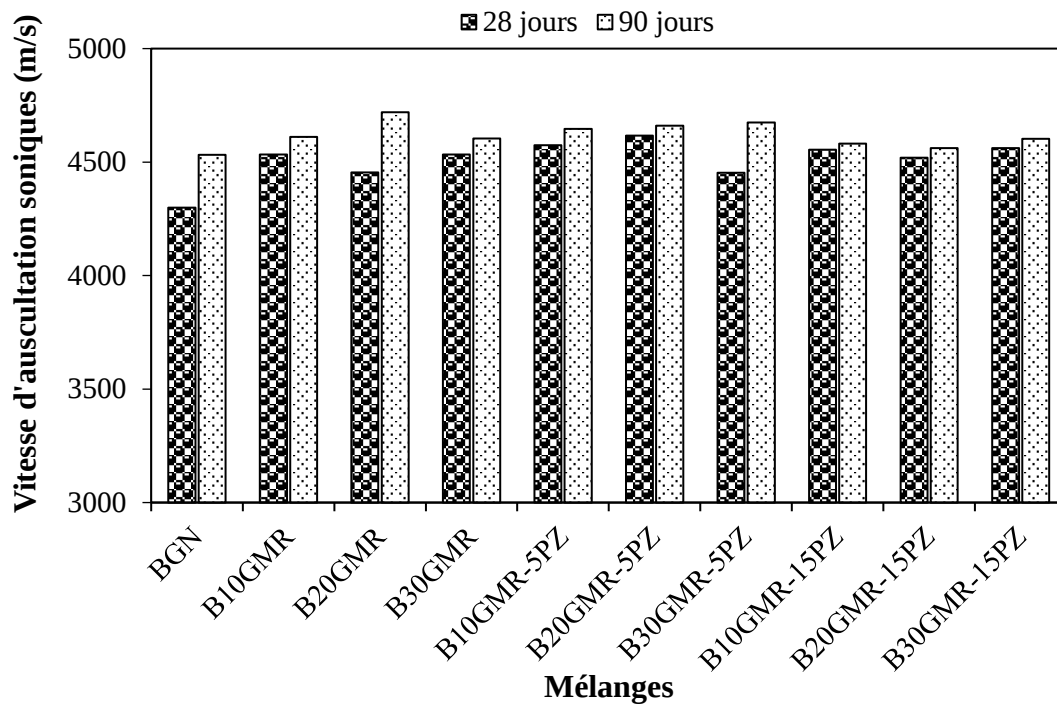


Figure 3.4. Évolution de la vitesse d'auscultation sonore à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.

3.2.2.4 Résistance - indice sclérométrique :

Les résultats de résistance à la compression déterminée en fonction de l'indice sclérométrique 28 et à 90 jours sont illustrés sur la figure 3.5. Les résistances obtenues varient entre 19 et 29 MPa (à 28 jours) et 26,2 à 37,9 MPa (à 90 jours). Le mélange à base de granulats naturels présente des résistances de 21,5 MPa à 28 jours et 26,2 MPa à 90 jours. L'ajout des granulats recyclés et de la poudre de pouzzolane donne des résistances supérieures ou égales à celle du béton témoin. Les meilleures résistances à 28 et 90 jours ont été enregistrées respectivement par les mélanges B20GMR et B10GMR+15 PZ. Ce dernier présente un gain de résistance de 11 MPa à 90 jours.

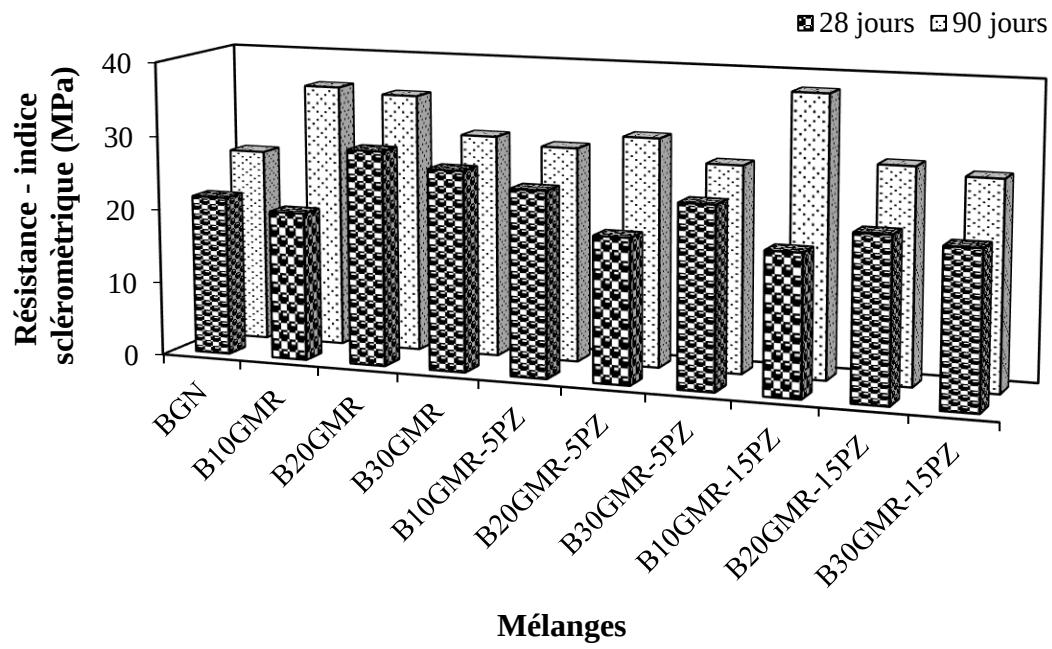


Figure 3.5. Évolution de la résistance sclérométrique à 28 et à 90 jours des bétons de chaussées à base de granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet de fin d'études a été mené pour évaluer les effets séparés et combinés des granulats de marbre recyclé et de la poudre de pouzzolane naturelle sur les caractéristiques des bétons de chaussée aux états frais et durci. Il vise à produire un béton de chaussée à faible impact environnemental, résistant et économique, et ce à travers l'exploitation des déchets de marbre qui sont disponibles partout dans notre pays. Sur la base des résultats expérimentaux, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ Un dosage en SP variant entre 0,8 et 1,05% permet de fabriquer des bétons de chaussée de consistance ferme (affaissement entre 1 et 5 cm)
- ❖ L'utilisation des GMR avec 15% de PZ conduit à des bétons avec de faibles résistances à 28 et à 90 jours, toutefois ces résistances restent acceptables puisqu'ils sont supérieures à 25 MPa ;
- ❖ La composition contenant 5 % de PZ et 30% de GMR est celle qui présente la meilleure résistance soit 58 MPa, cette résistance est supérieure à celle de la composition de référence par environ 21%.
- ❖ L'utilisation combinée de GMR avec 5% de PZ permet de développer des résistances à la traction par fendage supérieures à celle du béton de référence à 28 et à 90 jours ;
- ❖ Les meilleures résistances à la traction par fendage à 90 jours ont été développées respectivement par les mélanges B20GMR-5PZ et B10GMR-15 PZ. Leurs résistances sont supérieures par environ 34 et 28% par comparaison au mélange témoin ;
- ❖ Le mélange B20GMR-5PZ est celui qui présente la vitesse d'auscultation sonore la plus grande à 28 jours, tandis que la meilleure valeur à 90 jours a été enregistrée par le mélange B20GMR. Ces constatations reflètent une amélioration de la qualité de ces mélanges en termes de densité et de homogénéité.
- ❖ Selon les valeurs de la vitesse d'auscultation sonore (4300 - 4617 m/s à 28 jours et 4567 - 4719 m/s à 90 jours), toutes les compositions testées ont de bonnes à excellentes qualités;

Vu les résultats obtenus dans cette investigation expérimentale, on peut avancer que l'utilisation des granulats de marbre recyclé comme gros granulat avec la poudre de pouzzolane pour la fabrication des bétons de chaussée peut constituer une alternative aussi bien technologique, économique qu'environnementale importante pour notre pays, en particulier dans les régions qui manquent des granulats naturels.

Références bibliographiques

- [1]. <https://www.infociments.fr/route/caracteristiques-generales-des-chaussees>
- [2]. Topçu, I.B., 1997. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cem. Concr. Res.* 27, 1817–1823. doi:10.1016/S0008-8846(97)00190-7
- [3]. Mukai T., et al, 1979. Study on reuse of waste concrete for aggregate of concrete, in: *Energy and Resource Conservation in Concrete Technology” Japan-US Cooperative Science Programme*. San Francisco.
- [4]. Kenai, S. and Debieb, F. (2011) Characterization of the Durability of Recycled Concretes using Coarse and Fine Crushed Bricks and Concrete Aggregates. *Materials and Structures*, 44, 815-824.
- [5]. Torben, C.H., Hendriks, N., 1983. strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr. Int.* 5, 79–83.
- [6]. Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H., 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Res.* 31, 707–712. doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2
- [8]. Hendriks, C.F., Janssen, G.M.T., Vázquez, E., RILEM TC 198-URM, 2005. Use of recycled materials. RILEM, Bagneux.
- [9]. Limbachiya, M., Meddah, M.S., Ouchagour, Y., 2012. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Constr. Build. Mater.* 27, 439–449. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023
- [10]. Hadjieva-Zaharieva, R., 1998. Durabilité des bétons à base de granulats recyclés (Thèse de Doctorat de Génie Civil). Université d’Artois, Artois, France.
- [11]. Site internet <https://www.grifon.ca/le-marbre-histoire-origine-utilisation/>
- [12]. Whitehurst, E.A, “ Soniscope tests concrete structures ”, *Journal of the ACI* 1951; 47: 443–4.