

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie civil et travaux publics



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER
Préparé en vue de créer une start-up ou d'obtenir un brevet
(conformément aux dispositions de la circulaire n° 001 du 18 mai
2023)

Génie Civil (Voies et ouvrages d'art)

Intitulé

**L'effet de l'utilisation des additions minérales sur le mortier
autoplaçant à base de sable de béton bitumineux recyclé.**

Présenté par :

Mr : BENE LHADJ-DJELLOUL Mohamed Said

Mr : MAATALLA Abderrezak

Devant les membres de jury :

Président : Mlle ABELHAK Zahra

Maître de conférences (A) (U. Relizane)

Encadrant : Mr : AIT MOHAMED AMER Adem

Maître de conférences (A) (U. Relizane)

Co-Encadrant : Mlle : BELKADOUR Leila

Maître de conférences (B) (U. Relizane)

Co-Encadrant : Mr : NEHARI Abderrahim

Doctorant (U. Relizane)

Examineur : Mr : SALHI Mohamed

Maître de conférences (A) (U. Relizane)

Représentant de l'incubateur : Mlle Maître de conférences (A) (U. Relizane)

Représentant du partenaire économique : Mr

(Etablissement / adresse)

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

"La confiance est un élément majeur, sans elle aucun projet n'aboutit"

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'adresse mes sincères remerciements à notre encadrant qui a dirigé ce mémoire Dr. AIT MOHAMED.AMER Adem et notre co-encadrant Mr. Nehari Abderahim, qui sans eux se mémoire n'aboutira jamais. Je les remercie énormément de nous avoir encadré, de nous avoir consacré leurs temps, de nous avoir fait part de leurs précieux conseils. On leurs adresse toute nos profondes gratitude et notre reconnaissance pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté pour la réalisation de ce travail.

On tient à remercier particulièrement nos parent sans lesquels on n'existera pas et qui m'ont conduit jusqu'à l'âge adulte, pour leur patience à mon égard sans jamais douter de mes capacités.

On adresse nos remerciements à tous les enseignants du département de génie civil de l'université de Relizane ainsi qu'aux techniciens du Laboratoire du Génie Civil (Mme Zegai Amina) qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils, et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de répondre à nos questions durant toute la période de ce mémoire.

MERCI

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu Tout-Puissant, qui suit le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser cette humble œuvre à laquelle je me consacre :

mon père, que Dieu ait pitié de lui ; Ma chère maman pour ses encouragements, son soutien moral et financier ;

Mes frères et mes sœurs;

Toute ma famille et mes amis ;

Tous étudiants des Travaux Publics (promotion
sortante 2024).

à tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la
réalisation de ce travail .

A mon fidèle binôme, Fouad.

Said

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu Tout-Puissant, qui suit le chemin
de ma vie, j'ai pu réaliser cette humble œuvre à
laquelle je me consacre :

Mes chers parents pour leur encouragement et leur soutien moral et financier ;

Mes frères et mes sœurs ;

Toute ma famille et mes amis ;

Tout étudiants des travaux publics (promotion sortante 2024).

à tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail .

A mon fidèle binôme, youcef.

Abderrazak

Résumé

Sous l'effet du trafic routier, la chaussée se détériore rapidement, entraînant des dommages importants au niveau des couches de surface. Ces dégradations nécessitent fréquemment des travaux de réfection. Parmi les solutions envisageables, le recyclage des liants bitumineux offre l'avantage de réemployer des matériaux existants en les combinant à des additifs pour atteindre les performances requises. Cette recherche vise à analyser l'influence du sable de béton bitumineux recyclé (SBBR) sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mélange. Pour cela, le sable naturel (SN) a été partiellement substitué par du SBBCR dans différentes proportions (0 %, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %), tout en ajustant la quantité de superplastifiant pour conserver une bonne maniabilité. Plusieurs essais ont été menés pour évaluer les propriétés physico-mécaniques des enrobés recyclés, ainsi que le comportement du mortier à l'état frais (test d'étalement) et durci (résistance en compression et en flexion). Les résultats montrent que le SBBR peut constituer une alternative au sable naturel, malgré une légère réduction des performances mécaniques. Toutefois, cet inconvénient peut être compensé par les bénéfices économiques et écologiques de cette approche

Mots clés : Sable de bitume recyclé, Sable naturel, étalement, résistance à la compression, résistance à la traction.

Abstract

Under the effect of road traffic, the road surface deteriorates rapidly, causing significant damage to the surface layers. This degradation frequently requires repair work. Among the possible solutions, the recycling of bituminous binders offers the advantage of reusing existing materials by combining them with additives to achieve the required performance. This research aims to analyze the influence of recycled asphalt concrete sand (SBBR) on the mechanical and rheological properties of the mixture. To this end, natural sand (NS) was partially substituted by RBCCS in different proportions (0%, 25%, 50%, 75% and 100%), while adjusting the amount of superplasticizer to maintain good workability. Several tests were conducted to evaluate the physicochemical properties of the recycled asphalt mixes, as well as the behavior of the mortar in the fresh (spreading test) and hardened (compressive and flexural strength) states. The results show that SBBR can be an alternative to natural sand, despite a slight reduction in mechanical performance. However, this disadvantage can be offset by the economic and ecological benefits of this approach.

Key words: Recycled bitumen sand, Natural sand, spreading, compressive strength, tensile strength.

ملخص

تحت تأثير حركة المرور على الطرق، يتدهور سطح الطريق بسرعة، مما يسبب أضرارًا كبيرة للطبقات السطحية. تتطلب هذه التدهورات في كثير من الأحيان أعمال الإصلاح. ومن بين الحلول الممكنة، فإن إعادة تدوير المواد الرابطة البيتومينية توفر ميزة إعادة استخدام المواد الموجودة عن طريق دمجها مع المواد المضافة لتحقيق الأداء المطلوب. يهدف هذا البحث إلى تحليل تأثير رمل الأسفلت الخرساني المعاد تدويره (SBBR) على الخصائص الميكانيكية والريولوجية للخليط. ولتحقيق هذه الغاية، تم استبدال الرمل الطبيعي (SN) جزئيًا بـ SBBCR بنسب مختلفة (0%، 25%، 50%، 75% و 100%)، مع تعديل كمية الملطف الفائت للحفاظ على قابلية التشغيل الجيدة. تم إجراء العديد من الاختبارات لتقييم الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للأسفلت المعاد تدويره، وكذلك سلوك الملاط في الحالة الطازجة (اختبار الانتشار) والحالة الصلبة (قوة الضغط والانحناء). وتظهر النتائج أن SBBR يمكن أن يكون بديلاً للرمل الطبيعي، على الرغم من الانخفاض الطفيف في الأداء الميكانيكي. ومع ذلك، يمكن تعويض هذا العيب من خلال الفوائد الاقتصادية والبيئية لهذا النهج.

الكلمات المفتاحية: رمل البيتومين المعاد تدويره، الرمل الطبيعي، الانتشار، قوة الضغط، قوة

الشد.

Liste des figures

Figure 1.1 : Répartition des Quantités de Déchets de Chantiers ou de démolition par Type ...	7
Figure1.2 : Déchets non dangereux	8
Figure1.3 : Déchets dangereux	8
Figure 1.4 :Déchets inertes	9
Figure1.5 : Schématisation d'un granulats recyclé	14
Figur 2 : plumage.....	25
Figure2.1 : Désenrobages	26
Figure 2.2 : pelade (a : faible – b : moyenne – c : majeur)	28
Figure2.3 :nid de poule (a : faible – b : moyen – c : majeur).....	29
Figure 2.4 :fissures transversales (a : moyen – b- majeur)	31
Figure2.5 :Fissure en piste de roues.....	32
Figure 2.6 :Fissures longitudinales (a : faible – b- majeur).....	32
Figure 2.7 : Fissures de rives.....	33
Figure 2.8 :Fissures de gel.....	33
Figure 2.9 :Faïençage b- Symptômes annonciateurs.....	34
Figure 2.11 : Epaufrures.....	35
Figure 2.12 :Remontées (d'eau ou d'argile).....	36
Figure 2.13 :Ressuage.....	37
Figure 2.14 : affaissement.....	39
Figure 2.15 : le bourrelet	40
Figure 2.16 : Le flache	41
Figure 2.17 :tôles ondulée.....	42

Figure 3.1 :Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps.....	49
Figure 3.2 :La densité à l'état frais des différents mortiers utilisée. (Source : Chaidachatorn et al., 2019)	51
Figure 3.3 :Variation de la résistance à la compression des différents types des mortiers.....	52
Figure 3.4 :Variation de la résistance à la compression en fonction du sable bitumineux recyclé.....	53
Figure 3.5 :Résistance à la compression des mélanges de mortier avec divers pourcentages de SBBR	54
Figure 3.6 :Variation de la résistance à la traction par flexion des différents types des mortiers.....	55
Figure 3.7 :Variation de la résistance à la traction en fonction du sable bitumineux recyclé	55
Figure 3.8 : Résistance à la compression des mélanges de mortier avec divers pourcentages de SBBR	56
Figure 3.9 :Taux initial d'absorption des mélanges de mortier avec différents pourcentages du SBBR.	59
Figure3.10 :Coefficient d'absorption capillaire des mélanges de mortier avec différents pourcentages du SBBR.....	59
Figure 3.11 : Échantillons de mortier RAP conditionnés pour les tests de sorptivité	60
Figure 3.12 : Résultats du diamètre d'écoulement et de l'entonnoir en V. (Source : S. Etl., 2023)	60
Figure 3.13 : Temps d'écoulement et résultats de la boîte L. (Source : S. Etl., 2023).....	62
Figure 3.14 : Résultats expérimentaux de la résistance à la compression et du module d'élasticité. (Source : Mustafa Sarıdemir., 2013).....	64
Figure 3.15 :Résistance à la compression des SCM binaires et quaternaires incorporant divers matériaux cimentaires supplémentaires. . (Source : M. S,ahin Y'on., 2025)	66
Figure 3.16 : Valeurs d'absorption d'eau des mortiers.....	67
Figure 3.17 : Coefficients de conductivité thermique des mortiers..	68
Figure 4.1 : béton bitumineux recyclé utilisés.	71
Figure 4.2 :Courbe de l'analyse granulométrique du sable naturel.....	73

Figure 4.3 : Courbe de l'analyse granulométrique du béton bitumineux recyclé	74
Figure 4.4: Appareillage pour l'essai d'équivalent de sable.....	78
Figure 4.5: Appareillage pour l'essai d'équivalent de sable.....	82
Figure 4.6 : Essai d'étalement cône	83
Figure 4.7: Essai V-funnel	84
Figure 4.8: Remplissage des moules.....	85
Figure 4.9: Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.	86
Figure 4.10: Essai et dispositif de flexion par trois points	87
Figure 4.11: Essai du dispositif de compression simple	88
Figure 4.12: Essai d'absorption d'eau par capillarité..	90
Figure 5.1 : Variation de l'étalement des mélanges des mortiers autoplaçant.	93
Figure 5.2: Besoin en superplastifiant pour les mortiers autoplaçant utilisés en fonction de la substitution des SN par les SBBR.....	94
Figure 5.3 : Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des SBBR.....	96
Figure 5.4: L'effet des SBBR sur de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des SBBR (Age : 28 jours).....	96
Figure 5.5 : Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des SBBR.	98
Figure 5.6: L'effet des SBBR sur de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des SBBR (Age : 28 jours).....	98
Figure 5.7: Pertes en poids des éprouvettes en fonction de la teneur en granulats recyclés (t=90 jours).....	99
Figure 5.8 : La Sorptivité des différents mélange de mortier autoplaçant.....	100
Figure 5.9 : Besoin en SP des différents mélange des mortiers autoplaçants.....	101
Figure 5.10 : Variation de la résistance à la compression des différents mélanges. (28jours). 102	
Figure 5.11: Variation de la résistance à la traction des différents mélanges. (28jours).	102

Figure 5.12: Pertes en poids des éprouvettes en fonction de la teneur SBR et la FS (t=90 jours).....103

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : résultat de l'étalement des mortiers à base de SBBR pour différents rapport E/C. (Source : Chaidachatorn et al., 2019).....	50
Tableau 3.2 :Résistance à la compression des mortiers réalisés.....	52
Tableau 3.3 :Résultats des tests de poids unitaire, de résistance à la compression et de module d'élasticité. (Source : Mustafa Sarıdemir., 2013)	64
Tableau 4.1 :Caractéristiques chimiques et minéralogique du ciment utilisé.....	70
Tableau 4.2 :Résultats de l'analyse granulométrique du sable naturel	72
Tableau 4.3 :Résultats de l'analyse granulométrique du béton bitumineux recyclé	73
Tableau 4.4 :Module de finesse des sables utilisés.....	74
Tableau 4.5 :Masses volumiques des sables utilisés.....	75
Tableau 4.6 :Les valeurs de ES qui désigne la nature et qualité des sables	79
Tableau 4.7 :Equivalent de sable.....	80
Tableau 4.8 :Compositions des mélanges.....	80
Tableau 5.1 :Les résultats de l'étalement des mélanges des mortiers autoplaçant.....	93

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Abstract

الملخص

Listes des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale2

Chapitre 01:

Eude bibliographique.

1.1 Introduction:5

1.2 Définition des déchets:5

1.3 Origine de la production des déchets :5

1.4 La classification des déchets :6

1.4.1 Classement selon l'origine des déchets:6

1.4.1.1 Les déchets municipaux :6

1.4.1.2 Les déchets des entreprises :6

1.4.1.3 Les déchets de l'agriculture et des industries agroalimentaires :6

1.4.1.4. Les déchets d'activités de soin :7

1.4.2 Classement selon la nature des déchets:7

1.4.2.1. Déchets non dangereux ou banals :7

1.4.2.2 Déchets dangereux ou spéciaux :8

1.4.2.3 Déchets inertes :8

1.5 Les Caractéristiques des déchets :8

1.5.1 La densité :9

1.5.2 Le degré d'humidité :9

1.5.3 Le pouvoir calorifique :9

1.5.4 Le rapport des teneurs en carbone et azote :9

1.6 Les impacts des déchets sur l'environnement :9

1.6.1 L'impact sur la pollution de l'air :	9
1.6.2 L'impact sur la pollution du sol :	9
1.6.3 L'impact sur la pollution de l'eau :	10
1.7 Gestion des déchets:	10
1.7.1 Définition:	10
1.7.2 Principe de gestion des déchets :	11
1.7.3 Technique de gestion des déchets :	12
1.7.3.1 Décharge:	12
1.7.3.2 Incinération:	12
1.7.3.3 Compost et fermentation:	12
1.7.3.4 Traitement biologique et mécanique:	13
1.8 Recyclage des déchets:	13
1.8.1 Définition:	13
1.8.2 Dans le monde	14
1.8.3 Europe	14
1.8.4 Algérie	14
1.9 Technique de recyclage:	15
1.9.1 Procédés du recyclage:	15
1.9.2 Chaîne du recyclage:	16
1.10 Déchets utilisés dans le domaine du Génie Civil	17
1.10.1 Laitiers	17
1.10.1.1 Laitier de haut fourneau	17
1.10.1.2 Laitier d'acier	17
1.10.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques	17
1.10.3 Mâchefer	18
1.10.4 Cendres volantes	18
1.10.5 Déchets divers	18
1.11.1 Composition du mortier :	21
1.11.1.1 Le liant:	22
1.11.1.2 Le sable:	22
1.11.1.3 L'eau de gâchage:	24
1.11.1.4 Les adjuvants:	25
1.11.2 Les différents types de mortiers :	25

1.11.2.1 Les mortiers de ciment :.....	25
1.11.2.2 Les mortiers de chaux :.....	25
1.11.2.3 Les mortiers bâtards :.....	26
1.11.2.4 Les mortiers fabriqués sur chantier :.....	26
1.11.2.5 Le mortier industriel :.....	26
1.11.3 Classification générale des mortiers :	27
• Selon leur domaine :	27
• Selon la nature du liant :	27
1.12 Conclusion :	28

Chapitre 02:

La pathologie des chaussées bitumineuses.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement durable est un thème moderne dans le secteur des chaussées bitumineuses car la construction routière est une éminente consommatrice en granulats neufs; de plus l'entretien des routes passe forcément par le fraisage des anciennes couches de chaussée: ce qui emporte la production d'une grande quantité de déchets des matériaux bitumineux. L'utilisation de la technique de fraisage-recyclage des enrobés bitumineux pour leur réutilisation dans les projets routiers permettra de diminuer le coût absolu d'un projet de 30 % à 40% et d'un point de vue environnemental, le recyclage des enrobés permet de délimiter l'utilisation des ressources naturelles non reconductibles dans la construction des infrastructures, en plus de réduire la quantité de résidus dans les lieux d'entreposage. Le recyclage de l'ancien matériau bitumineux offre de multiples avantages sur le plan environnemental : une économie de matériaux naturels, une forte réduction du trafic de poids lourds transportant ces matériaux ainsi qu'une grande économie d'énergie. La technique de fraisage-recyclage des enrobés bitumineux pour leur réutilisation dans les projets routiers a été introduite en Algérie en 2005 et a été appliquée sur la voirie urbaine et les grands boulevards des grandes villes [DTP].

L'utilisation de revêtements d'asphalte récupérés pour économiser les ressources naturelles et réduire les déchets de construction et les coûts de revêtement des autoroutes est courante dans le monde entier. Une enquête a montré que l'utilisation des granulats de béton bitumineux recyclés comme alternative à l'asphalte vierge et aux granulats en 2015 a permis d'économiser 2,45 milliards de dollars aux États-Unis, en plus des avantages environnementaux liés à la préservation des ressources. La même enquête a également révélé que la teneur moyenne en granulats de béton bitumineux recyclés utilisée dans les enrobés à chaud est encore faible (20,3 % en 2015), tandis que d'énormes quantités d'enrobés sont utilisées dans des applications non bitumineuses de faible valeur, ou sont jetées.

Ce travail vise à contribuer de manière expérimentale à l'analyse des caractéristiques physico-mécaniques et de la résistance des mortiers à base de béton bitumineux recyclé. Les mortiers fabriqués ont été composés de sable recyclé à des pourcentages variés tels que 0, 25, 50,75 et 100%.

Le mémoire se divise en cinq chapitres. Les deux premiers chapitres sont consacrés à une analyse bibliographique.

Dans le premier chapitre, nous abordons une série de concepts généraux sur la valorisation des déchets. Nous exposons le contexte de la gestion des divers types de déchets et les principales méthodes de traitement ou d'élimination à travers le monde, ainsi que le recyclage et la réutilisation des déchets.

Dans le deuxième chapitre est une étude bibliographique qui traite la pathologie des chaussées bitumineuses.

Dans le troisième chapitre, nous examinerons les caractéristiques physiques et mécaniques (ouvrabilité, densité, absorption, propriétés mécaniques et retrait) ainsi que l'effet des granulats de bitume recyclé et de la fumée de silice sur les propriétés physique et mécanique des mortiers et bétons.

Dans le quatrième chapitre, les procédés d'essais sur les matériaux utilisés dans cette étude et les différentes méthodes expérimentales ont été présentés, conformément aux normes requises pour la caractérisation physique et mécanique de ces matériaux.

Le chapitre cinq présente une synthèse des essais et des résultats des expériences effectuées pendant cette étude.

Les résultats et les points de vue seront exposés à la fin de ce mémoire.

Chapitre 1 :

Eude

bibliographique.

1.1 Introduction:

Dès les années 1990, la préservation de l'environnement s'est imposée comme un enjeu partagé par tous. Un déchet correspond à ce qui reste après l'utilisation d'un produit, ayant perdu de son utilité, de sa qualité ou de sa valeur économique. Il s'agit donc d'un résidu souvent abandonné car jugé inutilisable ou sans intérêt.

Cette problématique des déchets concerne tout le monde, que ce soit dans la sphère privée ou professionnelle, et fait partie des défis quotidiens.

La gestion des déchets repose avant tout sur une logistique rigoureuse et l'amélioration des méthodes existantes, dont les impacts écologiques semblent relativement contrôlés. Ainsi, elle est souvent perçue davantage comme un défi économique et organisationnel que comme une urgence environnementale.

Plusieurs méthodes de traitement sont couramment employées (recyclage, mise en décharge, incinération, valorisation organique...), chacune offrant des avantages et des contraintes spécifiques. La complexité de cette gestion résulte de la nécessité de concilier des impératifs financiers, techniques, sociaux et écologiques. C'est pourquoi les approches varient considérablement d'un pays à l'autre.

1.2 Origine de la production des déchets :

La génération de déchets constitue un phénomène inéluctable, et ce pour plusieurs raisons fondamentales :

Raison biologique : Tout organisme vivant engendre des résidus métaboliques au cours de son cycle de vie.

Principe chimique : Les lois de la conservation de la matière impliquent que toute transformation chimique produit des sous-produits, même lorsqu'on cherche à obtenir une substance utile.

Contrainte technologique : Aucun processus industriel n'est parfait ; chacun génère nécessairement des rejets indésirables.

Facteur économique : L'obsolescence programmée et la durée de vie limitée des biens de consommation conduisent inévitablement à leur mise au rebut.

Paradoxe écologique : Les opérations de purification (traitement des eaux, dépollution atmosphérique) créent elles-mêmes de nouveaux résidus à éliminer.

Aléas techniques : Les pannes et dysfonctionnements des systèmes de production et de distribution contribuent également à l'accumulation de déchets imprévus.

Cette production résiduelle multiforme révèle la complexité de notre rapport à la matière et souligne l'importance d'une gestion rationnelle des déchets dans nos sociétés modernes

1.3 La classification des déchets :

On peut classer les déchets selon leur origine et leur nature.

1.3.1 Classement selon l'origine des déchets:

1.3.1.1 Les déchets municipaux :

Ils comportent :

- les déchets ménagers : constitués pour l'essentiel d'ordures ménagères auxquelles s'ajoutent les déchets de jardinage, de bricolage, les encombrants, les déchets liés à l'usage de l'automobile, les déchets ménagers spéciaux (aérosols, acides, peintures, vernis, piles, etc.) ;

- les déchets des collectivités : déchets du nettoyage, déchets des espaces verts publics, déchets de l'assainissement public (boues de station d'épuration des eaux usées, boues de curage d'égouts) ;

- les déchets d'origine commerciale ou artisanale assimilables aux ordures ménagères.

1.3.1.2 Les déchets des entreprises :

Il s'agit des déchets produits par les entreprises Industrielles, commerciales et artisanales. Ils comprennent des matériaux de natures divers (déchets de fabrication, emballages vides, sous-produits de production, etc....). Ils sont souvent classés dans trois

grandes catégories : déchets inertes, déchets banals (assimilables aux ordures ménagères) et déchets dangereux.

1.3.1.3 Les déchets de l'agriculture et des industries agroalimentaires :

Ils sont composés de déchets essentiellement organiques, les autres déchets (films plastiques et emballages, etc.).

1.3.1.4. Les déchets d'activités de soin :

Souvent dénommés de façon réductrice "Déchets Hospitaliers ", ces déchets comprennent les déchets des établissements de soins ou déchets hospitaliers et les déchets des laboratoires médicaux.

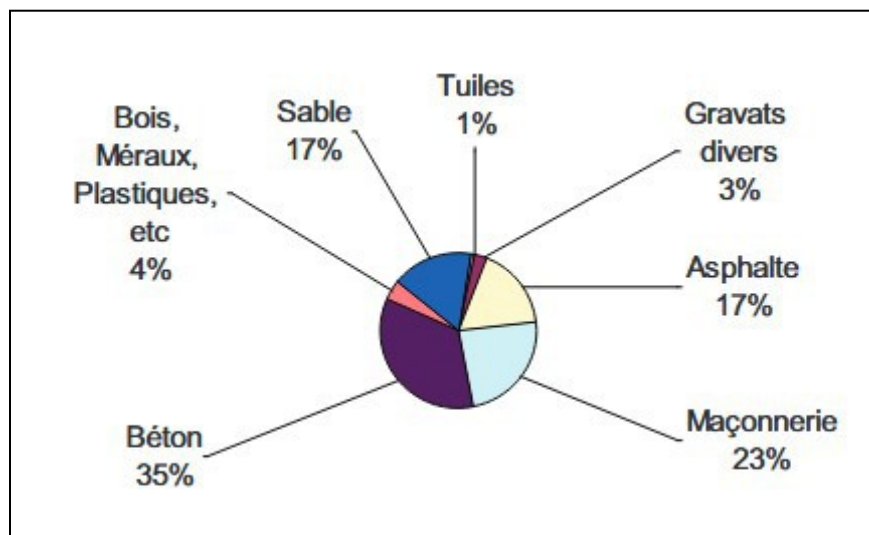


Figure 1.1 Répartition des Quantités de Déchets de Chantiers ou de démolition par Type

1.3.2 Classement selon la nature des déchets:

1.3.2.1. Déchets non dangereux ou banals :

Déchets non toxiques souvent assimilés aux ordures ménagères qui proviennent de l'ensemble des activités économiques.



Figure1.2: Déchets non dangereux

1.3.2.2 Déchets dangereux ou spéciaux :

Déchets qui peuvent générer des nuisances pour l'homme ou l'environnement.



Figure 1.3 Déchets dangereux

1.3.2.3 Déchets inertes :

Déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable.



Figure 1.4 Déchets inertes

1.4 Recyclage des déchets:

1.4.1 Définition:

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage s'organise en deux filières :

La filière de la déconstruction traite les matériaux issus de la démolition de bâtiments ou de chaussées : on parle de granulats recyclés car la matière première utilisée pour les produire est elle-même constituée de granulats « purs » ou combinés à des liants (dans le béton et les enrobés routiers) (Pacheco-Torgal et Labrincha, 2013).

La filière des sous-produits industriels (schistes houillers, laitiers de hauts fourneaux ou d'aciéries, mâchefers d'incinération d'ordures ménagères) ; on parle alors aussi de granulats artificiels car la matière première utilisée n'est pas du sable et des graviers mais des résidus de procédés industriels.

1.4.2 Chiffres et historique :

Au Japon, le recyclage est très développé avec un taux d'environ 96%. Selon un rapport du ministère de l'environnement japonais établi en 2000, chaque année, il y'a environ 35 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition (C&D) et il n'y'a que 1.3 millions de tonnes qui mise en décharge dans l'environnement.

Aux Etats Unis en 2002, on recensait seulement 20 à 30% de recyclage sur la totalité des 250 à 300 millions tonnes de déchets de C&D produits.

En chine, la quantité de déchets de C&D produits en 2010 était de 239 millions de tonnes. La majorité des déchets de C&D est ainsi déchargé dans l'environnement. Avec le développement très rapide du pays, environ 820 millions tonnes de ciment et

8 billions de tonnes de granulats sont consommés. La nécessité du recyclage de déchets de C&D a été reconnue par le gouvernement chinois.

Chaque année en Europe, environ 850 millions tonnes de déchets de C&D sont produits, ce qui représente 31% de la totalité des déchets. La production moyenne en Europe de déchets de C&D par habitant est environ 1.7 tonne par an (2008).

Le pourcentage de recyclage est très élevé pour les pays de l'UE (plus de 60%), notamment en Europe du nord. En particulier, les pays comme le Danemark, les Pays-Bas, l'Allemagne, recyclent environ 90% de leurs déchets de C&D. La France en recycle environ 60%.

En 2013, selon le rapport annuel de l'UNPG, la France a produit environ 365 millions de tonnes de granulats dont 20 millions tonnes de granulats issues du recyclage des déchets de C&D. Il existe donc un potentiel d'utilisation de granulats recyclés très important

Le gisement de déchets ménagers produit annuellement en Algérie comporte une fraction récupérable non négligeable estimée par les valeurs suivantes:

Papiers 385 000 tonnes/an Plastiques 130 000 tonnes/an Métaux 100 000 tonnes/an
Verre 50 000 tonnes/an

Matières diverse 95 000 tonnes/an

D'après les données nationales, on peut résumer ce qui suit:

- L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions tonnes de déchets ménagers.
 - L'Algérie compte 3000 décharges sauvages. Ces décharges occupent une surface totale de l'ordre de 150 000 hectares.
 - Chaque année 200 000 tonnes de déchets d'emballages sont rejetés en Algérie.
-

Les plastiques constituent 95% de ces emballages et les métaux représentent les 5% restants.

- Chaque année, 200 000 tonnes de déchets d'emballages rejetés annuellement, seulement 4000 tonnes sont récupérées soit 2% du gisement.

- Chaque année, 22 000 tonnes de déchets d'activité de soins sont produits en Algérie.

- Il existe en Algérie 317 incinérateurs opérationnels pour la destruction des déchets d'activité de soins.

- Le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a programmé la réalisation de 300 Centres d'enfouissement Technique et décharges contrôlées.

- Chaque année, les algériens utilisent près de 300 millions de piles et accumulateurs, soit environ 12 unités par habitant. On estime que 70% de ces piles finissent dans la nature ou à la décharge avec tous les risques de contamination de l'environnement par le mercure, le cadmium, le plomb, le zinc et le lithium

1.5 Technique de recyclage:

1.5.1 Procédés du recyclage:

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

Le recyclage chimique utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, et séparer certains composants.

Le recyclage mécanique est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple le broyage.

Le recyclage organique consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

1.5.2 Chaîne du recyclage:

a. Collecte de déchets:

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis aux centres d'enfouissement techniques.

Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective ou séparative est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : « celui qui crée le déchet le trie lui-même ». A la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

b. Transformation :

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

c. Commercialisation et consommation :

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

1.6 Déchets utilisés dans le domaine du Génie Civil

1.6.1 Déchets de démolition

La composition approximative des déchets de démolition de bâtiments peut donc être constituée comme suit :

- ✓ béton (40 %),
 - ✓ brique (30 %),
 - ✓ bois (10 %),
 - ✓ plastique (5 %),
 - ✓ métaux (5 %),
 - ✓ autres éléments (10 %).
-

La démolition des routes génère des déchets d'enrobés mais également des déchets de bétons hydrauliques, le traitement de ces déchets permet d'extraire les éléments non appropriés comme les métaux. Dans la fabrication de granulats recyclés pour usage routier, on distingue trois types de matériaux issus du recyclage :

- ✓ Granulat recyclé béton,
- ✓ Granulat recyclé enrobés,
- ✓ Granulat recyclé tout venant.

1.6.1.1 Granulats de béton recyclé

Le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau. Afin de préserver l'environnement, de nombreux professionnels se sont intéressés aux déchets provenant de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments comme matières premières de ces bétons.

On entend par « granulat de béton recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels » provenant de carrières ou de sablières. Les granulats de béton recyclés sont formés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci. Ceux-ci doivent donc être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine. La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [2]. La teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La schématisation du granulat recyclé est illustrée sur la figure 1.1 [3].

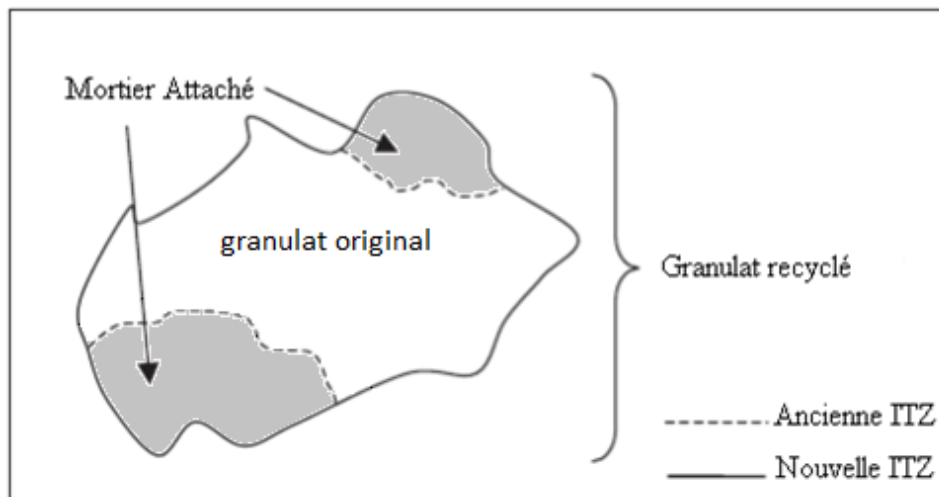


Figure 1.5 Schématisation d'un granulat recyclé

Les avantages du recyclage incluent la préservation de l'espace d'enfouissement, la conservation des ressources naturelles et l'épargne des coûts de transport et d'énergie. En outre, cette solution contribue à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles et s'intègre ainsi au concept de développement durable. Le recyclage nécessite souvent moins d'énergie que l'exploitation minière et le transport des matériaux nouveaux, ce qui peut aider à réduire la pollution de l'air et l'eau ainsi que les émissions de gaz à effet de serre.

Du point de vue technique, grâce à la normalisation, la qualité des produits 'granulats recyclés' est identifiable et reconnue. Néanmoins, différents problèmes apparaissent au niveau technique et constitue des freins à l'exploitation des granulats recyclés

1.6.1.2 Granulats du béton bitumineux recyclé

a- Définition

Le béton bitumineux recyclé (BBR) est un matériau de construction durable obtenu par le retraitement des enrobés bitumineux issus de la déconstruction des routes. Les granulats recyclés jouent un rôle crucial dans la composition du BBR, offrant des avantages économiques et environnementaux. Cet exposé aborde les caractéristiques, les méthodes de production, les avantages et les défis liés à l'utilisation des granulats de béton bitumineux recyclé.

Les granulats du béton bitumineux recyclé (GBR) sont des fragments de matériaux bitumineux récupérés après concassage et criblage des chaussées en fin de vie. Ils sont composés de :

Granulats minéraux (graviers, sables) enrobés de bitume résiduel.

Bitume vieilli issu de l'ancien enrobé.

Éventuels contaminants (matières organiques, autres matériaux).

Ils sont généralement combinés avec des granulats neufs et un liant bitumineux supplémentaire pour reformer un enrobé performant.

L'utilisation des **granulats de béton bitumineux recyclés (BBR)** dans le béton traditionnel (béton de ciment) est une pratique encore en cours de recherche et développement, mais elle présente à la fois des **opportunités** et des **défis**.

b- Processus de Production des BBR

La fabrication des granulats recyclés à partir d'enrobés bitumineux usagés suit un processus précis en quatre étapes principales.

Tout commence par le **démontage et la récupération** : les couches de chaussée usagées sont fraisées à l'aide d'une raboteuse, puis les matériaux sont collectés et stockés pour traitement.

Ensuite, intervient le **concassage et le criblage** : les enrobés sont broyés pour obtenir une granulométrie uniforme, tandis que les impuretés (métaux, plastiques) sont éliminées par tri mécanique ou magnétique.

La troisième étape consiste en l'**ajout de liant neuf** : les granulats recyclés sont mélangés avec du bitume frais pour restaurer leurs propriétés adhésives, et des granulats vierges peuvent être incorporés pour renforcer la structure.

Enfin, la **mise en œuvre** permet de réutiliser ces matériaux dans de nouvelles infrastructures routières, notamment pour les couches de roulement en surface ou les couches de base support.

Ce procédé circulaire offre un double avantage : économique (réutilisation des matériaux existants) et écologique (réduction de l'extraction de ressources naturelles et des déchets).

c. Défis et Limites

Qualité variable

- Le bitume vieilli peut réduire la ductilité du mélange.
- Risque de présence d'impuretés affectant la durabilité.

Normes et réglementations

- Besoin de contrôles stricts pour garantir la performance.
- Limites sur les taux d'incorporation (souvent entre 10% et 30%).

Logistique et acceptation

- Nécessité d'équipements adaptés (concasseurs, centrales d'enrobage).
- Réticence de certains acteurs à utiliser des matériaux recyclés.

1.6.1.3 Divers sources de granulats recyclé

a- Granulats de Briques et Matériaux Céramiques Recyclés

Origine : Démolition de bâtiments en briques, tuiles, carrelages.

Propriétés :

- Absorption d'eau très élevée (porosité).
- Résistance mécanique variable.

Utilisations :

- Béton léger (ajout limité).
- Mortiers de réparation.
- Remblais drainants.

4. Granulats de Déchets de Construction et Démolition (DCD) Mixtes

- **Origine :** Mélange de béton, briques, plâtre, bois, métaux (tri nécessaire).
- **Propriétés :**
 - o Hétérogénéité élevée → nécessite un **tri rigoureux**.
 - o Risque de contaminants (gypse, métaux, plastiques).
- **Utilisations :**
 - o Remblais après criblage.

- o Granulats pour routes (couches de fondation).

5. Granulats de Verre Recyclé

- **Origine** : Bouteilles, vitrages, pare-brise (déchets ménagers ou industriels).
- **Propriétés** :
 - o Inerte et non absorbant.
 - o Risque de réaction alcali-silice (RAS) si non traité.
- **Utilisations** :
 - o Substitut partiel du sable dans les bétons (après broyage fin).
 - o Revêtements décoratifs.

6. Granulats de Plastique Recyclé

- **Origine** : Bouteilles, emballages, déchets industriels.
- **Propriétés** :
 - o Léger et isolant, mais faible résistance mécanique.
 - o Problème de durabilité (UV, vieillissement).
- **Utilisations** :
 - o Béton léger (blocs isolants).
 - o Aménagements paysagers (non structurels).

- **-Pneus usagers**

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait.

- **- Boues rouges**

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Elles sont stockées soit au fond des océans (en France, en Allemagne), soit près des usines comme au Canada. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

1.6.2 Déchets des sous-produits industrielles

1.6.2.1 Laitiers

Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

Laitier d'acier

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable, il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison des problèmes de stabilité dimensionnelle. Des procédés de vieillissement/maturation se sont développés afin de maîtriser cette instabilité et des initiatives de valorisation, notamment en génie civil. Aussi, les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus.

1.6.2.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques

Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de houille sont désignés sous le nom de « mâchefer ». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Les particules sont appelées « cendres volantes ». Certaines particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four.

Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

1.6.2.3 Mâchefer

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Etant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

A la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers (ex : verre, ferrailles, gros imbrûlés). Ils sont classés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques en 3 catégories:- Mâchefers de catégorie «V» à faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans un solvant);

- Mâchefers intermédiaires de catégorie « M »;
- Mâchefers avec forte fraction lixiviable de catégorie « S »

1.6.2.4 Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Et sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité

de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classifiées selon leurs teneurs en C_aO et du type du charbon brûlé.

1.6.2.5 La fumée de silice

La **fumée de silice** est un ajout minéral très fin utilisé dans les formulations de **béton et de mortier** pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Voici ses principales caractéristiques et effets :

a- Origine et composition

- La fumée de silice est un **sous-produit** de la production de silicium ou d'alliages de ferrosilicium.
- Elle est composée à plus de **90 % de silice amorphe (SiO_2)** sous forme de particules ultrafines (100 à 1 000 fois plus fines que le ciment).

b-Effets dans le béton et le mortier

- **Résistance accrue** : La fumée de silice réagit avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment (réaction pouzzolanique), formant des **C-S-H supplémentaires** (silicate de calcium hydraté), ce qui augmente la résistance à la compression (surtout aux jeunes âges et à long terme).
 - **Réduction de la porosité** : Les particules fines comblent les vides, densifiant la matrice et améliorant la durabilité.
 - **Perméabilité réduite** : La structure plus dense limite la pénétration d'eau, de chlorures et de sulfates, protégeant les armatures dans le béton armé.
 - **Résistance aux attaques chimiques** : Meilleure tenue face aux sulfates, à l'eau de mer et aux acides.
 - **Réduction de l'alcali-réaction** : En fixant les alcalins, elle diminue les risques de réaction alcali-silice (RAS).
 - **Augmentation de la cohésion** : Réduit le risque de ségrégation et de ressuage, utile dans les bétons autoplaçants (BAP).
 - **Coloration** : Donne une teinte gris foncé au béton (peut être important pour les aspects architecturaux).
-

- **Temps de prise légèrement modifié** : Peut accélérer la prise si utilisée en grande quantité (nécessite parfois des adjuvants retardateurs).

c. Dosage et précautions

- **Dosage typique** : Généralement entre **5 % et 10 %** du poids du ciment (jusqu'à 15 % dans certains cas).
- **Mélange** : Doit être bien dispersée pour éviter les agglomérats (utilisation de superplastifiants souvent nécessaire).
- **Précautions** : Poudre très volatile, nécessite des **équipements de protection** (masque respiratoire) lors de la manipulation.

d. Applications courantes

- **Bétons haute performance (BHP) et ultra-haute performance (BUHP).**
- **Bétons exposés aux environnements agressifs** (ponts, tunnels, barrages, ouvrages maritimes).
- **Réparations et mortiers de haute résistance.**
- **Bétons décoratifs** (pour une surface plus lisse et homogène).

e. Inconvénients

- **Coût élevé** par rapport aux autres ajouts minéraux (cendres volantes, laitier).
- **Besoins en adjuvants** : Nécessite souvent des superplastifiants pour maintenir une bonne ouvrabilité.
- **Risque de fissuration plastique** accru si le béton n'est pas correctement cure.

En résumé, la fumée de silice est un **additif performant** pour les bétons et mortiers exigeants, mais son utilisation doit être optimisée en fonction des propriétés recherchées et des contraintes du projet.

1.7 Conclusion :

L'enjeu de cette étude n'est donc pas de subvenir à un manque actuel de granulats naturels mais plutôt de contribuer à la diminution de l'épuisement des ressources naturelles pour l'avenir, point fort du Grenelle de l'environnement. La valorisation de ces granulats issus du recyclage présente un intérêt d'ordre économique, technique et environnemental. Le

réemploi de ces matériaux dans la fabrication des bétons et mortiers contribuerait à la prolongation de la durée de vie des carrières existantes et au même temps à l'élimination des déchets dans les décharges. Par ailleurs, ces granulats de bitume recyclés pouvant se substituer aux granulats naturels, ceci permet de résoudre dans l'avenir le manque de granulats naturels. Néanmoins, il est nécessaire d'approfondir les connaissances sur les propriétés de ces déchets (granulats recyclés) destinés pour bétons ou mortiers en fonction de leur origine, ce qui facilitera leur valorisation.

Chapitre 02:

La pathologie des chaussées

bitumineuses.

2.1 Introduction :

L'évolution de l'état d'une route dépend de plusieurs facteurs essentiels, notamment les conditions climatiques, le type et l'intensité du trafic, la nature des sols, les matériaux employés ainsi que l'efficacité du système de drainage. Dès sa mise en service, une route commence à se détériorer progressivement. Ces dégradations se manifestent sous diverses formes, parmi lesquelles l'orniérage constitue l'une des pathologies les plus fréquentes, tant sur les chaussées revêtues que non revêtues. Ce phénomène résulte de déformations pouvant affecter la couche de surface ou les couches inférieures de la structure routière.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'analyse des différentes formes de dégradation des chaussées, ainsi qu'aux facteurs qui en sont à l'origine.

2.2 Dégradation des chaussées bitumineuses

2.2.1 Les arrachements

Les arrachements correspondent à une perte partielle ou totale des matériaux constituant la couche de roulement. Ces dégradations peuvent se présenter sous différentes formes, notamment :

- * Le décollement
- * Le plumage
- * Le désenrobage
- * La pelade
- * La "tête de chat"
- * Les nids-de-poule

2.2.1.1 Le décollement

a. Description :

Il s'agit d'une perte d'adhérence entre la couche de roulement (ou couche de surface) et la couche de base située en dessous. Cette désolidarisation peut entraîner un soulèvement ou un détachement progressif de la couche supérieure.

b- Aggravation :

- * Apparition de nids de poule sur la chaussée.

c- Causes :

- * Adhésivité insuffisante du granulat utilisé.
- * Gonflement ou retrait des matériaux de la couche de base.

d- Remèdes :

- * Réaliser un enduit général pour réparer et prévenir l'apparition de nouveaux nids de poule

a- Description :

Le plumage se caractérise par l'extraction d'une partie des gravillons du revêtement. Ce phénomène est également désigné sous le terme de "peignage" lorsqu'il se produit le long de l'axe de la route



Figure 2.1 plumage

2.2.1.2 Plumage :

b- Aggravation plausible :

Formation de nids de poule.

c- Causes :

- * b- Aggravation :
- * Arrachage des granulats et décollement de la couche supérieure du tapis.

- * c- Causes possibles :
- * Usure due à une circulation intense.
- * Sous-dosage de bitume ou mauvaise qualité de l'enrobé.
- * Mauvaise adhésivité des granulats.
- * Compactage insuffisant. Ségrégation des granulats lors de la mise en œuvre.
- * Mauvaise qualité des granulats.
- * Action de l'eau et salage des chaussées en hiver.

d- Remèdes :

Renouvellement de la couche de surface.

2.2.1.3 Désenrobages :

a- Description :

Le désenrobage se manifeste par la séparation du mastic (composé de liant et de fines) des granulats, entraînant la perte et le départ des gros granulats en surface, ce qui provoque la détérioration du revêtement.

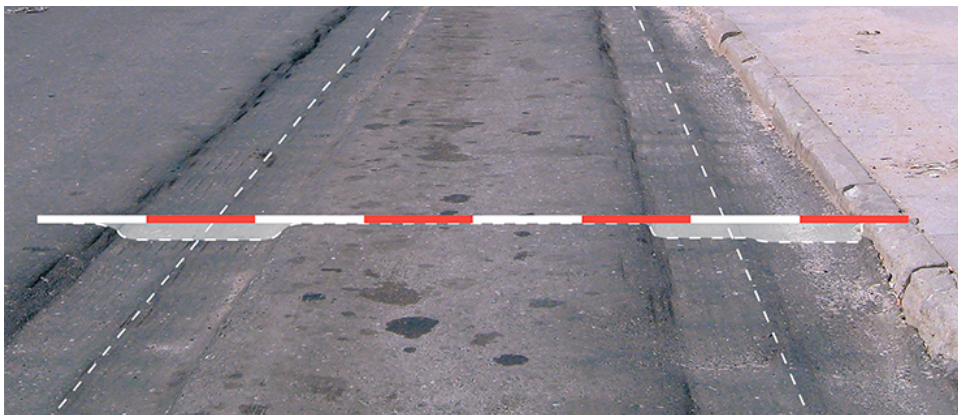


Figure 2.2 Désenrobages

b. Aggravation :

Le phénomène de plumage peut s'intensifier avec le temps, provoquant :

- * L'arrachage progressif des granulats.
- * Le détachement de la partie supérieure du tapis d'enrobé, affectant ainsi la qualité de roulement et accélérant l'usure de la chaussée.

c. Causes possibles :



Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine du plumage :

- * Une usure prématurée liée à un trafic intense, notamment de poids lourds.
- * Un sous-dosage en liant bitumineux ou l'utilisation d'un enrobé de mauvaise qualité.
- * Une mauvaise adhésivité des granulats, réduisant la cohésion avec le liant.
- * Un compactage insuffisant lors de la mise en œuvre, limitant la densité et la résistance de la couche de roulement.

d- Remèdes :

- * Balayage et nettoyage de la surface.
- * Renouvellement de la couche de roulement.

2.2.1.4 Pelade :

a- Description :

- * La pelade se caractérise par l'arrachement du revêtement de la couche de surface, entraînant la formation de lamelles de tailles variables.



(a)



(b)



(c)

Figure 2.2 pelade (a : faible – b : moyenne – c : majeur)

b- Aggravations prévisibles :

- * Altération de l'étanchéité.
- * Formation de nids de poule.

c- Causes possibles :

- * Épaisseur ou compacité insuffisante de la couche de roulement.
- * Mauvaise adhérence de la couche de roulement sur la couche de base (nettoyage insuffisant avant la mise en œuvre de la couche de roulement, absence de couche d'accrochage, présence d'eau à l'interface).
- * Manque de perméabilité de la couche de base.

d- Remèdes :

- * Renouvellement de la section endommagée avec découpe verticale.
- * Arasement des rives.
- * Renouvellement de la couche de surface (enduit d'usure).

2.2.1.5 Têtes de chat :

a- Description :

Les têtes de chat se manifestent par l'apparition de pierres ou de cailloux durs, de dimensions supérieures à celles du granulat en place, qui se dressent à la surface de la couche, formant des saillies. Cette dégradation résulte de l'usure de la couche de roulement.

b- Amplification prévisible :

- * Qualité et épaisseur de la couche de roulement inadaptées à la charge du trafic.

- Causes possibles c:

- * Usure très avancée du revêtement sur un corps de chaussée dans les cas suivants :
- * Chaussée constituée de tout-venant à granularité discontinue.
- * Couche de surface à granularité trop élevée.

d- Remèdes :

- * Renouveler l'enduit superficiel ou le remplacer localement par un tapis d'enrobés.

2.2.1.6 Nids de poule :

a- Description :

Les nids de poule se manifestent par des cavités résultant de la désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur. Ils sont généralement arrondis, avec un pourtour bien défini, et présentent des dimensions et des profondeurs variables

(a)

(b)

(c)



Figure 2.3 nid de poule (a : faible – b : moyen – c : majeur)

b- Signes annonciateurs :

Le nid de poule est souvent le résultat de dégradations qui semblent initialement sans gravité, telles que : affaissement, flache, fissure, faïençage, et plumage.

c- Aggravation prévisible :

- * Développement et agrandissement du nid de poule.
- * Infiltration massive d'eau dans le corps de chaussée.

d- Causes éventuelles :

- * Atteinte des dégradations de diverses natures, atteignant un stade ultime.
- * Utilisation de matériaux inadaptés lors de réparations effectuées dans de mauvaises conditions.

e- Remèdes à envisager :

- * Effectuer un emploi partiel d'enrobés si la profondeur des nids de poule n'excède pas 8 à 10 cm.
- * Rectifier la couche de base si cette profondeur excède 10 cm.

2.2.2 Les fissurations :

2.2.2.1 Les fissures :

a- Description :

- * La fissure est une ligne de rupture qui apparaît à la surface de la chaussée.

b- Symptômes précurseurs :

- * Affaissement, flache ou toute déformation abaissant le niveau de la couche de surface.

c- Aggravations prévisibles :

- * Accroissement de la fissure.
- * Formation de faïençage.
- * Formation de nids de poule.

d- Causes envisageables :

- * Rupture du revêtement provoquée par une déformation (visible ou non) du corps de chaussée, résultant de :

- * Tassement du corps de chaussée (retrait ou gonflement des matériaux de la couche de base).
- * Mauvaise exécution des joints de bandes d'épandage ou des continuations de travail au finisseur (tapis d'enrobés).
- * Élargissement de chaussée réalisé avec un dimensionnement différent de celui de la chaussée existante.
- * Mauvais accrochage de la couche de surface sur la couche de base.
- * Différence significative entre la portance du corps de chaussée et celle du tapis d'enrobés.
- * Efforts horizontaux importants dus à la circulation (freinage, virages).
- * Manque de stabilité de la chaussée sur la rive (accotement non rechargé).
- * Effet du gel.

e- Traitements à apporter :

- * Fermer la surface avec un enduit d'usure ou de scellement (sur enduit superficiel).

f- Différents types de fissures :

Fissures transversales :

Ces fissures se manifestent perpendiculairement à la chaussée. Elles peuvent être isolées ou alternées, avec des espacements variables. Elles peuvent également s'étendre sur toute la largeur de la chaussée ou n'en toucher qu'une fraction



(a)



(b)

Figure 2.4 fissures transversales (a : moyen – b- majeur)

Fissure en piste de roues :

Il s'agit d'une rupture du revêtement orientée parallèlement à l'axe de la route, localisée au niveau des pistes de roues, généralement dans les bandes 2 et 4.



Figure 2.5 Fissure en piste de roues

Fissures longitudinales (hors traces de roues) :

Dégradation de la couche de surface se manifestant par des fissures parallèles à l'axe de la chaussée, situées en dehors des zones de passage des véhicules (bandes 1-3 et 5). Ces fissures résultent principalement des contraintes thermiques liées au gel



(a)

(b)

Figure 5.6 Fissures longitudinales (a : faible – b- majeur)

Fissures de bordure :

Ces fissures se forment en bordure de la chaussée, près des accotements ou des bordures, et peuvent prendre la forme de lignes droites ou de tracés courbes (en arc de cercle). Elles résultent souvent d'un affaiblissement de la structure latérale du revêtement.

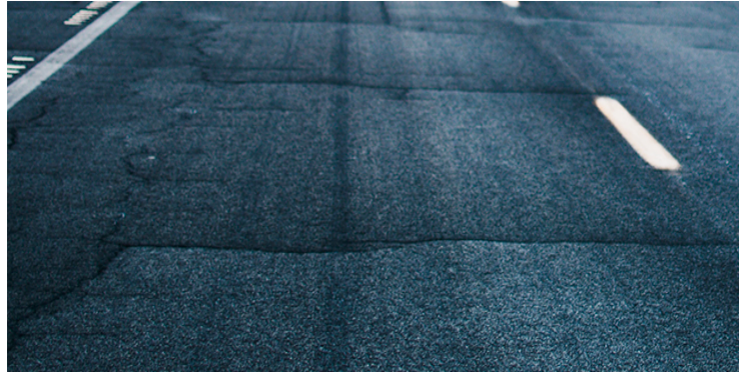


Figure 2.7 Fissures de rives

Fissures de gel :

Ces fissures, activées par les cycles de gel-dégel, se présentent sous deux formes principales :

Fissures rectilignes :

Localisées principalement au centre de la chaussée, elles suivent un tracé linéaire.

Fissures écaillées (gerçures) :

De forme irrégulière et dispersées, sans localisation spécifique sur la chaussée.

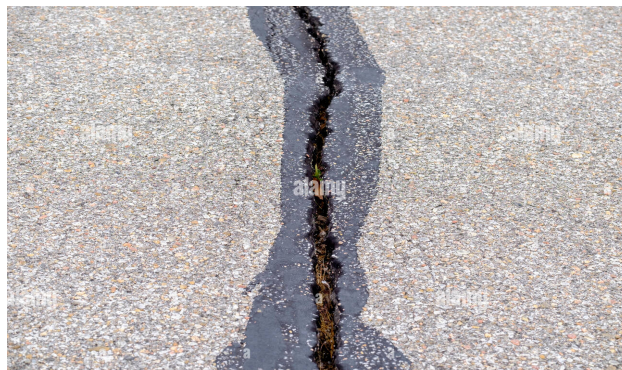


Figure 2.8 Fissures de gel

2.2.2.2 Le faïençage :

a) Description :

Le faïençage se caractérise par un réseau dense de fissures interconnectées, formant des motifs polygonaux de petite taille (généralement ≤ 30 cm de diamètre). Cette détérioration

affecte principalement les zones de roulement (bandes 2 et 4), là où les contraintes mécaniques sont les plus importantes.



Figure 2.9 Faïençage b- Symptômes annonciateurs

c) Aggravation prévisible :

- **Apparition de nids-de-poule** en raison de la progression des désordres.

d) Causes probables :

- Tassement de la structure (retrait/gonflement des matériaux de la couche de base).
- Défaut d'adhésion entre la couche de surface et la couche de base.
- Dégradation du liant bitumineux (oxydation et fragilisation de l'enrobé).
- Capacité portante inadaptée (sous-dimensionnement ou vieillissement de la chaussée).

e) Traitements recommandés :

- Application d'un enduit de surface (avec nettoyage préalable par aspiration ou pontage des fissures).
- Remplacement partiel (rabotage de la couche de roulement, voire purge structurelle si nécessaire)

2.2.2.3 Les Épaufures

a) Description :

Les épaufures constituent une pathologie de la chaussée caractérisée par :

- Un écrasement localisé du revêtement bitumineux
- Une désagrégation progressive de la couche de surface



Figure 2.10 Epaufures

b) Symptômes précurseurs :

- Dégradation progressive de l'accotement par érosion.

c) Risques d'aggravation :

- Extension de la zone endommagée, entraînant un rétrécissement ponctuel de la voie.

d) Causes probables :

- Déformation de l'enrobé bitumineux lors de sa pose.
- Compactage excessif dû au trafic routier sur une chaussée étroite ou en mauvais état (présence d'ornières).
- Soutien insuffisant des bordures (accotement non renforcé).

e) Solutions correctives :

- Interdire le stationnement ou la circulation sur les accotements.
- Surélever le niveau de l'accotement.
- Réhabiliter les accotements à l'aide d'un revêtement bitumineux.

2.2.3 Les remontées (d'eau ou d'argile) :



Figure 2.11 Remontées (d'eau ou d'argile)

a) Description :

Phénomène caractérisé par l'apparition d'eau claire ou chargée de particules fines à la surface de la chaussée, résultant d'une remontée capillaire à travers les fissures et les pores de la structure routière.

b) Causes probables :

- Défaillance de l'étanchéité de la chaussée.
- Système de drainage inefficace au sein des couches de la route.
- Migration de particules fines provenant des couches inférieures ou du sol support, entraînant une pollution des couches supérieures.

c) Risques d'aggravation :

- Détachement progressif de l'enrobé et désintégration des matériaux constitutifs.
- Affaiblissement de la portance de la chaussée.
- Diminution de l'adhérence superficielle.
- Apparition d'ornières et de nids-de-poule.

d) Solutions correctives :

Réhabilitation complète de la chaussée, incluant la mise en place d'une couche drainante (ex. : sable grossier) entre le terrain naturel et la structure existante.

2.2.3.2 Ressuage :

a) Description :

Migration du liant bitumineux en surface, formant un film continu masquant les granulats. Ce phénomène est particulièrement visible dans les traces de roues en raison du trafic répété.



Figure 2.12 Ressuage

b) Risques d'aggravation :

- Réduction de la friction superficielle (perte d'adhérence)
- Écaillage de la couche de surface (phénomène de plumage)
- Augmentation du risque de glissance et de perte de contrôle des véhicules

c) Origines probables :

- Dosage excessif en liant bitumineux
- Fluidité trop importante du liant utilisé
- Évaporation accélérée des composants volatils
- Incompatibilité entre le type d'enrobé et les contraintes mécaniques subies
- Action conjuguée de la chaleur excessive du revêtement et des sollicitations répétées du trafic

d) Solutions correctives :

- Décapage par hydro démolition (projection d'eau à haute pression)
- Traitement par grenailage de la surface

2.2.3.3 Boursouflures :

a) Description :

Altération localisée du revêtement se manifestant par des bombements prononcés créant des irrégularités de surface.

b) Signes précurseurs :

Légères déformations initiales entraînant une perte localisée de capacité portante de la couche de roulement.

c) Évolutions potentielles :

- Perte totale de portance structurelle
- Apparition de déformations secondaires en cascade
- Détérioration accélérée de la zone affectée

d) Étiologie :

Construction de chaussées sur :

- Sols argileux instables
- Zones salines (chotts ou sebkhas)
- Terrains à faible capacité portante

e) Protocole de traitement :

Pour des dommages localisés :

- Compactage des zones boursoufflées
- Application d'un enduit de scellement
- Optimisation du système de drainage

Pour des atteintes sévères :

Reconstruction complète avec insertion d'une couche drainante entre le terrain naturel et la structure existante.

2.2.4 Les déformations :

2.2.4.1 Affaissement :

Description :

Dépression localisée du profil de la chaussée, particulièrement fréquente sur les routes secondaires à structure souple.



Figure 2.13 affaissement

Évolution prévisible :

- Apparition de fissures longitudinales et transversales
- Développement d'un faïençage progressif aboutissant à la formation de nids-de-poule

Causes probables :

Déficiences structurelles de la chaussée due à :

- Un dimensionnement inadapté des couches constitutives
- Un tassement différentiel des matériaux
- Une présence hydrique excessive (drainage défaillant ou remontée de nappe phréatique)
- Un compactage insuffisant de l'assise
- Un manque de support latéral (accotements non stabilisés)
- Des surcharges routières répétées dépassant la capacité portante

Traitements recommandés :

Renforcement structural :

- Excavation et remplacement des matériaux dégradés par des granulats certifiés

- Reprofilage en grave-émulsion
- Application d'un enduit de surface pour uniformisation

Mesures complémentaires :

- Vérification du système de drainage
- Contrôle du compactage des nouvelles couches

2.2.4.2 Bourrelets (gonflements)



Figure 2.14 le bourrelet

a. Ballonnement

Description :

Un gonflement plus ou moins visible se forme à la surface de la route.

Évolution possible :

Sous l'effet du trafic, le revêtement peut se soulever, entraînant la formation d'un bourrelet.

Causes probables :

- Excès de liant dans les zones soumises à des contraintes mécaniques (freinage, virages, etc.).
- Enrobé trop flexible dû à une température excessive lors de la pose, rendant le liant inadapté.

Solution :

Reprofilage de la chaussée par élimination manuelle ou mécanique du bourrelet.

b. Flache (Dépression)

Description :

Affaissement localisé de la chaussée, créant une cavité arrondie ou elliptique.

Risques d'aggravation :

Apparition de fissures, faïençage, puis formation de nids-de-poule.

Origines possibles :

Portance insuffisante de la structure de la chaussée, causée par :

- Un compactage déficient des couches de base ou de surface.
- La présence d'une poche d'eau ou d'argile dans le sol support.

Une humidité excessive de la couche de base lors de la pose de la couche de roulement



Figure2.15 Le flache

Remèdes à apporter

Pour traiter les causes :

- Améliorer ou mettre en place un système de drainage efficace.
- Recharger et stabiliser les accotements.

Pour corriger les effets :

- Réaliser des réparations ponctuelles (enduit au point-à-temps ou enrobés).
- Renouveler la couche de surface si nécessaire.

2.2.4.4 La tôle ondulée

Description :

Ondulations transversales (perpendiculaires à l'axe de la route) avec une courte longueur d'onde



Figure 2.16 tôles ondulée

Causes possibles :

- Déformation de la couche de base lors du profilage initial.
- Sollicitations excessives dues au trafic.
- Instabilité de l'enrobé (liant inadapté ou mauvaise compaction).

Solutions :

Une réparation durable nécessite de traiter la cause profonde :

- Démolition et reconstruction de la couche de base.
- Remplacement du revêtement en enrobé

2.2.4.5 L'orniérage:

Avec l'augmentation du trafic poids lourds, l'orniérage est devenu l'une des dégradations prématurées les plus fréquentes sur les chaussées. Déformation longitudinale permanente due au tassement progressif sous le passage répété des roues. Ce phénomène, bien visible sur les routes non stabilisées (ex. : chemins boueux), affecte également les chaussées rigides ou

souples. La pression des pneus provoque un fluage des matériaux, conduisant à des rails de déformation dans les voies de circulation.

Remarque :

L'orniérage réduit le confort de conduite et accélère l'apparition d'autres désordres (fissures, infiltration d'eau).

Types d'orniérage :

a. Classification par profondeur ;

Les ornières sont catégorisées selon leur gravité :

- Petites ornières : 6 à 12,5 mm (début de déformation)
- Ornières moyennes : 12,5 à 25 mm (dégradation modérée)
- Grandes ornières : >25 mm (déformation sévère, risque accru pour la sécurité)

b. Classification par mécanisme de formation :

Ornières d'usure :

- Cause : Érosion progressive des granulats de surface sous l'effet combiné du trafic et des intempéries (pluie, gel, etc.).
- Caractéristiques : Perte de matériaux en surface, sans déformation majeure de la structure.

Ornières structurelles

- Cause : Tassement permanent des couches de la chaussée sous les charges répétées des véhicules lourds.
- Caractéristiques : Déformation verticale affectant la portance de la route.

Ornières d'instabilité

- Cause : Mouvement latéral des matériaux bitumineux, souvent lié à une mauvaise qualité de l'enrobé ou à un compactage insuffisant.
- Caractéristiques : Déformations en vague, fréquentes sur les chaussées souples mal conçues.

Remarque :

- Les ornières d'usure nécessitent un resurfaçage
- Les ornières structurelles impliquent souvent des travaux lourds (renforcement de la couche de base).
- Les ornières d'instabilité peuvent exiger un décaissement et remplacement des matériaux défectueux

2.3 Conclusion :

Les dégradations analysées dans cette étude altèrent gravement la fonctionnalité des chaussées, les rendant souvent impropres à la circulation et nécessitant des interventions correctives urgentes. Ces interventions peuvent prendre la forme de :

- Renforcements structurels pour les dommages profonds
- Réparations ponctuelles pour les détériorations localisées

Par ailleurs, dans une optique de développement durable, les enrobés vieillissants (fraisats) issus des chaussées dégradées feront l'objet d'une valorisation par recyclage, permettant ainsi :

- Une réduction des coûts de réhabilitation
- Une limitation de l'impact environnemental
- Une préservation des ressources naturelles

Cette approche combine ainsi **performance technique** et **responsabilité écologique** dans la gestion du patrimoine routier

Chapitre 03:

L'effet du BBR et de la FS

sur les propriétés du mortier

et du béton.

3.1 Introduction:

À l'heure actuelle, un grand nombre de routes construites sont entrées dans la phase de réparation, de rénovation et de révision, la production annuelle de déchets d'asphalte atteint ne cesse d'accroître dans le monde. Il est de plus en plus important de recycler et de réutiliser les matériaux du béton bitumineux pour le développement durable de l'ingénierie routière (Tabatabae et al., 2016 ; Kaufmann et al., 2019). De nombreuses recherches ont été menées sur les matériaux SBBR au Japon, en Europe et en Amérique, et les résultats pourraient être utilisés pour guider les applications des matériaux SBBR.

3.2 Technique d'utilisation des granulats recyclés

Il est évident que les niveaux d'humidité des SBBR peuvent altérer l'ouverture et l'homogénéité des mélanges de béton et mortier, ce qui pourrait avoir un impact sur les caractéristiques du béton et mortier durci. Si, comme nous l'avons vu, la saturation des granulats recyclés avant le gâchage permet d'empêcher leur absorption d'eau élevée, il existe différentes méthodes de pré-saturation qui sont plus ou moins utiles.

3.2.1 Ajout de la quantité d'eau exacte d'absorption

La quantité d'eau ajoutée varie en fonction de la quantité d'eau initiale et de l'efficacité de l'absorption des granulats recyclés. Il est important de connaître l'absorption potentielle d'eau et l'évolution de l'absorption au fil du temps des granulats recyclés afin de prédire le rapport E/C après le malaxage. Il est important de s'assurer que l'eau ajoutée est en adéquation avec la quantité d'eau absorbée par les SBBR. L'avantage de la méthode de substitution de l'eau de gâchage est qu'elle permet de produire du béton ou du mortier de SBBR et du béton ou du mortier ordinaire de manière similaire. En effet, les pores des SBBR sont remplis avec de la pâte de ciment pendant le processus de malaxage, ce qui peut entraîner une surabondance d'eau dans le mélange, ce qui entraîne une augmentation indésirable du rapport E/C efficace. Il est plus probable que cette situation se produise lorsque le mélange le plus riche en eau se trouve dans la pâte de ciment.

3.2.2 Immersion dans l'eau avant le malaxage

Cette méthode implique d'incorporer les SBBR dans le mélange à l'état saturé, ce qui annule l'absorption d'eau du mélange, ou presque saturée, ce qui réduit considérablement l'absorption d'eau. L'objectif de cette technique est de minimiser autant que possible l'échange

d'eau entre les granulats et la pâte de ciment. De nombreux chercheurs le proposent comme moyen d'améliorer l'uniformité de la teneur en eau des granulats et de maintenir le rapport E/C de la pâte de ciment. Les principales difficultés rencontrées par cette méthode sont de déterminer la quantité d'eau requise pour la pré-saturation et de l'atteindre. Il est essentiel de saturer complètement les granulats pour empêcher toute évacuation d'eau dans les agrégats. Il est possible de pré-saturer les SBBR en les immergeant dans l'eau pendant une période spécifique. Toutefois, il est nécessaire de sécher la surface du granulat car l'eau de surface pourrait entraîner une augmentation du rapport E/C. En raison de la complexité d'assurer cette condition à grande échelle, l'emploi d'arroseurs sur les granulats sur le site de construction. Selon Lima, il existerait des problèmes d'uniformité et un risque d'emport des particules fines. C'est pourquoi la pré-saturation soit réalisée à l'intérieur du mélangeur.

3.3 Les propriétés physiques des SBBR

Le sable de bitume recyclé, également connu sous le nom de RAP (Recycled Asphalt Pavement), possède plusieurs propriétés physiques qui peuvent varier en fonction de la composition exacte du mélange et du processus de recyclage utilisé. Cependant, voici quelques propriétés physiques générales associées au sable de bitume recyclé :

Granulométrie: Le sable de bitume recyclé est généralement constitué de granulats de différentes tailles. La granulométrie peut varier en fonction du processus de concassage et de tamisage utilisé lors du recyclage.

Densité: La densité du sable de bitume recyclé dépend de la densité des agrégats d'origine et du pourcentage de liant bitumineux restant dans le matériau recyclé.

Porosité: Comme pour l'asphalte conventionnel, le sable de bitume recyclé peut avoir une certaine porosité, qui peut influencer les propriétés de drainage et de résistance à l'eau.

Durabilité: La durabilité du sable de bitume recyclé dépend de divers facteurs, notamment de la qualité des matériaux d'origine, du processus de recyclage utilisé, et des conditions environnementales auxquelles le matériau est exposé.

Il est important de noter que les propriétés physiques du sable de bitume recyclé peuvent varier considérablement en fonction de facteurs tels que la source des matériaux recyclés, les

méthodes de traitement et de recyclage utilisées, ainsi que les conditions d'utilisation et d'entretien sur le site de construction.

Absorption d'eau:

Le sable de bitume recyclé peut avoir une certaine capacité d'absorption d'eau, bien que celle-ci soit généralement plus faible que celle des agrégats non traités en raison de la présence de liant bitumineux.

L'absorption d'eau est un paramètre important pour évaluer sa qualité et sa durabilité dans les applications routières. Selon, le recyclage du sable de bitume peut améliorer la qualité du mélange bitumineux en réduisant l'absorption du bitume par les granulats, ce qui contribue à une oxydation moins rapide du bitume et à une protection de l'environnement.

En outre, l'étude montre que l'absorption d'un granulats recyclé peut varier en fonction du temps, ce qui affecte les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des bétons à base de sable de démolition et d'ajouts minéraux. Les résultats indiquent que l'ajout de fumées de silice et de laitier améliore les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des bétons à base de 50% d'agrégat fin recyclé.

De plus, l'étude évalue les propriétés mécaniques des granulats de béton recyclé (GBR) et montre que la substitution des granulats naturels par des GBR peut améliorer la résistance au niveau des faibles classes de performances, et la réduire au niveau des hautes classes de performances. Les analyses microstructurales confirment l'excellente continuité entre ancienne et nouvelle pâte de ciment après 28 jours de durcissement, pour des mortiers réalisés avec des sables de GBR secs.

L'absorption d'eau du sable de bitume recyclé est un paramètre clé pour évaluer sa qualité et sa durabilité dans les applications routières. Les études montrent que le recyclage du sable de bitume peut améliorer la qualité du mélange bitumineux en réduisant l'absorption du bitume par les granulats, et que l'ajout de fumées de silice et de laitier améliore les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité des bétons à base de sable de démolition et d'ajouts minéraux.

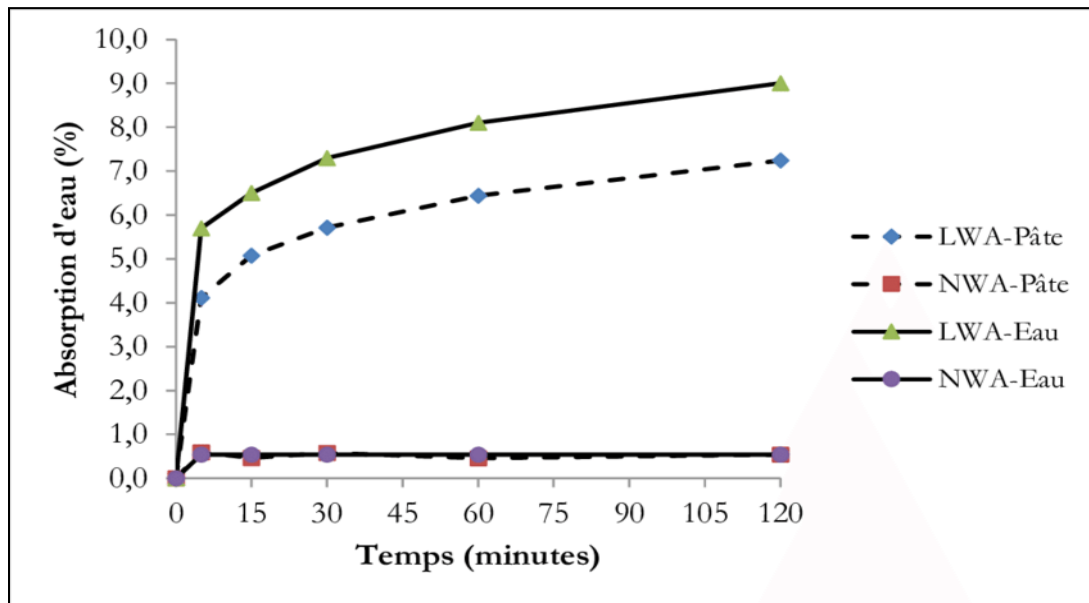


Figure 3.1 Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps

3.4 Propriétés du mortier à l'état frais

Les propriétés à l'état frais du sable de bitume recyclé peuvent inclure divers aspects liés à sa manipulation et à son comportement lorsqu'il est utilisé dans la fabrication de mélanges bitumineux. Voici quelques-unes des propriétés à l'état frais du sable de bitume recyclé :

3.4.1 Etalement

Chaidachatorn et al., 2019 ont étudiés l'effet de l'incorporation des SBBR dans les mortiers avec différents rapports E/C. Les vingt-cinq résultats des tests d'écoulement du CM frais sont présentés dans le tableau 3.1. La valeur E/C de 0,40 est inadéquate pour l'étalement tel que vue par un étalement nul. L'eau pour produire du mortier de ciment doit avoir un étalement de 110 ± 5 mm. L'étalement de mortier pour tous les types de granulats dépend du rapport E/C (Haach et al., 2011). Plus le rapport E/C est élevé, plus l'étalement est élevé. Le tableau 3.1 montre que le remplacement du SBBR a augmenté de manière significative le flux de RAP-CM. Selon les exigences de débit, le rapport E/C la plus appropriée est de 0,60, ce qui dépend du remplacement du SBBR. Le remplacement de 25 à 50 % du SBBR a amélioré l'étalement du SBBR-CM à un rapport E/C de 0,60 pour répondre aux spécifications ; cependant, les valeurs d'étalement les plus élevées sont trouvées pour SBBR > 50 %. La valeur de l'étalement de E/C = 0,7 pour tout remplacement de SBBR est supérieure aux spécifications et la très grande valeur de l'étalement ne peut pas être mesurée pour

RAP > 75 %.

Tableau 3.1 Résultat de l'étalement des mortiers à base de SBBR pour différents rapport E/C. (Source : Chaidachatorn et al., 2019)

Sample ID	w/C	Percentage of sand by weight	Percentage of RAP by weight	Flow (%)
M0.40R0*	0.4	100	0	0
M0.40R25	0.4	75	25	0
M0.40R50	0.4	50	50	0
M0.40R75	0.4	25	75	0
M0.40R100	0.4	0	100	0
M0.45R0*	0.45	100	0	9.90
M0.45R25	0.45	75	25	12.24
M0.45R50	0.45	50	50	23.54
M0.45R75	0.45	25	75	34.33
M0.45R100	0.45	0	100	43.56
M0.50R0*	0.5	100	0	21.78
M0.50R25	0.5	75	25	35.21
M0.50R50	0.5	50	50	51.56
M0.50R75	0.5	25	75	63.43
M0.50R100	0.5	0	100	84.15
M0.60R0*	0.6	100	0	70.29
M0.60R25	0.6	75	25	95.88
M0.60R50	0.6	50	50	110.45
M0.60R75	0.6	25	75	132.30
M0.60R100	0.6	0	100	142.57
M0.70R0*	0.7	100	0	135.44
M0.70R25	0.7	75	25	145.03
M0.70R50	0.7	50	50	**
M0.70R75	0.7	25	75	**
M0.70R100	0.7	0	100	**

Remarques : * Mortier témoin ** Etalement très fluide.

3.4.2 Densité à l'état frais

Chaidachatorn et al., 2019 ont étudiés l'effet de l'incorporation des SBBR dans les mortiers sur la densité à l'état frais avec différents rapports E/C La densité des différents mélanges est illustrée à la figure 3.1. Pour un rapport E/C particulier, la densité du RAP-CM diminue avec l'augmentation du remplacement du SBBR car la densité apparente du SBBR est inférieure à celle du sable naturel. Le changement de densité est insignifiant dans les bas rapports E/C ($E/C < 0,50$) tandis que la densité du RAP-CM diminue avec l'augmentation du rapport E/C en raison du plus grand nombre de pores dans la pâte de ciment dans les grands rapports E/C ($E/C > 0,50$).

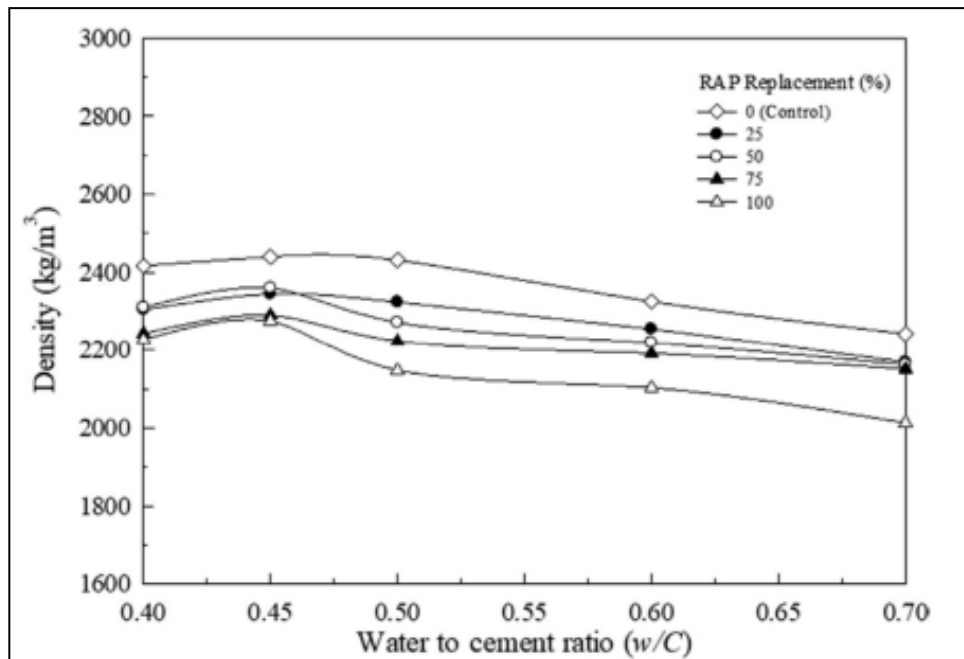


Figure 3.2 La densité à l'état frais des différents mortiers utilisée. (Source : Chaidachatorn et al., 2019)

3.5 Propriétés du mortier à l'état durci

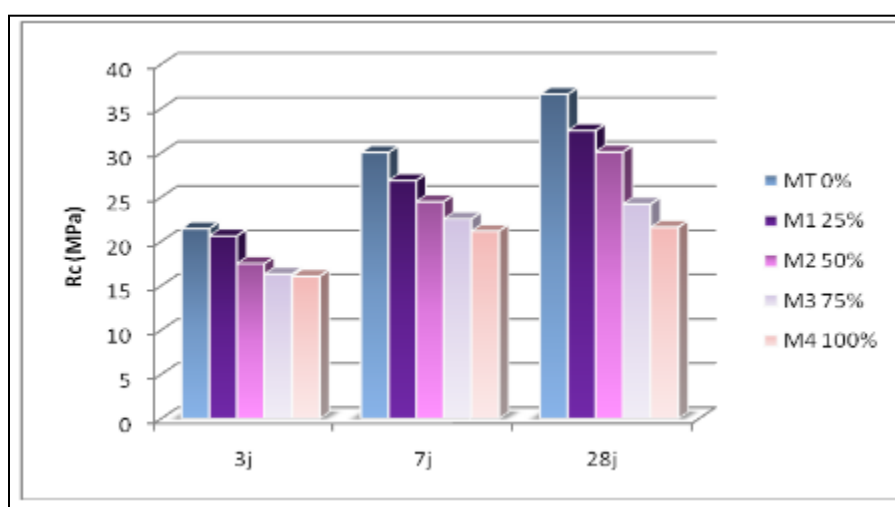
3.5.1 Résistance à la compression:

La résistance à la compression du sable de bitume recyclé peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la qualité des agrégats recyclés, le pourcentage de liant bitumineux, et les méthodes de compactage utilisées lors de la construction de la chaussée. La résistance à la compression est un paramètre essentiel pour évaluer la durabilité et la résistance des mortiers et bétons recyclés. Les résultats de la recherche montrent que la résistance à la compression du sable bitumineux recyclé varie en fonction du taux de remplacement du sable naturel par du sable bitumineux recyclé. Selon l'étude publiée en 2008, la résistance à la compression du sable bitumineux recyclé augmente avec l'âge et diminue à mesure que la proportion de sable naturel remplacé par du sable bitumineux recyclé augmente.

Tableau 3.2 Résistance à la compression des mortiers réalisés

Types des mortiers	Rc (MPa)			$\Delta Rc / Rc$ (%)
	3j	7j	28j	28j
MT0%	21,46	30,03	36,61	0
M1 25%	20.63	26.88	32,51	11.19
M2 50%	17.51	24.50	30,11	17.75
M3 75%	16.32	22.55	24,22	33.84
M4 100%	16.07	21.17	21,6	40.99

Les différentes valeurs de la résistance à la compression sont données par la Figure 3.3

**Figure 3.3** Variation de la résistance à la compression des différents types des mortiers

Herihiri et al., 2015 ont montré que la résistance de compression est de 30 MPa avec 50% de substitution en sable recyclé, par comparaison de leur mortier de référence, la chute en résistance est de l'ordre de 17,75%. De plus, l'étude souligne l'importance de la qualité du sable de bitume recyclé pour assurer une résistance de compression adéquate. Elle recommande de veiller à la procédure réglementaire pour effectuer les essais et de prendre en compte les caractéristiques du sable de bitume recyclé, telles que la teneur en fines, la résistance à la fragmentation et la stabilité dimensionnelle. En résumé, la résistance de compression du sable de bitume recyclé est un paramètre crucial pour évaluer la durabilité et la résistance des mortiers et bétons recyclés. Il est important de prendre en compte les caractéristiques du sable de bitume recyclé et de veiller à la procédure réglementaire pour effectuer les essais pour assurer une résistance de compression adéquate.

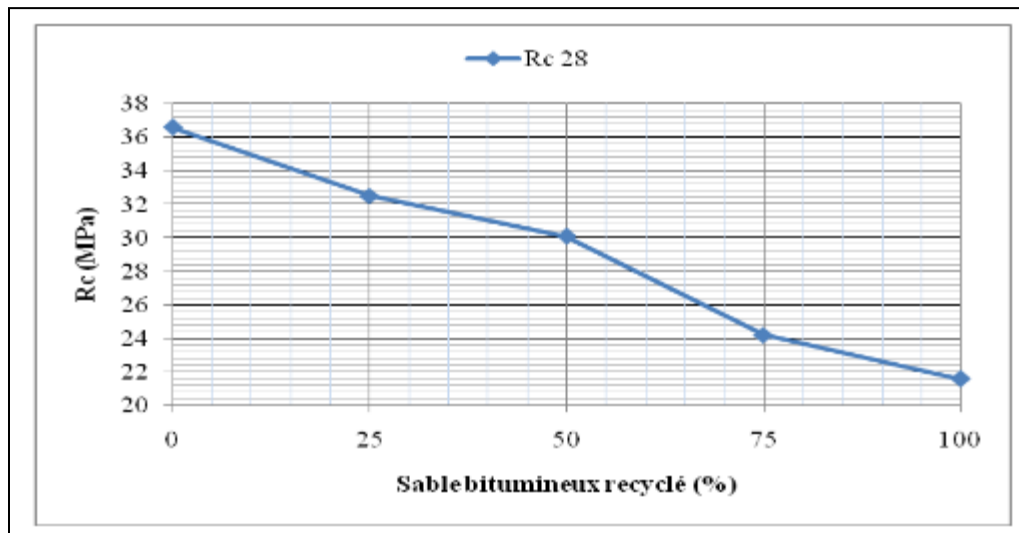


Figure 3.4 Variation de la résistance à la compression en fonction du sable bitumineux recyclé

Ce résultat se rapproche des résultats trouvés ailleurs. En effets, une diminution de résistance serait de l'ordre de 61 et de 23% respectivement pour un remplacement à 100% de gros ou de fins granulats naturels par des granulats recyclés.

Les résultats des résistances à la compression trouvée par l'étude menée par Abraham et Ransinchung, 2018 sont indiquées sur les figures. 3.5. Les résultats des tests de résistance à 7 et 28 jours sont représentés dans un graphique (barre d'erreur avec écart type). Avec l'augmentation de la teneur en granulats SBBR dans le mortier de ciment, la résistance à la compression diminue (à la fois pendant 7 et 28 jours), avec une diminution maximale de 41,7 % et 37,9 % de la résistance à 28 jours pour les mélanges R et les mélanges RAP respectivement. Ceci était conforme à d'autres études connexes sur le remplacement de la SN par de SBBR dans du mortier de ciment ou du béton (An et al. 2016). La diminution de la résistance du mortier de ciment peut contribuer à l'augmentation de la porosité de la zone de transition interfaciale (ITZ) et à la prédominance de la rupture de cohésion de l'asphalte par rapport à la rupture d'adhérence de l'asphalte. Par conséquent, des recherches plus approfondies sur la porosité ITZ sont nécessaires. Il a également été observé que les paramètres de résistance des mélanges SBBR sont supérieurs à ceux des mélanges.

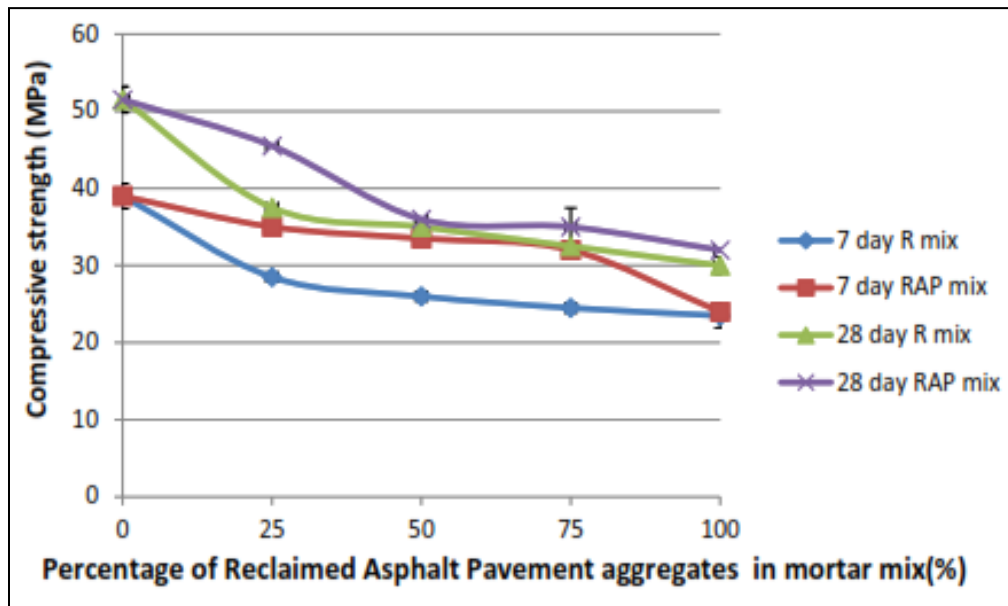


Figure 3.5 Résistance à la compression des mélanges de mortier avec divers pourcentages de SBBR

3.5.2 Résistance à la traction par flexion:

La résistance à la traction du mortier de sable de bitume recyclé dépend de la qualité et de la distribution des agrégats dans le mélange, ainsi que de la quantité et de la qualité du liant bitumineux utilisé pendant le processus de recyclage. Une résistance à la traction adéquate est essentielle pour assurer la durabilité et la performance du matériau dans des conditions de charge et de contrainte variées. La résistance de traction par flexion est un paramètre essentiel pour évaluer la durabilité et la résistance des mortiers et bétons recyclés. Selon l'étude, la résistance de traction par flexion des mortiers recyclés à base de sable bitumineux recyclé augmente en fonction de l'âge et diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage en substitution en sable recyclé. Les résultats trouvés durant ce travail sont résumés dans la figure 3.6.

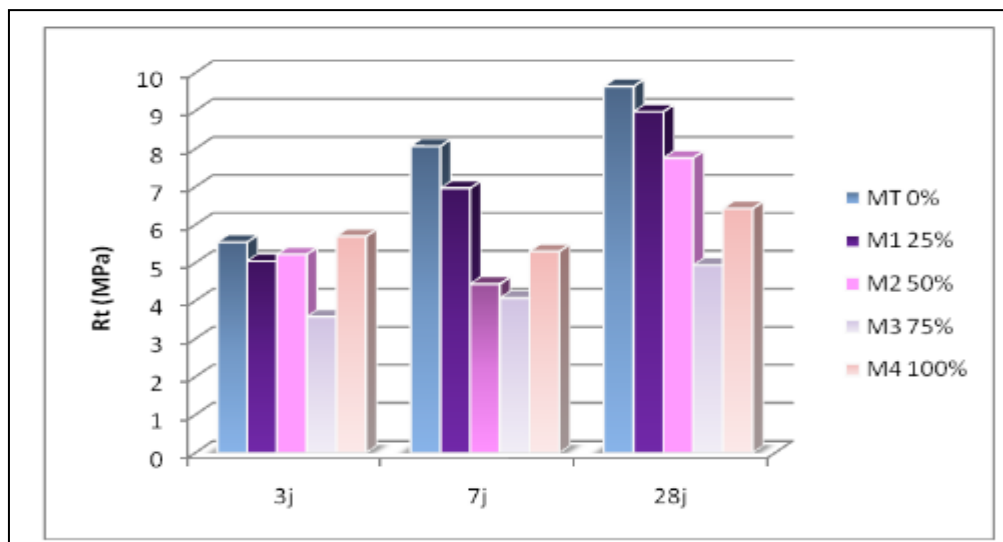


Figure 3.6 Variation de la résistance à la traction par flexion des différents types de mortiers

La résistance en traction à l'âge de 3 jours est comparable par rapport au mortier témoin, mais à partir de 7 jours de cure on remarque bien une chute considérable

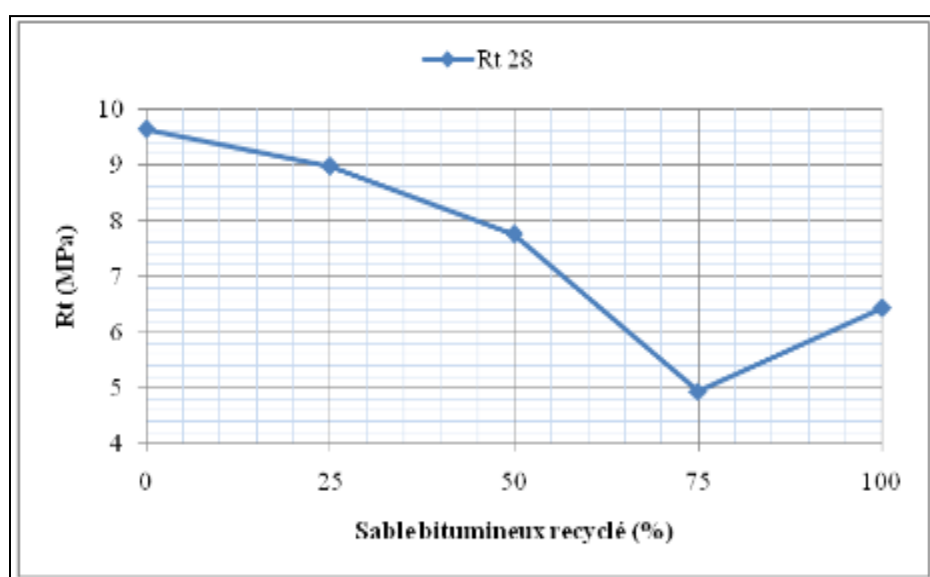


Figure 3.7 Variation de la résistance à la traction en fonction du sable bitumineux recyclé

Cette chute est d'environ 19,55% pour un remplacement de 50% en sable recyclé par rapport à leur mortier témoin. En effet de l'ancienne quantité du bitume qui entoure les granulats est la cause principale de cette différence de résistance en traction. Ce résultat est confirmé par Quellet qui avait conclu que, la résistance en traction par flexion n'est pas sensible aux variations de rapport E/C mais plutôt à la nature des granulats.

Les résultats des résistances à la traction par flexion trouvée par l'étude menée par Abraham et Ransinchung, 2018 sont indiquées sur la figure 3.8. Les résultats des tests de résistance à 7 et 28 jours sont représentés dans un graphique (barre d'erreur avec écart type). Avec l'augmentation de la teneur en granulats SBBR dans le mortier de ciment, la résistance à la traction diminue (à la fois pendant 7 et 28 jours), avec une diminution maximale de 39,3 % et 55,1 % respectivement. Ceci était conforme à d'autres études connexes sur le remplacement de la SN par de SBBR dans du mortier de ciment ou du béton (An et al., 2016). La diminution de la résistance du mortier de ciment peut contribuer à l'augmentation de la porosité de la zone de transition interfaciale (ITZ) et à la prédominance de la rupture de cohésion de l'asphalte par rapport à la rupture d'adhérence de l'asphalte. Par conséquent, des recherches plus approfondies sur la porosité ITZ sont nécessaires. Il a également été observé que les paramètres de résistance des mélanges SBBR sont supérieurs à ceux des mélanges.

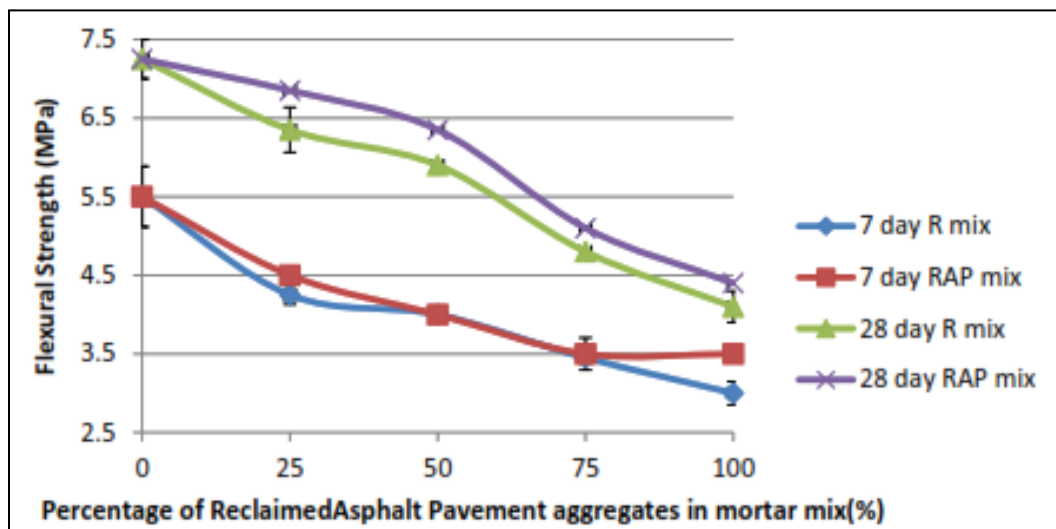


Figure 3.8 Résistance à la compression des mélanges de mortier avec divers pourcentages de SBBR

3.5.3 Le retrait

Le retrait est un phénomène important à considérer dans la conception et l'utilisation du béton, et l'incorporation de sable bitumineux peut avoir des effets spécifiques sur ce comportement. Voici une analyse détaillée des impacts potentiels du sable bitumineux sur le retrait du béton :

3.5.3.1 Retrait plastique :

Ce type de retrait se produit lorsque l'eau à la surface du béton frais s'évapore plus rapidement que l'eau de la masse interne du béton. L'ajout de sable bitumineux pourrait influencer ce phénomène en modifiant la teneur en eau et la viscosité du mélange, potentiellement réduisant la vitesse d'évaporation grâce à la nature imperméable du bitume.

3.5.3.2 Retrait de séchage :

Ce retrait survient lorsque le béton durci perd de l'eau dans un environnement sec. Le bitume, étant un matériau hydrofuge, peut réduire l'évaporation de l'eau du béton, diminuant ainsi le retrait de séchage. Cependant, cela dépend fortement de la proportion de sable bitumineux utilisé et de la compatibilité entre les composants.

3.5.3.3 Retrait endogène :

Ce type de retrait est dû à la consommation d'eau par la réaction d'hydratation du ciment. Le sable bitumineux peut potentiellement affecter cette réaction en réduisant la disponibilité de l'eau pour l'hydratation du ciment, ce qui pourrait réduire le retrait endogène.

3.5.3.4 Effets du SBBR sur le Retrait

Le bitume contenu dans le sable bitumineux agit comme une barrière à la perte d'eau, ce qui peut réduire les effets du retrait plastique et de séchage. La nature collante du bitume peut également aider à maintenir l'intégrité du mélange, réduisant les fissures de retrait.

L'ajout de sable bitumineux peut modifier les propriétés mécaniques du béton, comme la résistance à la compression et la flexibilité. Un béton plus flexible peut mieux résister aux contraintes induites par le retrait.

Il est crucial de doser correctement le sable bitumineux pour éviter des effets négatifs. Une quantité excessive de bitume peut compromettre la cohésion du mélange et la liaison avec les armatures, tandis qu'une quantité insuffisante peut ne pas offrir les bénéfices attendus en termes de réduction du retrait.

L'utilisation de sable bitumineux dans le béton et le mortier peut influencer le retrait de diverses manières, principalement en réduisant la perte d'eau et en modifiant la structure interne du béton. Des essais spécifiques et un ajustement précis du mélange sont nécessaires

pour optimiser les bénéfices et minimiser les inconvénients. Les études et références mentionnées ci-dessus offrent des bases solides pour comprendre et appliquer ces modifications dans des contextes pratiques.

3.5.4 Effets des SBBR sur la sorptivité

Les résultats de la sorptivité trouvés par l'étude d'Abraham et Ransinchung, 2018 sont indiqués sur la figure. 3.9 et 3.10 Le taux d'absorption initial et le coefficient d'absorption capillaire ont été trouvés pour les mélanges RAP ainsi que R montrent la variation du taux initial d'absorption et du coefficient d'absorption capillaire avec différents pourcentages de granulats RAP dans le mélange de mortier. (barre d'erreur avec écart type). Il ressort clairement des figures. 3.9 et 3.10 indiquent qu'à mesure que le pourcentage d'agrégats RAP augmente dans le mélange de mortier, le taux initial d'absorption et le coefficient d'absorption capillaire diminuent. Bien que la porosité du mortier de ciment contenant des granulats RAP soit supérieure à celle du mélange témoin, la même tendance ne s'est pas manifestée dans les paramètres de sorptivité du mortier de ciment. Cela était dû à la fonte de la couche d'asphalte entourant les fins agrégats de RAP lors du séchage et du suintement dans les pores capillaires et à la surface de l'échantillon de mortier, comme le montre la figure 3.11 (i et ii). Le taux d'absorption et le coefficient ont donc tendance à diminuer. La fusion du bitume à température élevée sur la surface d'échantillons de béton ou de mortier a également été observée pour des échantillons de sorptivité de béton contenant des granulats grossiers de RAP (Singh, 2017).

En raison des tendances contradictoires entre la porosité et la sorptivité, la procédure proposée par ASTM C1585 pour la sorptivité ne peut pas fournir une mesure correcte du taux d'absorption et du coefficient d'absorption capillaire. Par conséquent, une véritable comparaison des mélanges de mortier RAP avec le mélange témoin ne peut pas être effectuée. Il est donc nécessaire d'étendre cette méthode aux bétons et mortiers contenant des granulats RAP.

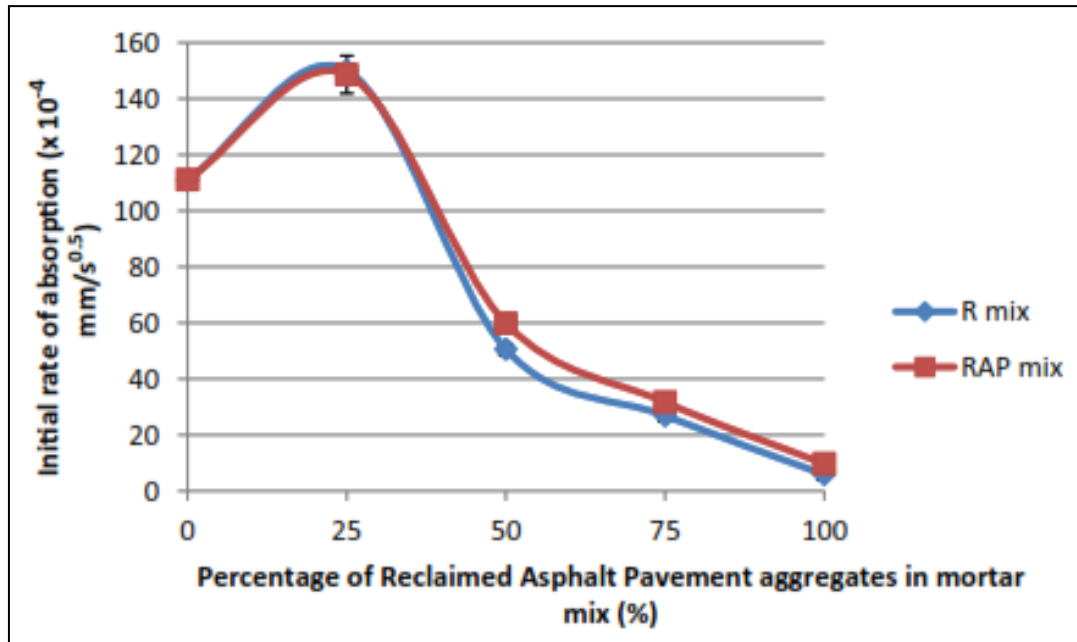


Figure 3.9 Taux initial d'absorption des mélanges de mortier avec différents pourcentages du SBBR.

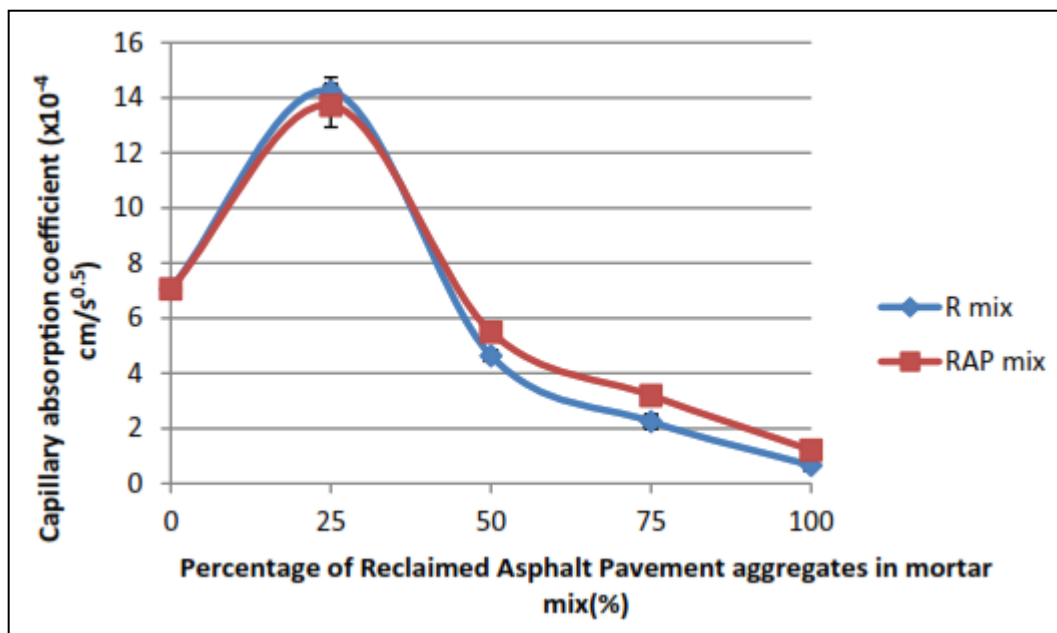


Figure 3.10 Coefficient d'absorption capillaire des mélanges de mortier avec différents pourcentages du SBBR

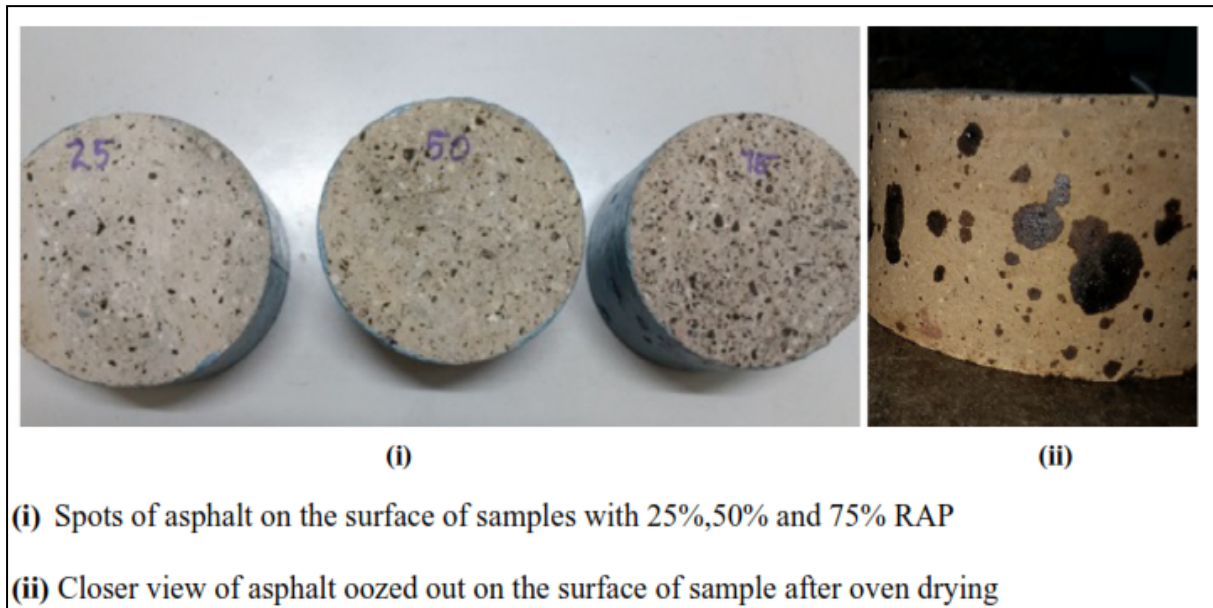


Figure 3.11 Échantillons de mortier RAP conditionnés pour les tests de sorptivité

3.6 Effet de la fumée de silice sur les propriétés des bétons et des mortiers

3.6.1 Effet de la FS sur l'étalement :

Les résultats des essais effectués par Serkan Etili sur les mélanges produits dans le cadre de l'étude l'ajout de fumé de silice et les granulats des pneus sont présentés à la figure 3.12. Tous les mélanges satisfont aux exigences de la classe SF1 de la norme Slump-flow, soit un diamètre compris entre ≥ 550 mm et ≤ 650 mm.

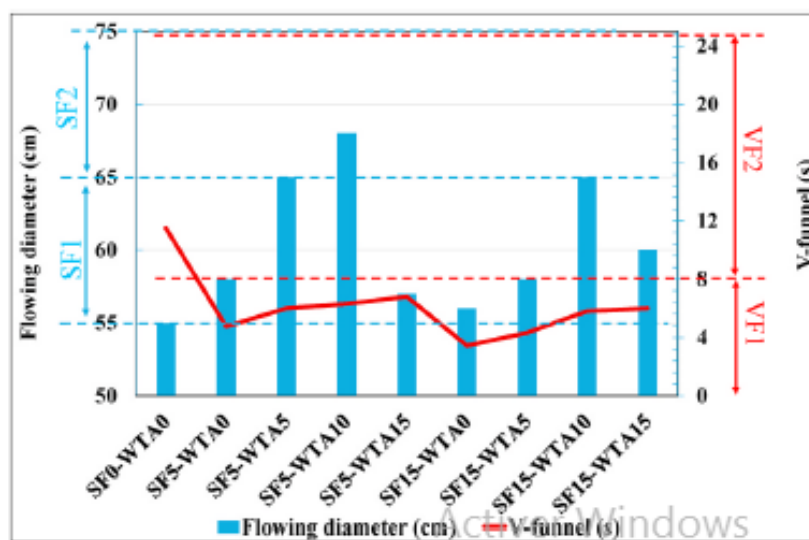


Figure 3.12 Résultats du diamètre d'écoulement et de l'entonnoir en V.
(Source : S. Etili., 2023)

De plus, il est observé que les mélanges SF5-WTA5, SF5-WTA10 et SF5-WTA15 répondent aux exigences de la classe SF2 (Slump-flow ≥ 660 mm, ≤ 750 mm). À mesure que le taux de substitution par WTA augmente, il a été constaté que le béton auto-plaçant (BAP) atteint un diamètre d'écoulement plus élevé, en raison d'un effet combiné des substitutions par WTA et SF (voir Fig. 3.12).

Par ailleurs, le diamètre d'écoulement le plus élevé a été mesuré à 68 cm pour le mélange SF5-WTA10, c'est-à-dire le mélange avec 5 % de SF et 10 % de WTA. Le diamètre d'écoulement le plus faible a été obtenu à 55 cm pour le mélange SCCSF0R0, soit le mélange témoin. Il est observé que les proportions de SF et de WTA ont un effet commun sur le diamètre d'écoulement.

Des résultats différents ont été obtenus selon les variations des rapports SF et WTA utilisés pour les temps d'écoulement mesurés avec le cône en V (v-funnel). Les résultats de la figure 3.12 montrent que la substitution de SF combinée à celle de WTA a entraîné une augmentation du temps d'écoulement au cône en V. Toutefois, cela a un effet positif comparé au mélange témoin, car des temps d'écoulement plus faibles ont été enregistrés pour les mélanges modifiés.

Les réductions du temps d'écoulement au cône en V peuvent résulter d'une augmentation de la fluidité du béton frais, due à la présence de particules de caoutchouc dans le mélange, ainsi qu'à la propriété non absorbante de ce matériau vis-à-vis de l'eau libre excédentaire (Gesoglu et al., 2017).

Les résultats relatifs aux tests du temps de propagation T50 sont présentés dans la figure 10. La valeur T50 a été mesurée à 4 s pour le béton témoin. En revanche, les temps T50 les plus bas et les plus élevés ont été observés respectivement dans les mélanges SF5-WTA10 et SF15-WTA15.

Les classes de viscosité sont déterminées selon les normes de l'EFNARC (EFNARC et The European Project Group, 2005) en évaluant ces valeurs conjointement avec les résultats du cône en V.

Lorsque les valeurs obtenues sont examinées, il apparaît que les mélanges concernés appartiennent à la classe de viscosité VS2/VF2. En analysant les temps T50 obtenus, on observe que le temps augmente avec l'augmentation de la teneur en SF dans la composition

contenant du WTA, mais que des temps T50 plus faibles peuvent également être obtenus avec une faible teneur en SF et une teneur élevée en WTA (Figure 3.13).

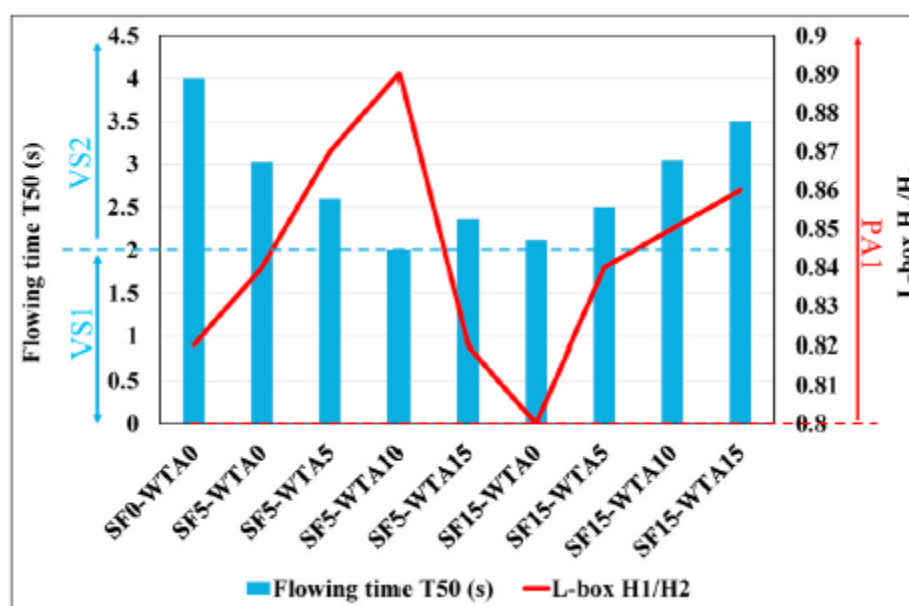


Figure 3.13 Temps d'écoulement et résultats de la boîte L. (Source : S. Etl., 2023)

Les valeurs relatives aux rapports (h_w/h_a) obtenus à la suite de l'essai au caisson en L (L-box) varient entre 0,8 et 0,89. Le rapport h_w/h_a le plus élevé a été mesuré dans le mélange SF5-WTA10, tandis que le plus faible a été observé dans le mélange SF15-WTA0. Avec une augmentation du taux de WTA, le rapport h_w/h_a atteint 0,89 dans le cas d'une substitution de 5 % de SF.

En revanche, lorsque les résultats avec 15 % de substitution de SF sont examinés, la valeur de 0,8 obtenue pour le mélange sans WTA atteint 0,86 avec une teneur croissante en WTA.

D'après les critères de l'EFNARC (EFNARC et The European Project Group, 2005), les classes de capacité de passage peuvent être définies comme PA1, puisque les valeurs obtenues sont supérieures ou égales à 0,8 (Figure 3.13).

3.6.2 Résistance à la compression :

L'incorporation de fumée de silice (microsilice) dans le béton améliore de manière significative sa résistance à la compression, en grande partie grâce à ses propriétés pouzzoloniques et à sa capacité à densifier la microstructure du matériau. Dans une étude menée par Mustafa Sarıdemir, l'effet de l'ajout de fumée de silice (FS), de poudre de verre

(PV), ainsi que de leur combinaison a été examiné. Les résultats expérimentaux ont révélé que tous les bétons produits dans le cadre de l'étude présentent une résistance à la compression élevée, avec des valeurs à 28 jours comprises entre 70 et 105 MPa. Il ressort de l'étude que les bétons contenant de la FS présentent une résistance à la compression supérieure à ceux contenant uniquement de la PV ou au mélange témoin. Les gains de résistance à 28 jours par rapport au mélange témoin sont de 21,7 %, 28,56 %, 38,79 %, 31,46 % et 13,32 % pour des taux d'incorporation de FS de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 %, respectivement. La résistance maximale (105 MPa) a été obtenue avec un dosage de 15 % de FS. Par ailleurs, la combinaison de FS et de PV s'est révélée plus efficace que l'ajout de PV seul ou le mélange témoin. Le mélange optimal, contenant 15 % de FS et 5 % de PV, a permis d'atteindre une résistance de 100 MPa à 28 jours. Les données du tableau 3.3 et de la figure 3.14 indiquent également que les mélanges avec 10 % et 15 % de PV offrent une résistance supérieure à celle du témoin, tandis que les mélanges avec 20 % et 25 % de PV présentent une résistance inférieure. Plus précisément, les augmentations de résistance par rapport au témoin sont d'environ 6 % et 2 % pour les dosages en PV de 10 % et 15 %, tandis que les diminutions observées sont de l'ordre de 6 % et 10 % pour les dosages de 20 % et 25 %

Tableau 3.3 Résultats des tests de poids unitaire, de résistance à la compression et de module d'élasticité. (Source : Mustafa Sarıdemir., 2013)

Mixtures code	FUW (kg/m ³)	f_c (MPa)	E_c (GPa)
C	2458.37	74.90	29.69
5SF	2470.81	91.16	38.88
10SF	2474.07	96.29	41.55
15SF	2463.41	103.95	43.03
20SF	2454.81	98.46	40.35
25SF	2447.70	84.88	35.15
5GP	2462.22	73.78	30.60
10GP	2458.67	79.56	36.54
15GP	2459.56	76.42	32.44
20GP	2450.67	70.36	28.44
25GP	2447.41	67.72	25.22
2.5SF-2.5GP	2456.30	90.25	37.22
5SF-5GP	2462.22	90.12	38.89
5SF-10GP	2476.44	96.91	40.35
5SF-15GP	2475.26	85.75	34.22
5SF-20GP	2466.37	85.96	33.68
10SF-5GP	2475.26	99.78	42.76
10SF-10GP	2472.30	98.06	39.71
10SF-15GP	2460.44	97.37	40.09
15SF-5GP	2469.33	100.38	43.28
15SF-10GP	2463.41	91.75	37.05
20SF-5GP	2458.67	87.49	34.15

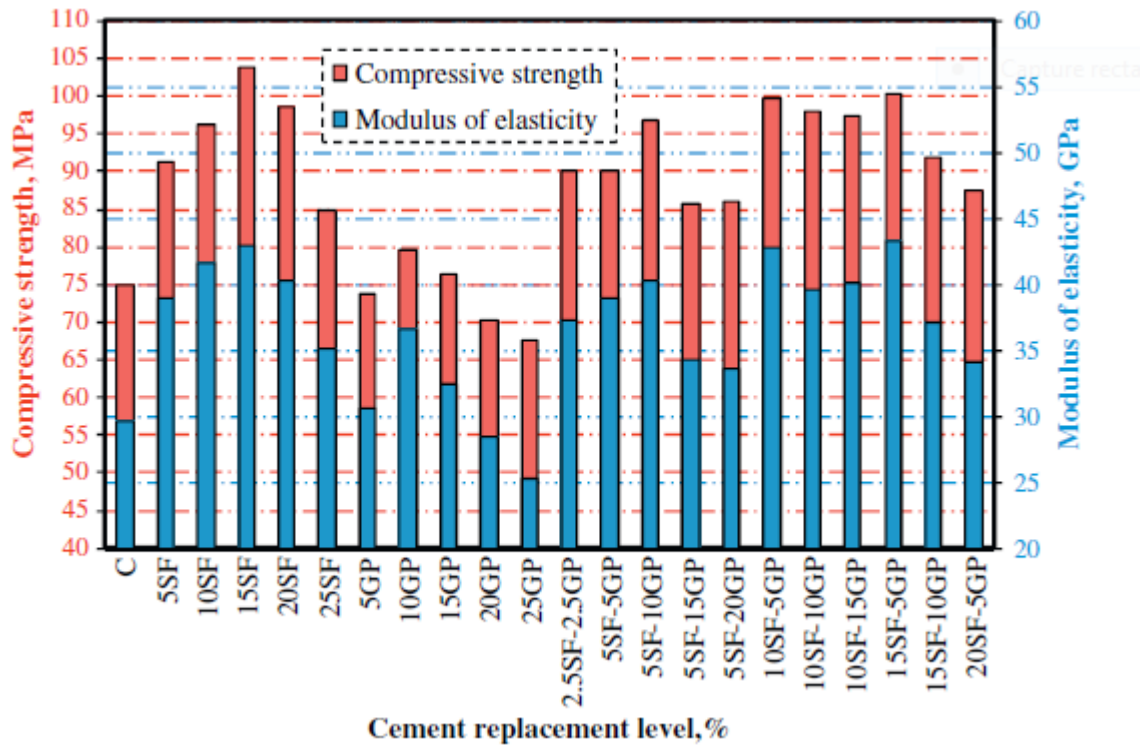


Figure 3.14 Résultats expérimentaux de la résistance à la compression et du module d'élasticité. (Source : Mustafa Saridemir., 2013)

La FS fait partie des adjuvants minéraux ; il peut améliorer les propriétés microstructurales et mécaniques du béton. L'amélioration des propriétés physiques et chimiques par l'ajout de SF a été expliquée comme suit : des particules ultrafines comblent les vides du ciment, ce qui densifie la microstructure de la pâte de ciment et favorise la réaction du SF avec les hydrates de ciment.

3.6.3 Résistance à la traction par flexion :

L'objectif de Merve Şahin Yönel pour cette étude expérimentale est d'étudier les performances mécaniques et de durabilité de mortiers autoplaçants contenant des déchets industriels et de la pierre naturelle afin de développer un mortier respectueux de l'environnement. Des séries binaires de déchets de bore (B), de fumée de silice (S) et de scories volcaniques (V) ont été formées en substituant jusqu'à 95 % en poids par du ciment Portland

La figure 3.14 présentent les résultats moyens de résistance à la flexion de tous les mélanges SCM pour des périodes de cure de 3, 28 et 90 jours. L'examen de la résistance à la

flexion a révélé une bonne concordance avec les valeurs observées pour la résistance à la compression. L'examen de la résistance à la flexion a révélé que les valeurs de la combinaison R dépassaient systématiquement celles des autres mélanges, quel que soit l'âge. De plus, alors que la résistance à la flexion à 3 jours était la plus faible dans les séries B10 et B15 des compositions binaires, l'utilisation de 10 % de S et de 5 %, 10 et 15 % de V dans les échantillons B10S10V5, B10S10V10 et B15S10V15 de la composition quaternaire n'a pas modifié ce résultat. De même, l'inclusion de 10 % de S, 5 %, 10 % et 15 % de V dans les échantillons binaires B5, B10 et B15 a entraîné une diminution de leur résistance à la flexion à 28 jours. La résistance à la flexion à 90 jours de tous les SCM binaires est supérieure à celle des SCM quaternaires. Les résistances à la flexion des mélanges binaires V5, B10, V10, V15, B5 et B15 sont respectivement de 9,09, 9,06, 8,28, 7,95, 7,45 et 7,43 MPa. Cette augmentation pourrait être due à la microstructure anguleuse et pointue du V et à la compression entre le liant et le granulat.

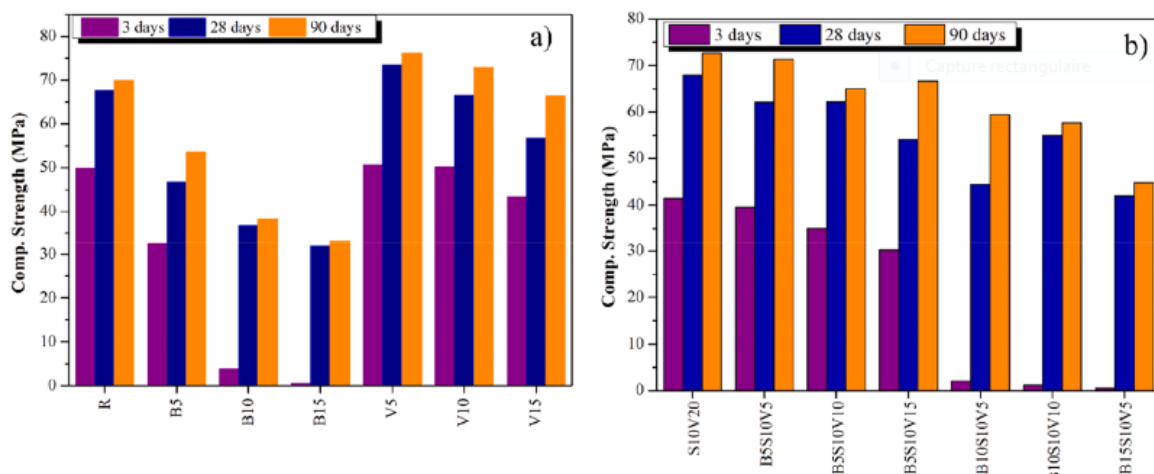


Figure 3.15 Résistance à la compression des SCM binaires et quaternaires incorporant divers matériaux cimentaires supplémentaires. (Source : M. S, ahin Y'on., 2025)

3.6.4 Absorption d'eau des mortiers :

Les valeurs d'absorption d'eau des mortiers varient entre 24,2 % et 40,6 %. Comme le montre la figure 3.15, une augmentation du rapport V/C augmente l'absorption d'eau des mortiers. Cela signifie que la teneur en vermiculite du mélange augmente. Comme on le sait, la vermiculite présente une porosité élevée, ce qui lui confère une grande capacité

d'absorption d'eau. Ce comportement des composites contenant de la vermiculite a été rapporté par d'autres chercheurs.

L'ajout de fumée de silice diminue l'absorption jusqu'à 34,6 % lorsque la fumée de silice est utilisée à un taux de 15 %. Cela peut être attribué à l'effet de remplissage de la fumée de silice sur les micro-vides dans la structure du mortier. La relation entre l'absorption d'eau et la porosité est illustrée à la figure 10. Il existe une forte corrélation avec le coefficient de détermination ($R^2 = 0,9482$) entre l'absorption et la porosité des mortiers avec ajout de vermiculite et de fumée de silice.

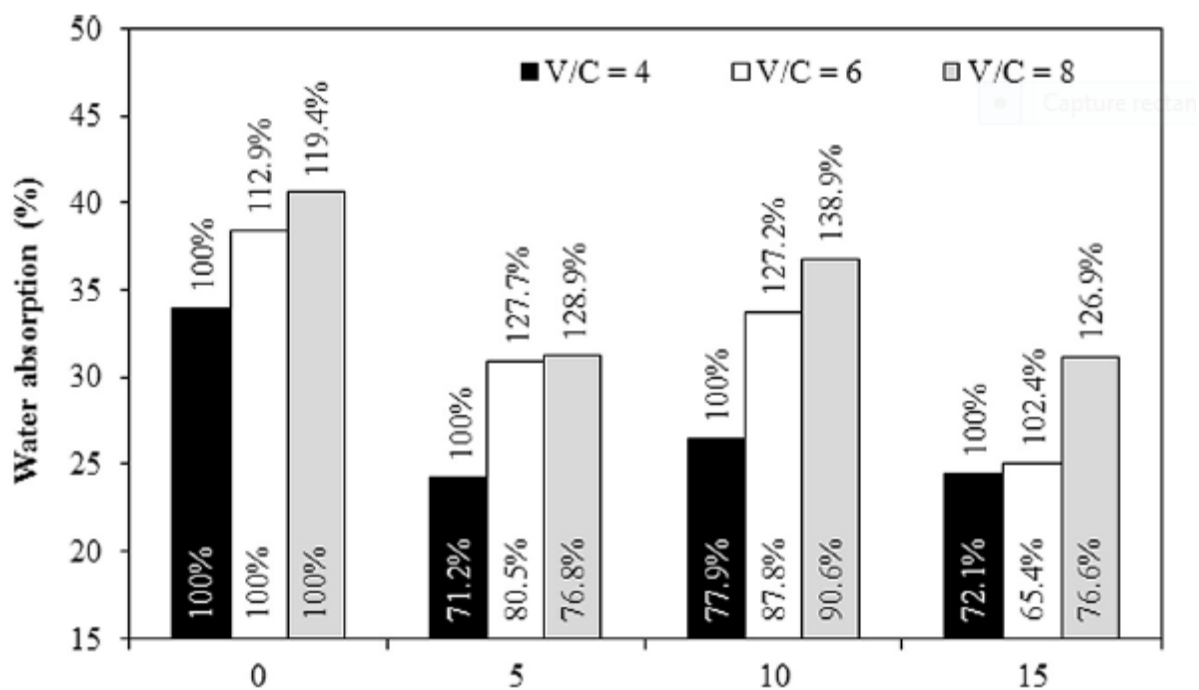


Figure 3.16 Valeurs d'absorption d'eau des mortiers.

. (Source : Fuat Koksall et al., 2015)

3.6.5 Conductivités thermiques des mortiers :

Les valeurs de conductivité thermique des mortiers produits sont présentées à la figure 12. Le coefficient de conductivité thermique des mortiers indique une diminution en fonction du rapport V/C du mortier jusqu'à 0,257 W/m·K, ce qui représente une augmentation de 58,2 % de la performance thermique du mortier.

La conductivité thermique des composites légers dépend fortement du volume de granulats légers [57].

L'ajout de vermiculite améliore le comportement isolant des composites de mortier, car le poids unitaire augmente. La conductivité thermique est fortement liée à la masse volumique du matériau [58–60]. Comme le montre la figure 10, il existe une forte corrélation ($R^2 = 0,9432$) entre la conductivité thermique et le poids unitaire. Le même effet de la vermiculite a été rapporté par d'autres chercheurs [19, 32, 34, 36, 38, 40]. L'effet de la fumée de silice sur la conductivité thermique des mortiers est faible (4,7 %), ce qui est négligeable.

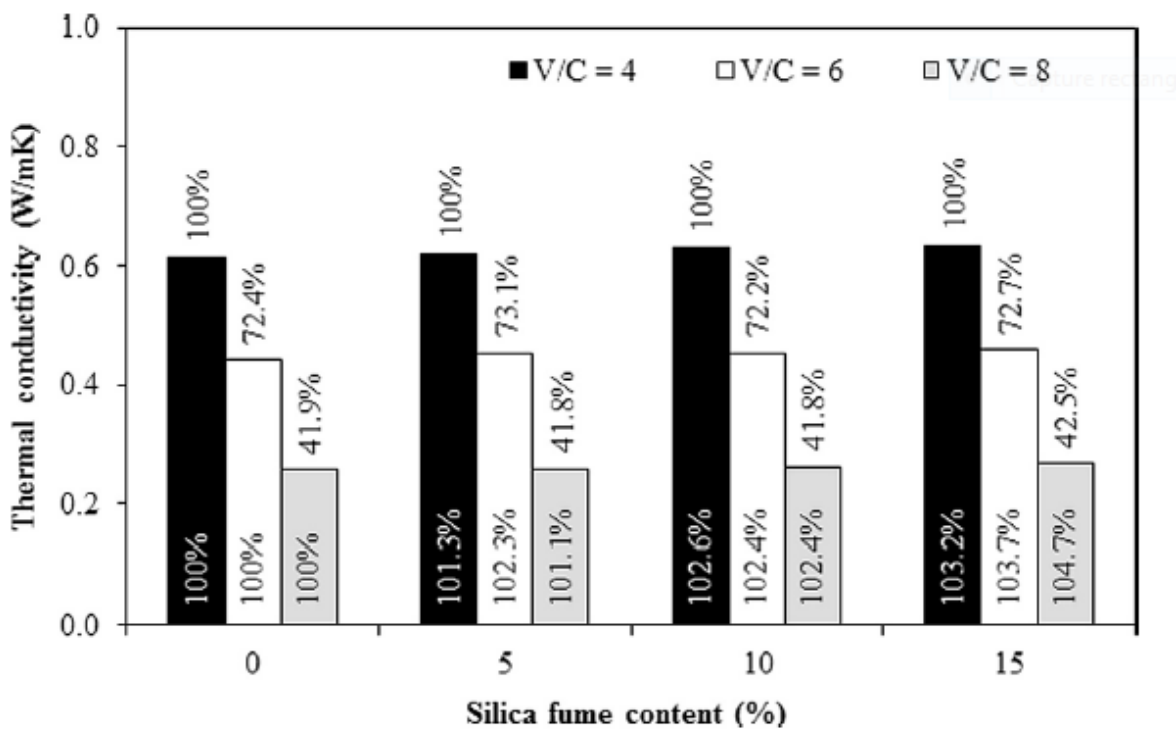


Figure 3.17 Coefficients de conductivité thermique des mortiers.

. (Source : Fuat Koksall et al., 2015)

Chapitre 04:

Identification des matériaux et méthodes expérimentales

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse tout d'abord à la présentation des principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la composition des mortiers à base de sable recyclés. Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de bitume recyclé dans le mortier, la caractérisation et la définition des propriétés du matériau recyclé est nécessaire afin d'obtenir l'information qui permet d'adapter la méthode de préparation du mortier à base de bitume recycle. On présente des formulations de mortier ayant des taux de remplacement du bitume recyclé variables et l'évaluation de leurs impacts. Les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité, le retrait de ces mélanges sont testés

4.2 Matériaux utilisés :

4.2.1 Ciment Portland :

Le ciment utilisé dans le cadre de cette étude est un ciment Portland composé (CEM II/A 42.5) produit de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) dont l'ajout est de 18% de calcaire, sa surface spécifique Blaine est de 3200 cm²/g et sa résistance moyenne à la compression à 28 jours est supérieure à 42,5 MPa. Ces caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau 3

Tableau 4.1 Caractéristiques chimiques et minéralogique du ciment utilisé

Composition chimique (%)							
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
62,17	22,6	4,2	3,55	0,63	2,19	0,42	1,84
Composition minéralogique (%)							
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
41,8		33,3		5,1		10,7	

4.2.2 Eau :

L'eau utilisée est l'eau potable du robinet. Cette eau ne contenant pas d'impuretés nuisibles aux mélanges.

4.2.3 Sable naturel et sable de béton bitumineux recyclé :

Deux types de sable ont été utilisés dans cette étude :

- Un sable naturel 0/4 (SN) provenant de l'oued, sa nature minéralogique est siliceuse notamment dans ses fractions les plus fines.

- Un sable du béton bitumineux recyclé provenant après concasse d'une ancienne chaussée de route en béton bitumineux (Figure 4.2)

L'objectif est de déterminer la variation des propriétés rhéologiques et mécaniques des mélanges du mortier recyclé contenant différents taux de remplacements du sable naturel par le sable de recyclé tels que 0%, 25%, 50%, 75% et 100%.



Figure 4.1 *Sable naturel utilisés.*



Figure4.2 *béton bitumineux recyclé utilisés.*

4.2.4 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme NF EN 933-1, qui permet de déterminer la grosseur et les pourcentages de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension inférieure ou égale à 80 mm, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. La forme des grains pour le gravier des pierres concassées est plus au moins ronde.

Les résultats trouvés de l'analyse granulométrique du sable naturel et du béton bitumineux recyclé sont récapitulés dans les tableaux 4.2 et 4.3, respectivement. Les courbes granulométriques des granulats ordinaires et des granulats recyclés sont représentées sur les figures 4.3

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse granulométrique du sable naturel

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
4	0	0	0	100
3,15	118,05	118,05	5,92	94,08
2	359,12	477,17	23,92	76,08
1,6	202,12	679,29	34,05	65,95
1,25	194,12	873,41	43,78	56,22
1	193,33	1066,74	53,47	46,53
0,8	191,96	1258,7	63,09	36,91
0,63	198,81	1457,51	73,06	26,94
0,5	152,01	1609,52	80,68	19,32
0,315	201,34	1810,86	90,77	9,23
0,25	64,23	1875,09	93,99	6,01
0,16	68,74	1943,83	97,44	2,56
0,125	18,3	1962,13	98,35	1,65
0,08	18,5	1980,63	99,28	0,72
0	14,36	1994,99	100	0

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse granulométrique du béton bitumineux recyclé

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
4	0	0	0	100
3,15	174,32	174,32	8,75	91,25
2	544,48	718,8	36,09	63,91

1,6	247,17	965,97	48,49	51,51
1,25	200,86	1166,83	58,58	41,42
1	167,32	1334,15	66,98	33,02
0,8	142,71	1476,86	74,14	25,86
0,63	123,80	1600,66	80,36	19,64
0,5	89,69	1690,35	84,86	15,14
0,315	136,56	1826,91	91,72	8,28
0,25	48,85	1875,76	94,18	5,82
0,16	59,82	1935,58	97,17	2,83
0,125	20,30	1955,88	98,19	1,81
0,08	20,60	1976,48	99,22	0,78
0	15,44	1991,92	100	0

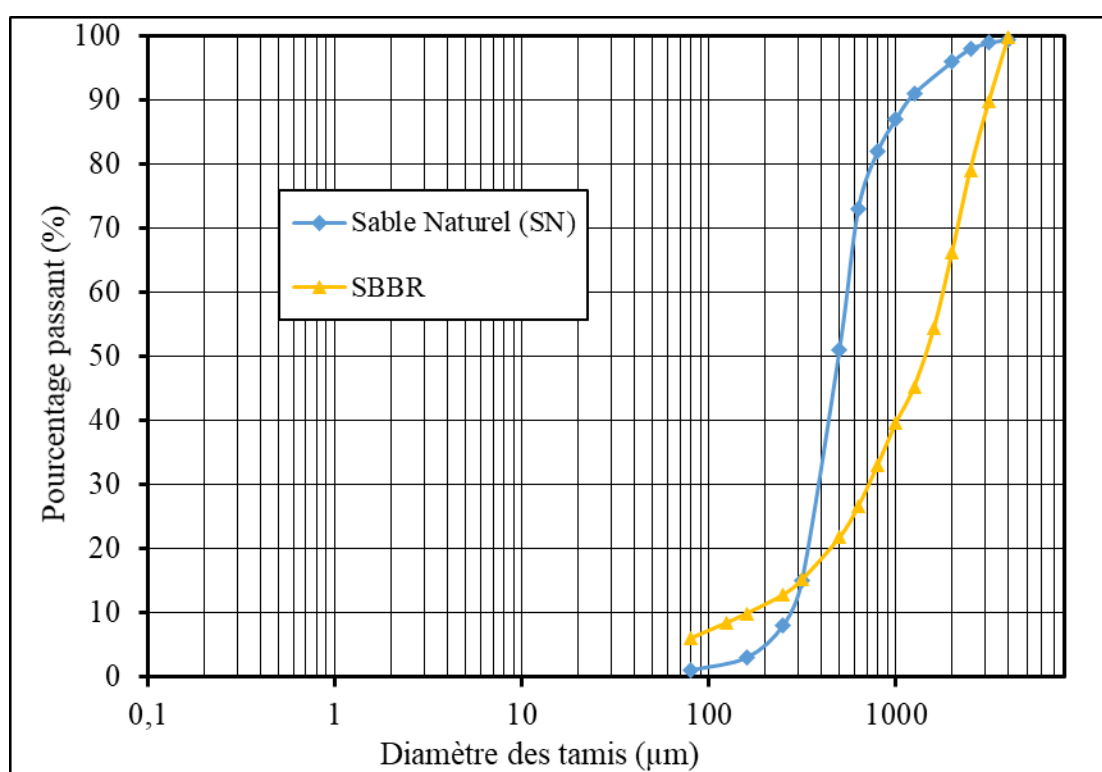


Figure 5.4 Courbe de l'analyse granulométrique du sable naturel et du sable de béton bitumineux recyclé

D'après les résultats de l'analyse granulométrique, on peut conclure le module de finesse Selon la norme Européenne (EN 12620), le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentage sur les tamis de la série suivants :

0,125-0,25-0,50-1-2-4mm

$$FM = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0,125_0,25_0,50_1_2_4\}.$$

Tableau 4.4 Module de finesse des sables utilisés.

	SN	SBBR
Module de finesse (MF)	2.38	3,91

Depuis le tableau 4.4, il est très clair que le sable de béton bitumineux recyclé a une grande finesse que celui du sable naturel.

4.2.5 Masses volumiques des sables utilisés:

- La Masse volumique apparente (Mv_{app}) :

La masse volumique est mesurée d'après la norme NF P 18-555, 1985. L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume (V) du sable naturel sec ou béton bitumineux recyclé sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité (M), pour en déduire la masse volumique selon la formule suivante :

$$Mv_{app} = \frac{m}{V} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

Où:

M en (g) masse sèche du matériau.

V en (l): représente le volume du récipient.

- Masse volumique absolue (Mv_{abs}) :

Elle est déterminée selon la norme NF P 18-555. Il s'agit de mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau donne la masse volumique absolue. La masse volumique est calculée selon la formule suivante:

$$Mv_{abs} = \frac{M1}{M2 - M0 - M1 \rho_{eau}}$$

M0: masse de pycnomètre + eau

M1: masse du sable

M2 : masse du pycnomètre + eau + sable.

Tableau 4.5 Masses volumiques des sables utilisés.

Masse volumique (Kg/m ³)	Sable naturel	béton bitumineux recyclé
Masse volumique apparente	1647	1442
Masse volumique absolue	2680	2450

4.2.6 L'équivalent de sable :

Lorsque l'on frotte des granulats non lavés dans la main (du sable ou des gravillons), on peut constater des traces de poussière sur les doigts. Il s'agit de particules argileuses de petite dimension. Celles-ci sont susceptibles d'être nuisibles à la qualité du mélange ou de la pâte que l'on veut obtenir à partir du granulat, comme du béton ou un mélange bitumineux. D'autres particules peuvent également avoir ce même effet néfaste, comme des scories, du charbon, des particules de bois, des feuilles mortes ou des fragments de racines.

Dans le domaine du béton, ces particules perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte.

Dans les mélanges bitumineux, comme les enrobés bitumineux ou les enduits superficiels, un défaut de propreté peut conduire également à une perte d'adhérence du granulat avec le liant et donc à un désenrobage.

La propreté des sables est évaluée par deux essais complémentaires : l'équivalent de sable (codé SE sur le plan européen) et l'essai dit « au bleu ». Tant que l'essai d'équivalent de sable donne de bons résultats (ES > 60) le sable est propre. Si le résultat est mauvais, cela peut être dû au piégeage accidentel de fines inertes (calcite, quartz) dans le floculant ou à la présence d'un excès d'argile. Pour le savoir on effectue alors, et seulement si le résultat du ES est mauvais, un essai dit au bleu basé sur l'adsorption du bleu de méthylène qui ne se fixe que sur les argiles.

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution floculante dans une éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution floculante afin de faire remonter les particules fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 min, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

L'opérateur dissout le chlorure de calcium cristallin dans les 350 ml d'eau distillée ou déminéralisée. Il laisse refroidir à température ambiante et, si nécessaire, il filtre à l'aide d'un papier à filtrer à grosses ou moyennes mailles. Il ajoute la glycérine et le formaldéhyde en solution et dilue à 1 l de solution avec de l'eau distillée ou déminéralisée, puis il mélange vigoureusement.

Une solution lavante, obtenue en diluant 125 ml de solution concentrée dans 5 l d'eau distillée ou déminéralisée, est également préparée.

Les éléments d'appareillage principaux sont deux éprouvettes gradués, dans lesquels sera répété de manière similaire l'essai, un piston avec un poids bien défini, et un agitateur automatique.

Les éprouvettes sont en verre ou en plastique transparent, de hauteur 40 cm, munies d'un bouchon en caoutchouc et graduées.

Le piston mesureur est composé de :

- une tige de 43 cm de longueur ;
- une embase de 2,5 cm de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige et qui comporte latéralement trois vis de centrage du piston dans le cylindre;
- un manchon, de 1 cm d'épaisseur, qui s'adapte sur le cylindre gradué et permet de guider la tige, en même temps qu'il sert à repérer l'enfoncement du piston d'essai dans le cylindre.
- un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston d'essai, hormis le manchon, une masse totale de 1 kg.
- Un tube laveur est également utilisé. De longueur 50 cm et de diamètre intérieur 4 mm, il permettra de faire circuler la solution lavante dans l'échantillon à tester.

Quelques autres outils peuvent être utilisés comme une spatule, une règle, un tamis, un entonnoir, etc.

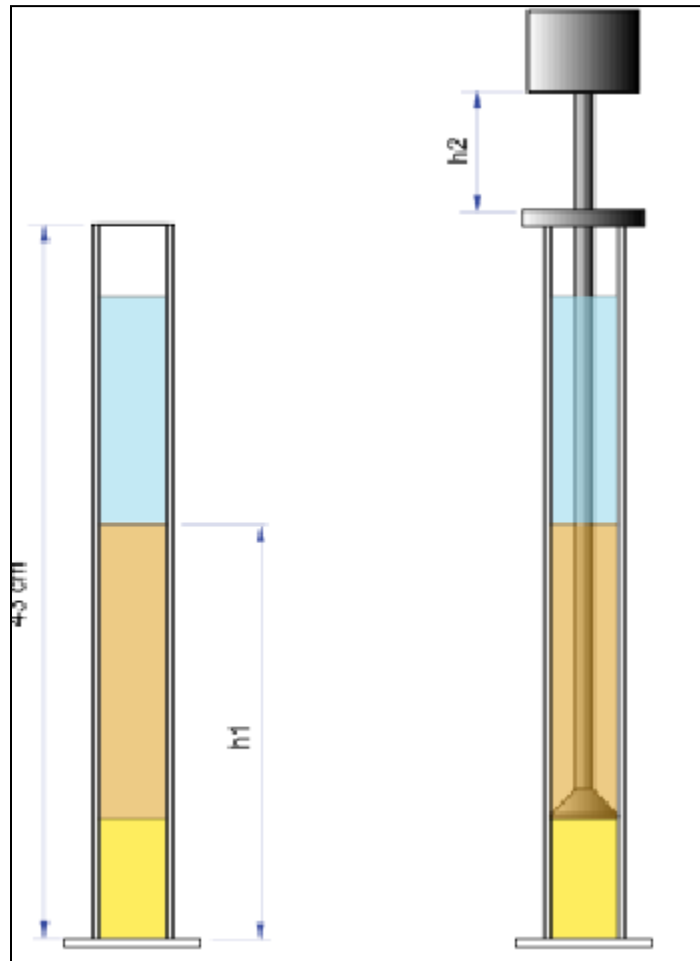


Figure 4.5 Appareillage pour l'essai d'équivalent de sable

L'essai doit être réalisé sur la fraction 0/5 mm à une teneur en humidité inférieure à 2 % et à une température de 23 °C. Étant la teneur en humidité du sable (pourcentage en masse sèche), la masse de chaque éprouvette doit être égale à en (grammes) :

L'opérateur remplit chacun des deux éprouvettes graduées d'une solution lavante, jusqu'au trait repère inférieur figurant sur l'éprouvette. Il verse une éprouvette de matériau dans chaque éprouvette à l'aide d'un entonnoir, puis laisse reposer pendant 10 min pour humidifier l'éprouvette. Après avoir fermé cette dernière, il le dispose ensuite sur une machine d'agitation et procède à l'agitation de chaque éprouvette pendant 30 secondes.

Le tube laveur est ensuite descendu dans l'éprouvette de façon qu'il traverse le sédiment au fond du cylindre. L'éprouvette étant maintenue en position verticale, l'opérateur irrigue le sable avec la solution lavante, ce qui favorise la remontée des fines et des éléments argileux. Tout en faisant subir à l'éprouvette un lent mouvement de rotation, l'opérateur remonte lentement le tube laveur.

Quand le niveau de liquide avoisine le trait repère supérieur gravé sur l'éprouvette, on relève lentement le tube laveur et on régule le flux de façon à maintenir le liquide au niveau du trait repère supérieur jusqu'à ce que le tube soit complètement retiré et le flux interrompu. Chaque éprouvette est laissée ensuite au repos pendant 20 min.

Après repos, la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette graduée est mesurée. Le piston est ensuite abaissé dans l'éprouvette jusqu'à ce que l'embase repose sur le sédiment, ce qui permet de mesurer la hauteur h_2 , distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon.

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$SE = 100 \times \frac{h_2}{h_1}$$

Ce calcul est fait pour chacune des éprouvettes. Si les deux valeurs obtenues diffèrent de plus de 4, le mode opératoire d'essai doit être répété.

L'équivalent de sable (ES) de l'échantillon testé est la moyenne des valeurs obtenues pour chaque éprouvette, arrondie au nombre entier le plus proche. Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons sont les suivantes :

Tableau 4.6 Les valeurs de ES qui désigne la nature et qualité des sables

ES	Nature et qualité du sable
ES < 60	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait
$70 \leq ES < 80$	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convaincant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES > 80	Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

En ce qui concerne le béton routier, qu'il s'agisse d'un béton balayé, strié, imprimé, désactivé ou bouchardé, les préconisations sont les suivantes : ES > 60.

L'essai d'équivalent de sable a pour objet de contrôler la propreté du sable d'éléments fins et de poussières. Il a été effectué conformément à la norme française P18598 .

Le tableau 4.7 suivant indique les résultats des essais. Le sable naturel et le sable de béton bitumineux recyclé sont considérés comme des sables propres.

Tableau 4.7 *Equivalent de sable*

Equivalent de sable	SN (0/4)	SBBR (0/4)
Es _v	89	100
Es _p	81	98,27

4.3 Essai sur les mortiers à l'état frais

4.3.1 Formulation des mortiers :

Le mortier ou béton auto-plaçant requiert à la fois une viscosité élevée et une grande capacité de déformation. Sa formulation repose sur la méthode d'Okamura [20]. Un mortier auto-plaçant de référence, servant de témoin, a été élaboré à partir de granulats fins 100 % naturels. Dans les autres formulations, ces granulats naturels (NS) ont été partiellement ou totalement remplacés par du sable de béton bitumineux recyclé (SBBR) à hauteur de 25 %, 50 %, 75 % et 100 %. De plus, le ciment a été partiellement substitué par de la fumée de silice (FS) à raison de 10 %, 20 % et 30 %. Le rapport eau/ciment (E/C) a été maintenu constant à 0,38. Des essais à l'état frais ont permis d'ajuster le dosage du superplastifiant, en utilisant un cône d'affaissement pour atteindre une élongation de 290 ± 10 mm, ainsi qu'un temps d'écoulement compris entre 8 et 10 secondes dans le cône en V. Les différentes compositions des mortiers auto-plaçants sont détaillées dans le tableau 4.8

Tableau 4.8 *Compositions des mélanges*

Nomination	Ciment	Sable naturel	SBBR	FS	E/C	SP
0R	717,2	1318,8	0	0	0,38	0,7
25R	717,2	989,1	301,40	0	0,38	0,8
50R	717,2	659,4	602,80	0	0,38	0,85
75R	717,2	329,7	904,21	0	0,38	1
100R	717,2	0	1205,61	0	0,38	1,15
0R, 10FS	645,48	1318,8	0	51,82	0,38	0,75
25R, 10FS	645,48	989,1	301,40	51,82	0,38	0,85
50R, 10FS	645,48	659,4	602,80	51,82	0,38	0,95
75R, 10FS	645,48	329,7	904,21	51,82	0,38	1,1

100R, 10FS	645,48	0	1205,61	51,82	0,38	1,3
0R, 20FS	573,76	1318,8	0	103,64	0,38	0,95
25R, 20FS	573,76	989,1	301,40	103,64	0,38	1,1
50R, 20FS	573,76	659,4	602,80	103,64	0,38	1,25
75R, 20FS	573,76	329,7	904,21	103,64	0,38	1,4
100R, 20FS	573,76	0	1205,61	103,64	0,38	1,6
0R, 30FS	502,04	1318,8	0	155,47	0,38	1,3
25R, 30FS	502,04	989,1	301,40	155,47	0,38	1,5
50R, 30FS	502,04	659,4	602,80	155,47	0,38	1,75
75R, 30FS	502,04	329,7	904,21	155,47	0,38	1,95
100R, 30FS	502,04	0	1205,61	155,47	0,38	2,15

4.3.2 Matériel utilisé :

- a) Un malaxeur à deux vitesses : lente et rapide,
- b) une balance précise au gramme, de portée 10 kg,
- c) Moules 4x4x16cm,
- d) V-funnel.
- d) Le cône.
- e) Table en acier horizontal.

4.3.3 Protocole de Malaxage :

Les mortiers auto plaçants à base des différents pourcentages de sable sont fabriqués avec de ciment, fumée de silice et du sable naturel ou du béton bitumineux recyclé à tester dans les proportions suivantes :

Après les pesés des masses des différents constituants à l'aide d'une balance de précision 0.05 g, le malaxage se fait dans un malaxeur de 5 litres (figure 4.6), Pour homogénéiser le mélange, il est nécessaire de commencer par introduire les éléments grossiers comme le sable, le FRAP, puis le ciment avec fumée de silice, de la manière suivante :

- 1- Introduire dans le malaxeur le sable, FRAP, le ciment et la fumée de silice puis mettre immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse pendant 60 s,
- 2- Introduire dans le malaxeur 2/3 de l'eau en gardant le malaxeur en marche à petite vitesse pendant 60 s,

- 3- Introduire dans le malaxeur 1/3 de l'eau + SP en gardant le malaxeur en marche à petite vitesse pendant 60 s,
- 4- Faites fonctionner le mixeur à grande vitesse pendant une 60 s.



Figure 4.6 Appareillage pour l'essai d'équivalent de sable

4.3.4 Essai d'étalement au mini cône et V-funnel :

Après le malaxage des différents mortiers, on a tout d'abord contrôlé la fluidité du mortier auto-plaçant à l'état frais. Il s'effectue à l'aide d'un cône tronqué (mini cône d'Abrams), placé sur une surface plane et non absorbante. Le mortier est introduit dans le cône sans vibration, puis le cône est retiré verticalement, permettant au mortier de s'étaler librement sous l'effet de son propre poids.

Le diamètre moyen de l'étalement est mesuré dans deux directions perpendiculaires, et la valeur cible pour un bon comportement auto-plaçant se situe généralement autour de 290 ± 10 mm. Ce test permet également de vérifier l'absence de ségrégation et d'assurer une bonne cohésion du mélange comme illustrée dans la figure 4.7.



Figure 4.7 Essai d'étalement cône

Le deuxième essai c'est L'essai V-funnel permet de mesurer la viscosité et la capacité d'écoulement du mortier auto-plaçant à l'état frais. Il consiste à remplir un entonnoir en forme de « V » avec le mortier, puis à ouvrir brusquement la trappe inférieure pour laisser s'écouler le mélange sous l'effet de la gravité.

Le temps d'écoulement (en secondes) est enregistré depuis l'ouverture de la trappe jusqu'à ce que le flux de mortier cesse. Un temps compris entre 8 et 10 secondes indique généralement une bonne aptitude à l'écoulement sans blocage ni ségrégation, conforme aux exigences des mortiers auto-plaçant voir la figure 4.8.



Figure 4.7 Essai V-funnel

4.3.5 Remplissage des moules :

Le remplissage des moules s'effectue sans vibration, conformément aux caractéristiques du mortier auto-plaçant. Après la préparation du mélange, le mortier est directement coulé dans des moules prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, préalablement nettoyés et légèrement huilés pour faciliter le démoulage.

Le coulage se fait en une seule étape, en veillant à ce que le mortier s'écoule uniformément et remplisse entièrement le moule sans formation de bulles d'air ni ségrégation. Aucun compactage mécanique n'est nécessaire. Une fois les moules remplis, la surface est nivelée à l'aide d'une spatule ou d'une truelle. (Figure 4.9).



Figure 4.8 Remplissage des moules.

4.3.6 Condition de conservation des éprouvettes :

Juste après le remplissage, les moules ont été couverts par une feuille plastique et conservés dans l'ambiance du laboratoire. Après 24 heures, ils sont démoulés et conservés sous les conditions relatives à chaque essai.

- Les échantillons destinés à l'essai de retrait sont conservés dans trois étuves sous des températures de 20, 35 et 50 °C. - Les échantillons destinés aux essais mécaniques sont conservés dans l'eau dans l'ambiance de laboratoire jusqu'au jour de l'essai (figure 4.10).

- Les échantillons destinés au essai de durabilité sont conservés dans l'eau dans l'ambiance de laboratoire jusqu'à 28 jours.



Figure 4.9 Bac d'eau pour la conservation des éprouvettes.

4.4 Essais effectués à l'état durci

4.4.1 Résistances mécaniques :

Les résistances mécaniques ont été mesurées sur une série de 3 éprouvettes 4cmx4cmx16cm à 2, 7 et 28 jours. Les éprouvettes sont démoulées après 24h et conservées sous eau jusqu'à échéance des essais mécaniques.

4.4.1.1 Résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction par flexion 3 points a été effectuée sur les éprouvettes prismatiques de mortier 4x4x16cm conformément à la norme NF P15-451 (Figure 4.11).

La formule de la RDM est appliquée pour le calcul de la contrainte de flexion selon la formule suivante :

$$R_t = \frac{3F}{2a^2}$$

R_t: Résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : Force de rupture exprimée en Newton.

a : dimension de la section (a = 40 mm).



Figure 4.10 Essai et dispositif de flexion par trois points

4.4.1.2 Résistance à la compression :

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les six demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion (Figure 4. 12). Ces essais ont été effectués selon la norme NF EN 196-1. La contrainte de compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ (MPa)}$$

F_c : Charge maximale de rupture (N).

A : l'aire de la section d'application de la force de compression (1600 mm²).

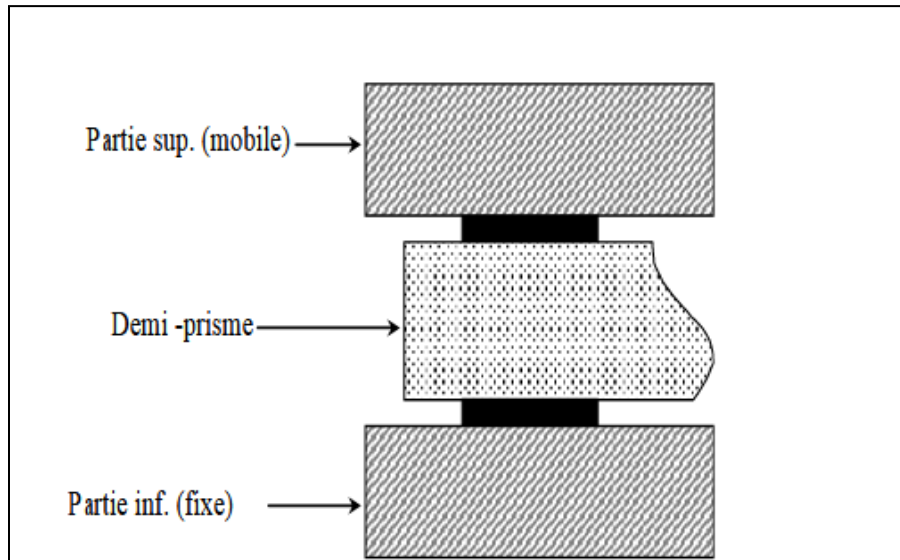


Figure 4.11 Essai du dispositif de compression simple

4.4.2 Essai de Sorptivité :

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de caractériser la capacité de transfert d'eau d'un mortier à absorber et transmettre l'eau par capillarité. Dans cette étude,

l'essai est effectué sur des échantillons prismatiques de 40 x 40 x 160 mm³ selon la norme EN 1015-18, 2002, préalablement séchés dans le four à environ 80°C jusqu'à poids constant.

Ils sont ensuite placés dans un bac de sorte que leur surface inférieure jusqu'à 5 mm est en contact avec l'eau.

L'étanchéité latérale est assurée au moyen d'un ruban adhésif pour obtenir un écoulement unidirectionnel (Figure 4.13). Le poids des échantillons est mesuré à différents moments: 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 6h, 8h et 24h. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un papier absorbant. Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire (T= 20 ± 2°C et HR= 45 ± 10 %). L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué après 28 jours de durcissement. Les six premières heures d'absorption d'eau ont été enregistrées pour déterminer l'absorption initiale connue sous le nom de «sorptivité» du béton BS EN 1015-18, 2002. La masse cumulée d'eau absorbée par unité de surface d'entrée (section transversale) à chaque intervalle de temps a été évaluée et la sorptivité C_c déterminée à partir de la pente de la fonction de l'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps par l'équation suivante :

$$C_c = \frac{M}{S\sqrt{t}}$$

M : la quantité d'eau absorbée en (g)

S : la surface d'éprouvette en contact avec l'eau en (cm²)

t : temps d'absorption en (min)

C_c : le coefficient de capillarité en (g.cm⁻².min^{-1/2})

- L'essai est pris à un âge de durcissement de 28jours.

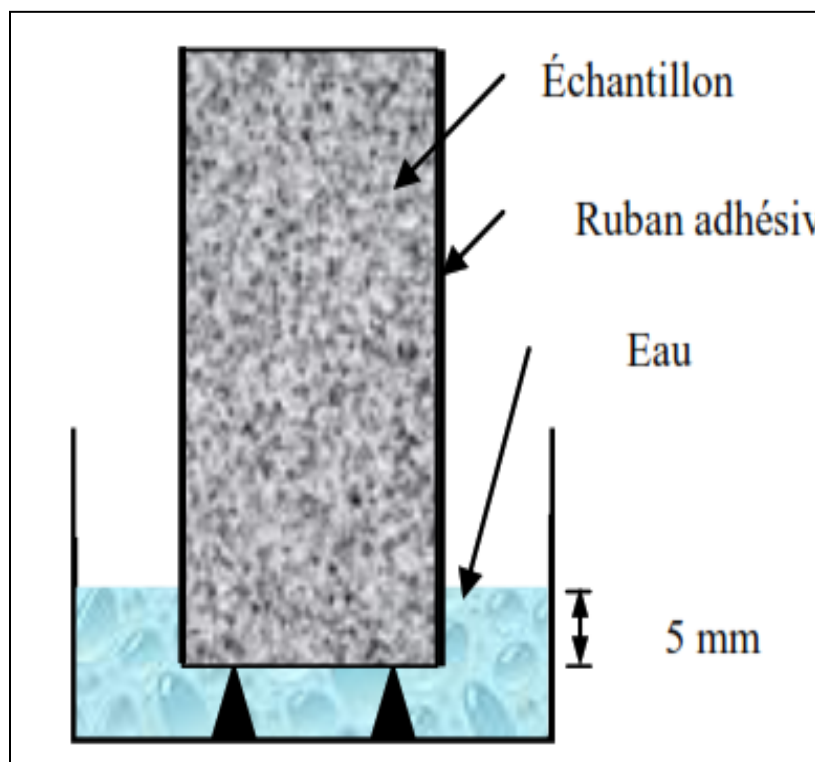


Figure 4.13 Essai d'absorption d'eau par capillarité.

Chapitre 05 :

Analyse et discussions des

résultats

5.1 Introduction :

Cette phase consiste une étude paramétrique sur le mortier autoplaçant. Dans le cadre de cette phase, des mélanges de mortier ont été confectionnés dans le but d'évaluer l'impact des granulats de béton bitumineux recyclé et de la fumée de silice sur plusieurs propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques et la durabilité du mortier. Les essais effectués lors de cette phase sont les essais sur mortier frais (étalement), les essais visant à évaluer les propriétés mécaniques du mortier durci (résistance à la compression, résistance à la traction) en plus des essais visant à mesurer la durabilité du mortier à l'état durci (perte en poids et la sorptivité).

5.2 Influence des SBBR sur les mortier autoplaçant étudié :

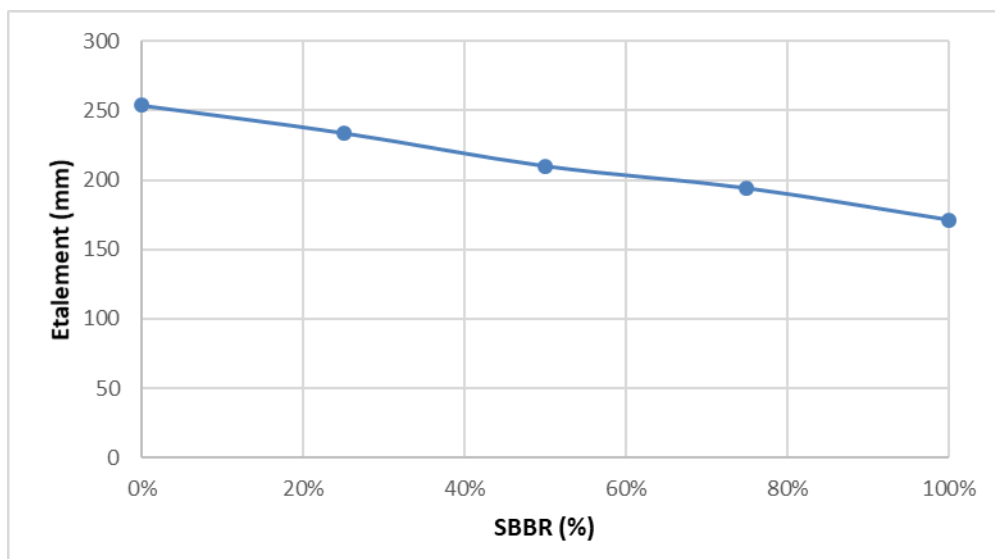
5.2.1 Effet des SBBR sur l'étalement du mortier auto plaçant non adjuvanté

Les SBBR (Sables de Béton Bitumineux Recyclés) se distinguent par leur grande capacité d'absorption, une propriété qui persiste indépendamment de l'origine du béton bitumineux initial, comme le confirment diverses études. L'utilisation de SBBR dans les mortiers auto plaçants entraîne une réduction significative de l'étalement, comme en témoignent les données présentées dans la figure 5.1 et le tableau 5.1. Ces résultats concernent des mortiers sans superplastifiant, avec différents taux de substitution par des SBBR. Lorsque les SBBR sont préalablement séchés avant mélange, l'étalement diminue progressivement à mesure que le taux de substitution augmente.

Plus la proportion de SBBR est élevée dans le mortier, plus l'étalement se réduit, passant d'un mortier conventionnel à un mortier intégralement composé de SBBR. Cette tendance s'explique notamment par la texture rugueuse des SBBR, leur forme angulaire et leur absorption d'eau plus importante, selon les observations d'Abraham et Ransinchung (2018), qui attribuent ces variations d'étalement principalement à l'absorption d'eau des granulats recyclés.

Tableau 5.1 Les résultats de l'étalement des mélanges des mortiers autoplaçant.

SBBR (%)	Etalement (mm)
0%	254
25%	234
50%	210
75%	194
100%	171

**Figure 5.1** Variation de l'étalement des mélanges des mortiers autoplaçant.

5.2.2 Effet des SBBR sur l'étalement du mortier auto plaçant adjuvanté

Une seconde méthodologie expérimentale a été mise en œuvre, consistant à maintenir une valeur d'étalement constante (290 ± 10 mm, mesurée au cône standard) tout en augmentant progressivement le taux de substitution du sable naturel par des SBBR. Pour compenser les effets de cette substitution, des ajustements précis en superplastifiant à base de polycarboxylate ont été appliqués à chaque formulation. La figure 5.2 montre le besoin en

superplastifiant nécessaire pour chaque mortier pour atteindre l'étalement désirée. Le dosage en superplastifiant augmente avec la diminution du rapport E/C et le taux de remplacement du sable naturel par le SBBR dans le mortier (tableau 5.2). Cette augmentation est plus importante lorsque le taux de substitution est supérieur à 50%.

Par ailleurs l'introduction des SBBR augmente la surface spécifique des granulats dans le mélange et favorise l'absorption d'eau par l'ancien bitume attaché à la surface des granulats. Cela rend la quantité d'eau de gâchage insuffisante pour lubrifier tous les grains et provoque une diminution dans l'étalement. L'addition de super plastifiant déflocule les grains de ciment et libère l'eau piégée dans les interstices ce qui rend l'eau plus abondante. En plus, l'effet stérique et électrostatique du superplastifiant pousse les particules de ciment dans la pâte et rend le mélange plus fluide. Le dosage en superplastifiant augmente avec l'augmentation de la quantité des SBBR, cela est dû à la grande capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés conduisant à une faible quantité d'eau libre dans le mélange ce qui nécessite un dosage en superplastifiant plus élevé. Pour un mortier autoplaçant contenant 50% de SBBR, il faut ajouter 0,15% de superplastifiant pour avoir le même étalement.

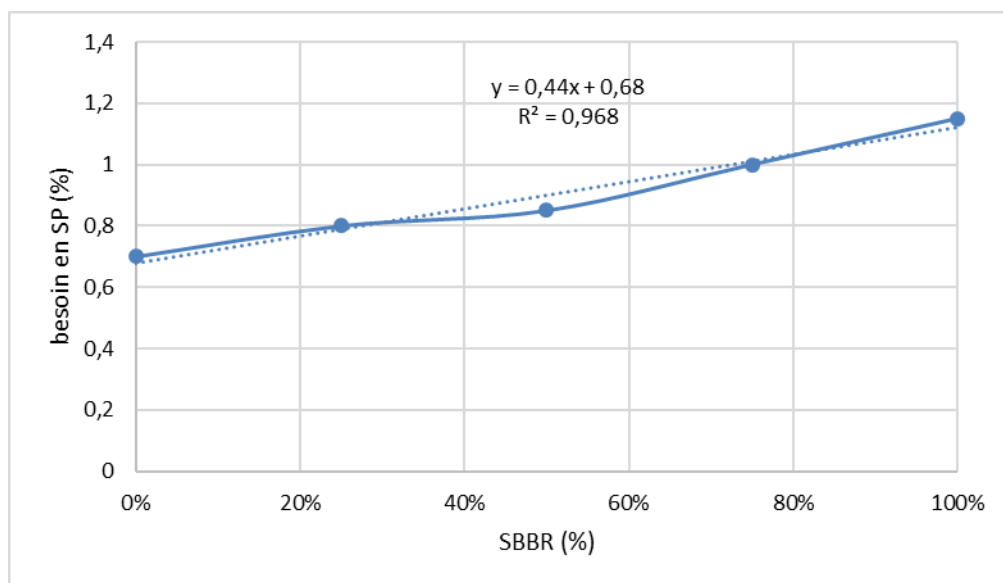


Figure 5.2 Besoin en superplastifiant pour les mortiers autoplaçant utilisés en fonction de la substitution des SN par les SBBR.

5.2.3 Effet des SBBR sur la résistance à la compression

Les résultats de résistance à la compression présentés correspondent à la moyenne de trois essais pour chaque formulation.

L'évolution de la résistance dans le mortier contenant du sable de béton bitumineux recyclé (SBBR) suit une tendance similaire à celle du mortier témoin, comme le montrent les courbes de la Figure 5.3. Cependant, les données révèlent un impact négatif du SBBR sur les performances mécaniques. Malgré l'ajout de superplastifiant pour maintenir un affaissement constant à rapport E/C égal, l'incorporation de SBBR réduit significativement la résistance à la compression des mortiers auto plaçants, même lorsque leur ouvrabilité est préservée.

Le remplacement du SN par le SBBR provoque un changement de la résistance mécanique. Pour un âge de durcissement de 28 jours pour un taux de substitution de 100% des SN par les SBBR, la résistance à la compression diminue d'environ 11.4 MPa, comme le montre la figure 5.4. Par contre, on peut en conclure que l'utilisation des SBBR exige un dosage adéquat de superplastifiant en conformité avec une gamme adéquate de rapport E/C.

La plupart des chercheurs ont rapporté une perte en valeur de résistance à la compression lorsqu'ils utilisent les SBBR (Chaidachatorn et al., 2019). Il est intéressant de noter que le SBBR a une absorption d'eau plus élevée et un taux plus lent d'absorption d'eau lorsqu'il est comparé au sable naturel (ordinaire). L'absorption d'eau et le degré de saturation du SBBR dans les 12 h sont plus élevés et inférieurs à ceux du sable naturel. Après 12 h, le SBBR a une absorption d'eau plus élevée que le sable naturel, mais le degré de saturation des deux matériaux est plus ou moins le même de > 90%, le degré de saturation du sable est de 82% tandis que le degré de saturation du rap n'est que de 52%. Cependant, l'étude d'Abraham et Ransinchung, 2018 montre une tendance à la baisse à mesure que le pourcentage de remplacement diminue. Où cette diminution maximale est de l'ordre de 41,7% de la résistance à la compression pour les mélanges avec la teneur en RAP par rapport au mélange témoin. Il ouvre également la portée des adjuvants minéraux incorporés dans les mélanges de mortier pour améliorer la résistance du même mortier avec un pourcentage plus élevé de contenu SBBR.

La présence des SBBR diminue l'adhérence entre la pâte de ciment et de la surface des agrégats qui conduit à une résistance à la compression plus faible par rapport à celles du mortier ordinaire.

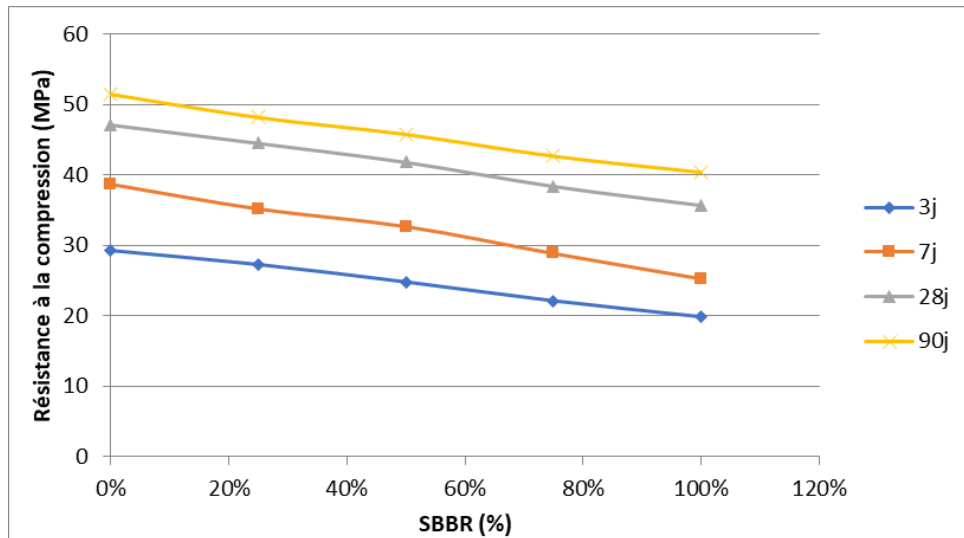


Figure 5.3 Variation de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des SBBR

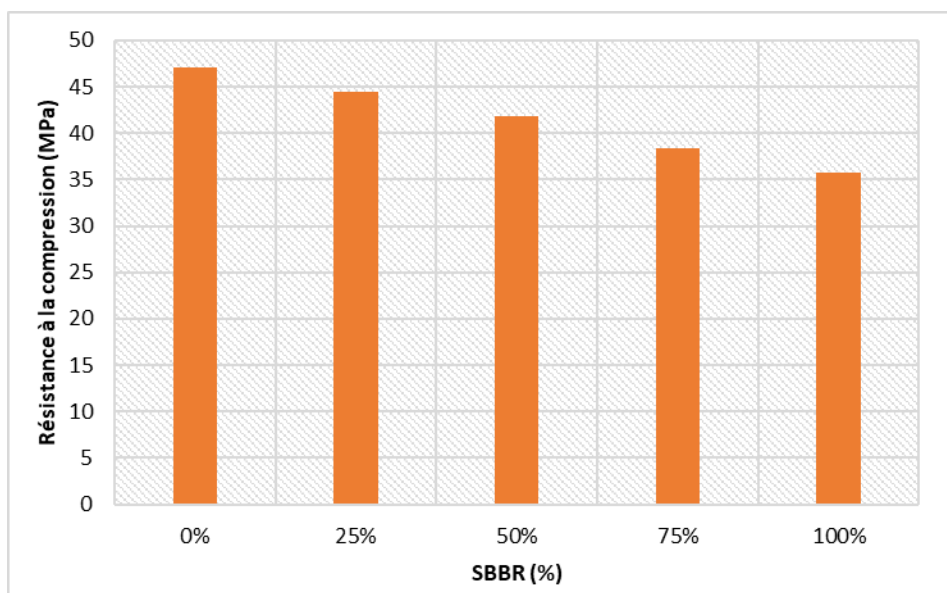


Figure 5.4 L'effet des SBBR sur de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution des SBBR (Age : 28 jours).

5.2.4. Effet des SBBR sur la résistance à la traction

Les résistances à la traction par flexion de trois points obtenues confirment celles de la compression et témoignent d'un effet négatif des sables de béton bitumineux recyclés. Dans la plupart des cas, une corrélation peut être observée entre la résistance à la flexion du mortier et sa résistance à la compression. De ce fait, on peut en déduire que la résistance à la flexion se

diminue également à mesure que la résistance à la compression diminue. La figure 5.5 montre l'effet des SBBR sur la résistance à la traction par flexion à plusieurs âges de durcissement jours des mortiers autoplaçant (3, 7, 28 et 90 jours), respectivement. La résistance à la traction par flexion suit une tendance similaire à la résistance à la compression des mortiers. Nous pouvons voir à partir des données collectées, comme le montre les figures 5.6, que la diminution de la résistance à la traction par flexion est beaucoup plus significative, avec une diminution de la résistance à traction atteignant plus de 25 % au niveau de remplacement de 100 %. Cependant, dans le cas des données recueillies concernant les mortiers, cette diminution de résistance est comparable à celle rapportée précédemment pour leur résistance à la compression.

L'effet néfaste de la porosité du SBBR est donc plus significatif. Des approches variables pour compenser l'eau de gâchage peuvent être trouvées dans la littérature, différant dans une certaine mesure des résultats présentés. De tels effets ne doivent pas être liés à un affaiblissement dû à une augmentation de la porosité du mortier à base de SBBR à l'état durci, mais à une incidence sur le rapport eau/ciment effectif. Comme solution intermédiaire, le SBBR sec peut être utilisé avec une augmentation limitée de la quantité d'eau de gâchage par rapport au mortier témoin, mais une telle augmentation ne doit pas correspondre à la pleine capacité d'absorption d'eau du SBBR.

L'utilisation des super plastifiants est un moyen efficace pour compenser la perte d'ouvrabilité des SBBR avec l'augmentation des taux de substitution.

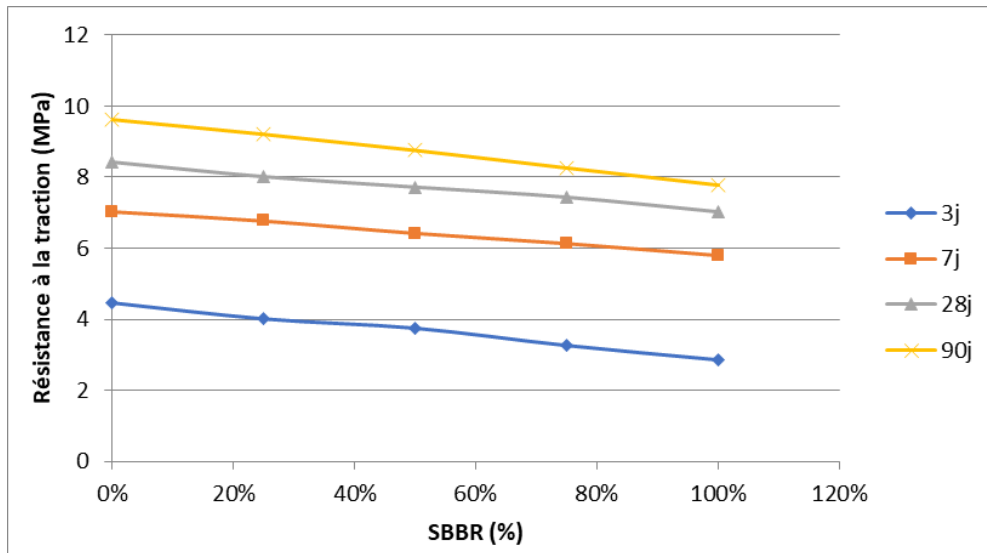


Figure 5.5 Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des SBBR.

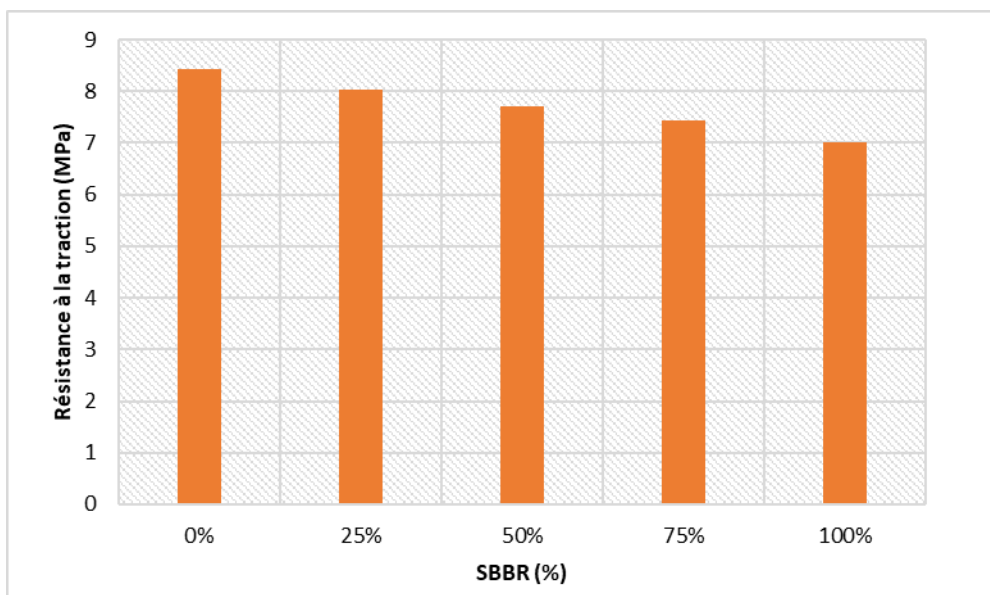


Figure 5.6 L'effet des SBBR sur de la résistance à la traction en fonction du taux de substitution des SBBR (Age : 28 jours).

5.2.5 Effet des SBBR sur la perte en poids

Sur des éprouvettes à base de granulats recyclés, on a relevé la variation de leurs poids durant 90 jours au cours du séchage. Les résultats présentés sur la figure 5.7 montrent un effet accélérant de la présence de ces granulats sur la perte en poids. Le granulat recyclé caractérisé

par sa grande porosité crée un lieu de caverne qui favorise la migration de l'eau de la pâte de ciment vers ces refuges. Ces résultats confirment ceux trouvés par Chakradhara Rao et al. 2011, où ils ont constaté que le volume de pore augmente en fonction du taux de substitution des granulats recyclés.

Cette grande perte en poids des mortiers à base de granulats recyclés est aussi due à la faible densité des SBBR. Chakradhara Rao et al. 2011 ont trouvé que la densité du béton diminue en fonction du taux de remplacement des granulats de béton recyclés, cette baisse de densité est due en grande partie à la densité plus faible et à la plus grande porosité des granulats recyclés. Selon Fathifazl et al., 2009, cette baisse de masse volumique serait due à la plus grande teneur en mortier total (mortier résiduel + nouveau mortier) dans le béton avec des granulats recyclés que dans le béton avec des granulats ordinaires.

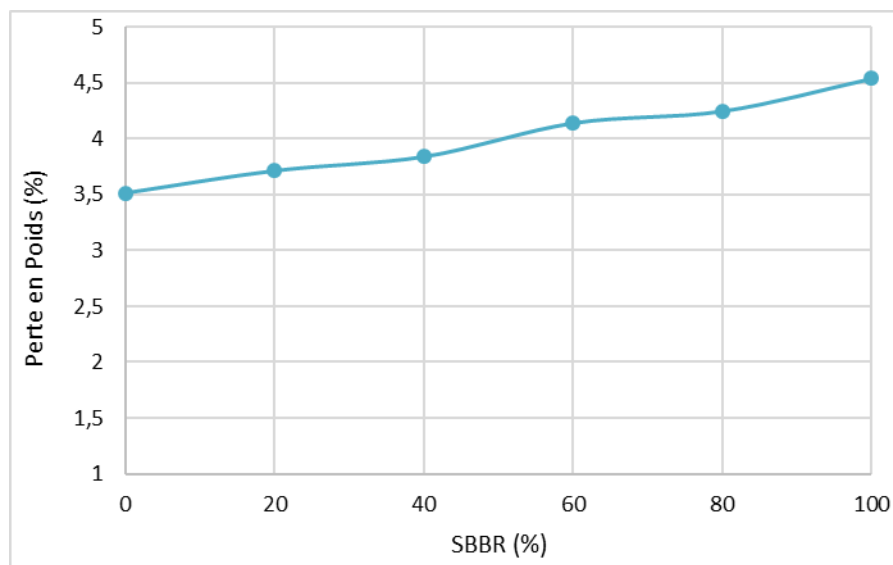


Figure 5.7 Pertes en poids des éprouvettes en fonction de la teneur en granulats recyclés (t=90 jours).

5.2.6. Effet des SBBR sur la Sorptivité :

Les résultats de l'absorption capillaire (Sorptivité) sont présentés sur la figure 5.8 pour les différents mélanges de mortiers auto-plaçants, pour un âge de durcissement de 28 jours. Différentes tendances ont été identifiées. Tous les mélanges contenant des granulats recyclés présentaient des valeurs d'absorptions inférieures par rapport au mélange de référence (mortier témoin). À un remplacement de 100 % et à un temps de mesure de 24h les valeurs d'absorption marquent des valeurs de sorptivité (absorption capillaire) plus petit de 41% par rapport au mortier témoin,

Il semble que plusieurs paramètres influencent le processus d'absorption capillaire, notamment la composition et la teneur en fines des granulats du béton bitumineux recyclé recyclés et les différences entre la structure poreuse de la pâte de ciment neuve et celle des granulats recyclés, probablement affectée par la présence d'anciennes pâtes (d'Abraham et Ransinchung, 2018). D'après les résultats de la sorptivité trouvé par l'étude d'Abraham et Ransinchung, 2018, cela était dû à la fonte de la couche d'asphalte entourant les fins agrégats de SBBR lors du séchage et du suintement dans les pores capillaires et à la surface de l'échantillon de mortier, et donc le taux d'absorption et le coefficient ont donc tendance à diminuer. La fusion du bitume à température élevée sur la surface d'échantillons de béton ou de mortier a également été observée pour des échantillons de sorptivité de béton contenant des granulats grossiers de SBBR (Singh, 2017).

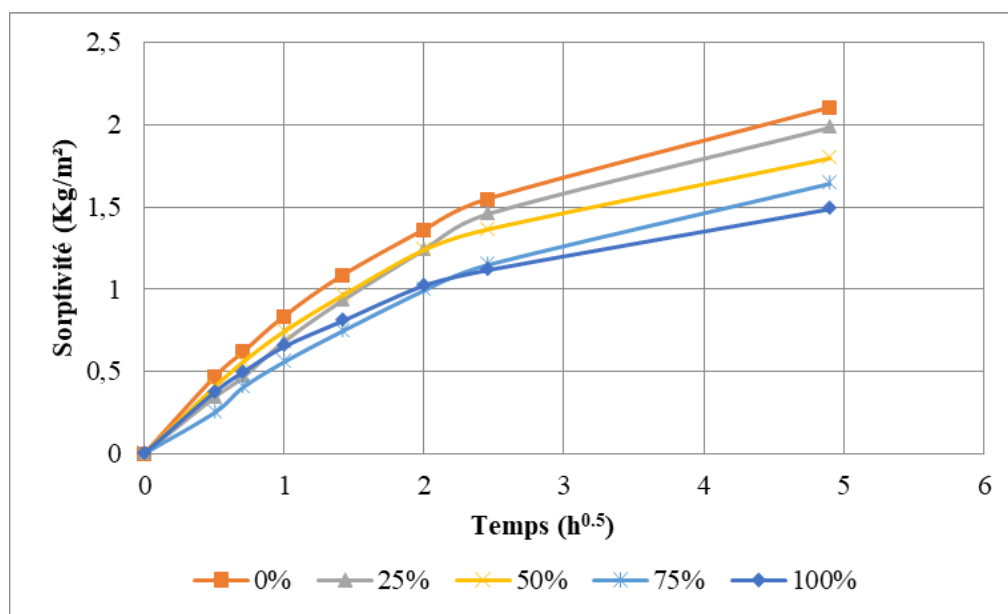


Figure 5.8 La Sorptivité des différents mélange de mortier autoplaçant.

5.3 Influence de la combinaison SBBR et FS sur les mortier autoplaçant étudié :

5.3.1 Besoin en superplastifiant

Afin de garder une même ouvrabilité pour tous les mélanges des mortiers auto plaçants étudié, une quantité de superplastifiant a été ajouter au mélange, cette quantité varie selon le pourcentage de substitution des SBBR et la quantité de remplacement du ciment par la fumée de silice. La figure 5.9 représente le besoin en SP des différents mélanges étudiés, où il est clairement remarqué que l'incorporation des SBBR dans les mélanges de mortier provoque

une augmentation dans la demande en SP, cette augmentation dans la demande en SP est aussi liée à l'augmentation de la quantité de la fumée de silice dans les mélanges surtout dans le taux de remplacement de 30%.

Dans le cas de la fumée de silice la surface spécifique est très grande par rapport au ciment qui conduit par la grande finesse de ce produit, qui s'intercale entre les grains de ciment et libère plus d'eau pour la mixture. Il est évident que ces additions très fines sont absorbantes et ayant des surfaces très actives, rendant ainsi la mixture plus visqueuse. Alors qu'un remplacement de 10% de fumée de silice n'a pas d'effet sur la demande en superplastifiant.

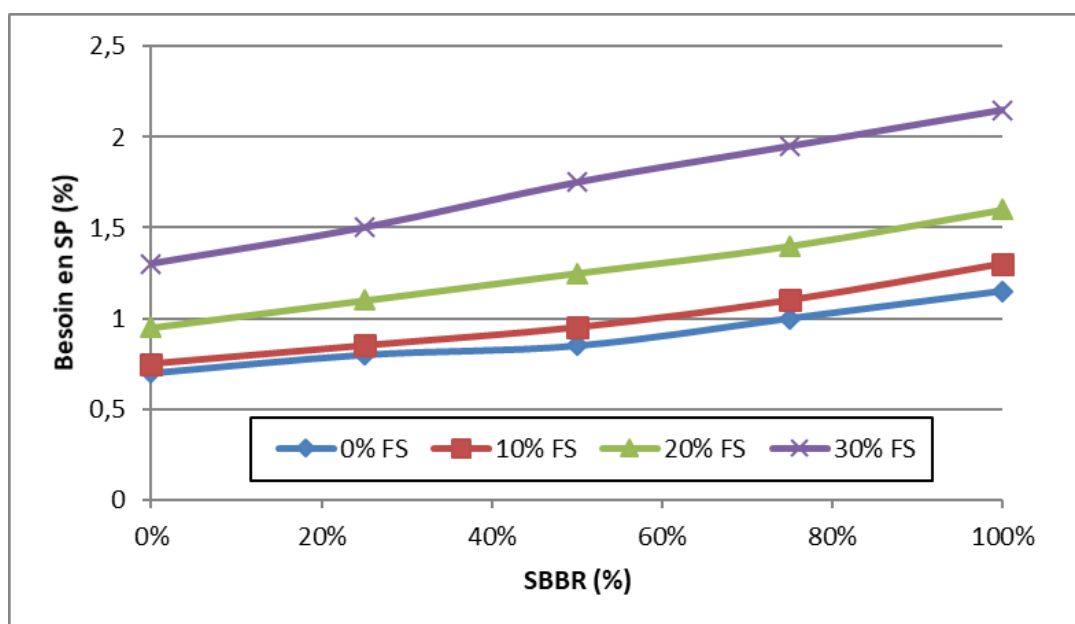


Figure 5.9 Besoin en SP des différents mélange des mortiers auto plaçants

5.3.2 Résistance à la compression

La résistance du mortier incorporant du sable de béton bitumineux recyclé (SBBR) évolue de manière comparable à celle du mortier témoin, comme en témoignent les courbes de la Figure 5.3. Toutefois, les résultats indiquent une diminution des propriétés mécaniques due à la présence du SBBR. Bien que l'utilisation d'un superplastifiant permette de conserver un affaissement constant à rapport E/C identique, l'introduction du SBBR entraîne une baisse notable de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants, et ce, malgré le maintien de leur ouvrabilité.

L'incorporation de la fumée de silice dans les mélanges des mortiers autoplaçants a un effet positif sur les résistances à la compression comme le montre la figure 5.10, où en augmentant pour le pourcentage de substitution de la fumée de silice dans les mélanges des mortiers autoplaçant, une nette augmentation dans la résistance à la compression est observé, cette augmentation est plus significative à des faibles taux de substitution du sable naturel par le sable de béton bitumineux recyclé. Pour un pourcentage de substitution de la fumée de silice de 30% une augmentation dans la résistance de 27.68 % pour le mélange de mortier autoplaçant avec seulement du sable naturel, alors que cette augmentation était seulement de 15.87 % pour le mélange qui contient 100% de SBBR. Cela explique l'effet négatif de l'utilisation des SBBR dans les mortiers autoplaçant malgré l'effet positif de la fumée de silice

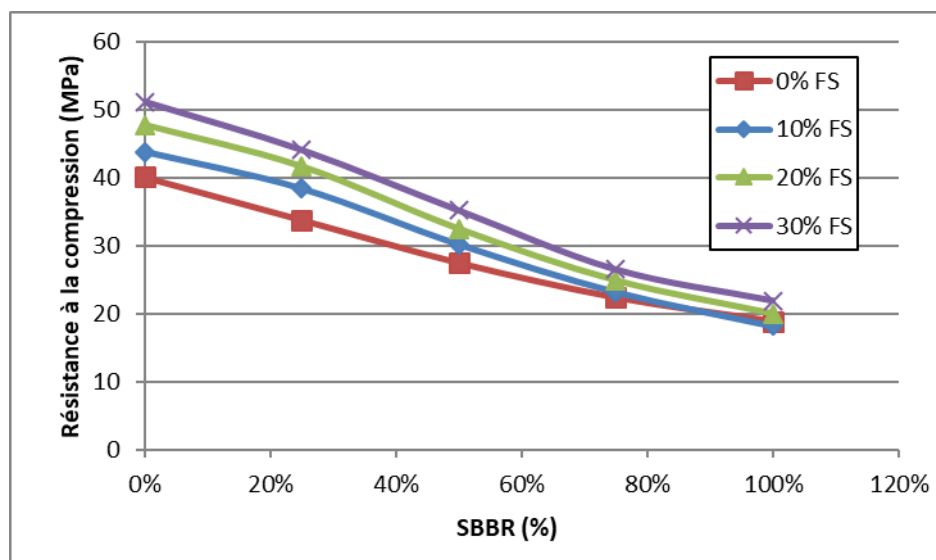


Figure 5.10 Variation de la résistance à la compression des différents mélanges. (28 jours).

5.3.2 Résistance à la traction

La figure 5.11 montre l'évolution de la résistance à la traction des différents mélanges de mortier autoplaçants à 28 jours avec l'incorporation de la fumée de silice et le SBBR comme substitution. Les résultats de la résistance à la traction confirment celles de la résistance à la compression. L'augmentation du taux de substitution de la fumée de silice dans les mortiers autoplaçants entraîne une nette amélioration de leur résistance à la compression. Cet effet est toutefois plus marqué lorsque le taux de remplacement du sable naturel par du sable de béton bitumineux recyclé (SBBR) est faible. Par exemple, avec un taux de fumée de silice de 30 %, la résistance augmente de 8.31 % pour un mortier contenant uniquement du

sable naturel, contre seulement 2.67 % pour un mortier intégralement composé de SBBR. Ces résultats confirment l'impact négatif du SBBR sur les performances mécaniques des mortiers autoplaçants, malgré l'effet bénéfique de la fumée de silice.

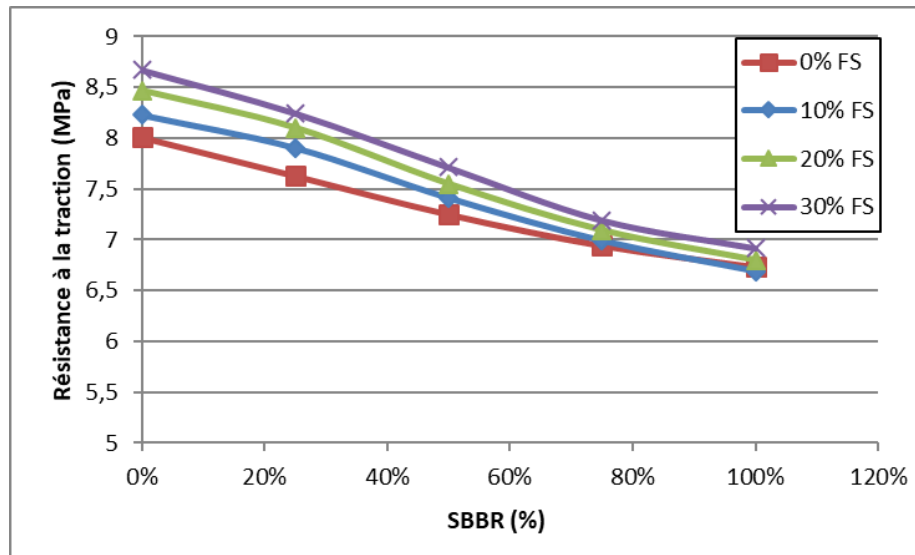


Figure 5.11 Variation de la résistance à la traction des différents mélanges. (28 jours).

5.3.3 La perte en poids

Les résultats de la perte en poids des différents mélanges de mortier autoplaçants en fonction de la substitution en fumée de silice et en SBBR, sont représentées dans la figure 5.12. Les valeurs des résultats de la perte en poids augmentent avec l'augmentation de la substitution des SBBR dans les mélanges des mortiers autoplaçants, et diminuent avec l'augmentation de la substitution du ciment par de la fumée de silice, cette diminution dans la perte en poids est plus significative pour des substitutions élevées des SBBR. La perte en poids a enregistré une baisse de 28.57 % pour une substitution de 30% de fumée de silice pour un mélange de mortier autoplaçant fait par du sable naturel seulement, alors que cette baisse était de l'ordre de 37.14 % pour un mortier autoplaçant fait seulement de sable de béton bitumineux recyclés. Les particules fines de la fumée de silice jouent un rôle très important dans la cinétique d'évaporation d'eau, de même, la fumée de silice semble très absorbante à l'eau à cause de sa finesse élevée et qui laisse peu d'eau disponible à la lubrification du ciment. Les travaux de Kwan et Fung, 2012 mettent en évidence que la fumée de silice améliore et la compacité et l'ouvrabilité du mortier. La présence de la fumée de silice se caractérise par un coefficient d'ajustement est très faible, il est conduit par la grande finesse de ce produit qui s'intercale entre les grains de ciment et libère plus d'eau pour la mixture.

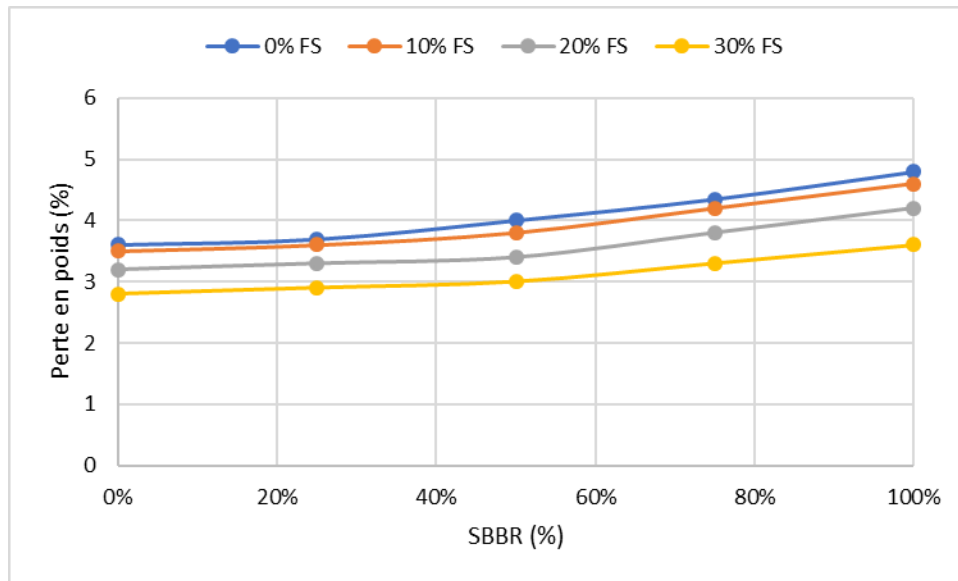


Figure 5.12 Pertes en poids des éprouvettes en fonction de la teneur SBBR et la FS ($t=90$ jours).

5.3.4 La sorptivité

Les valeurs des résultats des coefficients d'absorption capillaire (sorptivité) des différents mélanges de mortiers autoplacants après 28 jours de durcissement sont présentés à la Figure 5.13. L'analyse révèle plusieurs tendances significatives où une réduction systématique de l'absorption capillaire a été observée dans tous les mélanges incorporant des granulats recyclés comparativement au mortier témoin de référence, cette diminution des coefficients de sorptivité suggère une modification de la microstructure poreuse induite par la présence des granulats recyclés, ces données mettent en évidence une influence notable de la nature des granulats sur le comportement capillaire des mortiers.

L'incorporation de la fumée de silice dans les mélanges des mortiers autoplacants engendre des diminutions des valeurs des coefficients de sorptivité de tous les mélanges. Cette diminution est plus significative en augmentant le pourcentage de substitution du ciment par de la fumée de silice et en augmentant le pourcentage de substitution des SBBR dans les mélanges, cela est peut-être attribué à la finesse de la fumée de silice qui joue un rôle important dans le squelette granulaire qui fait diminuer ces valeurs de coefficient de sorptivité.

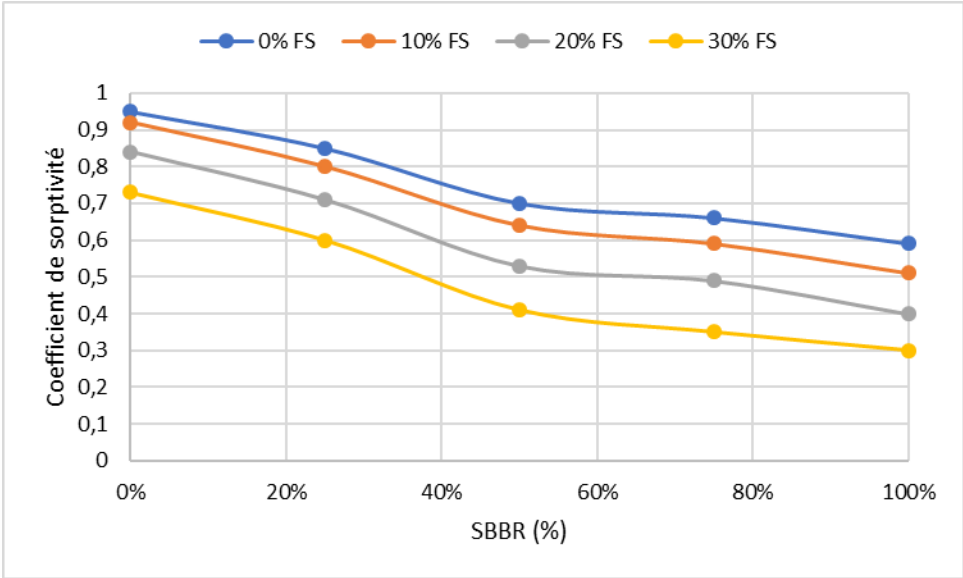


Figure 5.13 Les valeurs des coefficients de la Sorptivité des différents mélange de mortier autoplaçant.

Conclusions Générales



Conclusions générales

Cette étude a permis de caractériser en détail les propriétés des mortiers autoplaçant élaborés avec différentes proportions de sable de béton bitumineux recyclé et de fumée de silice. Les résultats ont montré que ces éléments influencent de manière significative les performances mécaniques, physiques et acoustiques des mortiers.

La morphologie angulaire et la texture rugueuse du SBBR, contrastant avec la forme arrondie et lisse du sable naturel, s'accompagnent d'une teneur en fines dix fois supérieure (12% vs 1%). Cette particularité influence considérablement le comportement rhéologique du mortier frais, les caractéristiques mécaniques après durcissement et sa microstructure et sa durabilité.

Le SBBR et la fumée de silice ont une absorption d'eau beaucoup plus élevée. Ceci est expliqué par la porosité élevée de la pâte cimentaire, qui influence les propriétés des mortiers autoplaçant à base des SBBR à l'état frais et durci.

L'étalement des différents mélanges des mortiers autoplaçant diminue avec l'augmentation de la substitution des SBBR ce qui entraîne une demande supplémentaire en superplastifiant pour attendre un même étalement, l'utilisation de ces granulats avec la fumée de silice augmente cette demande en superplastifiant à cause de la finesse élevée de la FS.

Dans les mortiers à base de sable de béton bitumineux recyclé, les résistances à la compression et à la traction ont diminué à mesure que le taux de remplacement du sable augmentait. Tous les taux de remplacement du SBBR ont montré un impact négatif. Cette baisse peut être attribuée à la fois à la fixation inerte du vieux bitume, qui permet au ciment de s'hydrater correctement, et à la faible adhérence entre la pâte de ciment et les grains de sable recyclé. L'utilisation de la fumée de silice réduit légèrement l'effet de ces granulats sur les résistances mécaniques.

Pour des taux de remplacement élevés, les sables recyclés ont généralement un impact négatif sur les résistances mécaniques et les propriétés liées à la durabilité des mortiers.

Des études de recherche limitées sur les propriétés de durabilité telles que la sorptivité, le gel-dégel et le fluage sont observées pour les mortiers utilisés avec les SBBR avec de la fumée de silice. Tous les mélanges contenant des granulats recyclés présentaient des valeurs de sorptivité inférieures par rapport au mélange de référence (mortier témoin).

L'utilisation de matériaux recyclés dans la fabrication du béton et du mortier nécessite une connaissance approfondie de leurs caractéristiques afin d'en maîtriser l'influence sur les propriétés finales. Les gravats issus des chaussées en béton bitumineux, par exemple, présentent une grande variabilité, ce qui complique leur contrôle. Cela pourrait justifier le développement de nouvelles méthodes d'assurance qualité adaptées à ces matériaux hétérogènes. Les principales pistes de recherche identifiées dans cette étude concernent :

L'analyse rhéologique des bétons et mortiers incorporant des granulats recyclés (SBBR), afin d'en comprendre le comportement à l'état frais.

L'étude de la porosité de ces matériaux après durcissement et son lien avec leurs propriétés physiques et mécaniques.

Par ailleurs, il serait pertinent d'évaluer l'influence des méthodes de préparation des granulats recyclés sur la qualité des bétons et mortiers produits. Enfin, la détermination de la granulométrie optimale pour ces matériaux recyclés constitue un axe de recherche prometteur, susceptible d'améliorer significativement leurs performances.

Références bibliographique

Références bibliographiques

- Abbas. A et al., Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis.
- Abraham Sarah Mariam, G.D.R.N. Ransinchung. Strength and permeation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *Construction and Building Materials* 167 (2018) 700–706.
- AIT MOHAMED AMER. A, Valorisation des matériaux de démolition dans la construction, 2017.
- Amnon Katz. Daniele Kulisch. Performance of mortars containing recycled fine aggregate from construction and demolition waste. *Materials and Structures* (2017) 50:199. DOI 10.1617/s11527-017-1067-x
- An. J, Nam. B.H, Youn. H, investigation on the effect of recycled asphalt shingle in portland cement mortar, *Sustainability* 8 (384) (2016) 1–16.
- Arabi. N, Berredjem . L, Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons, *Déchets-revue francophone d'écologie industrielle* (60) (2011) 25-30.
- Arshad, M.; Ahmed, M.F. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. *Constr. Build. Mater.* 2017, 151, 83–97.
- Asim Rifa, Sk M. Subhani, A. Bahurudeen, Kumar Gedela Santhosh. A systematic comparison of performance of recycled concrete fine aggregates with other alternative fine aggregates: An approach to find a sustainable alternative to river sand. *Journal of Building Engineering* 78 (2023) 107695. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107695>.
- Astm. C, 270. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, *Especificación Estándar Del Mortero Para UnidaDes De Mampostería*, 2003.
- ASTMC230/C230M-08, Standard specifications for flow table for use in tests of hydraulic cement, *ASTM Standards*, 2008.
-

ASTM-C-267-9, Standard test method for chemical resistance of mortar.

Barkat. A, Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton, 2006.

Barra de Oliveira. M and Vazquez. E, The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete, *Waste Management*, 1996;16(3) :113-117.

Beltrán. M.G, Agrela. F, Barbudo. A, Ayuso. J, Ramírez. A, Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *Construction and Building Materials* 72 (2014) 231-238.

Ben Salem, Fahd. Évaluation de l'effet d'ajout du régénérant sur le bitume vieilli et sur les enrobés recyclés à froid. Diss. École de technologie supérieure, 2017.

Berredjem. L, Le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et Comportement physiques et mécanique des bétons à base de ces recyclés, Université Badji Mokhtar Annaba, 2009.

Bogas. J.A, Real. S, Carriço. A, Abrantes. J.C.C, Guedes. M, Hydration and phase development of recycled cement, *Cem. Concr. Compos.* 127 (2022), 104405, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>.

Bommareddy. B.R, Fresh, Mechanical, and Durability Characteristics of Self-Consolidating Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate, Bradley University, 2014.

Boubekri, F. Affar, E.H.E. Balla, Localisation des décharges et dépotoirs sauvages, leur identification et leurs impacts sur l'environnement et la santé publique dans la commune de Bejaia, Université de Bejaia, 2014, p. 98.

Boubekri. S, Affar. F, Balla. E.H.E, Localisation des décharges et dépotoirs sauvages, leur identification et leurs impacts sur l'environnement et la santé publique dans la commune de Bejaia, Université de Bejaia, 2014, p. 98.

Boulay. V, Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel, Université de Sherbrooke, 2014.

- Bourmatte. N, Houari. H, granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques, Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2017.
- Brue. F, Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- BS EN 1015-18: "Methods of test for mortar for masonry : Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar", British European Standard, UK, (2002).
- BS EN 1015-6:1999, Methods of Test for Mortar for Masonry. Determination of Bulk Density of Fresh Mortar, British Standards Institution, London, UK, 199.
- Butler. L, West. J.S, Tighe. S.L, The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement, Cement and Concrete Research 41(10) (2011) 1037-1049.
- Cabral A.E.B, Schalchb. V, Dal Molin. D.C.C, Ribeiro. J.L.D, Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 421–430.
- Carriço Ana, José Alexandre Bogas, Sofia Real, Manuel Francisco, Costa Pereira. shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement. Construction and Building Materials 333 (2022) 127392
- Chakradhara Rao. M, Bhattacharyya. S.K, Barai. S.V, Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, Materials and Structures 44(1) (2011) 205-220.
- Chen, X.S.; Wang, H.Y.; Meng, F.Q.; Du, C. Experiment on Cold Regenerated Material of Old Asphalt Pavement. In Proceedings of the 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, China, 26–28 June 2010; pp. 1237–1240.
- Chen. B, Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 28(1) (2013) 104-109.
- Chen. H.-J, Yen. T, Chen. K.-H, Use of building rubbles as recycled aggregates, Cement and concrete research 33(1) (2003) 125-132.
-

- De Juan. M.S, Gutiérrez. P.A, Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials* 23(2) (2009) 872-877.
- Djerbi Tegger. A, Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Construct. Build. Mater.* 27 (1) (2012) 112–116, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018>.
- DREUX. G. «Nouveau guide du béton». Ed, Eyrolles, PARIS, (1998).
- Environ. Civil Eng.* 18(2) (2014) 129–172, DOI: 10.1080/19648189.2013.851038
- Etxeberria. M, Vázquez. E, Marí. A, Barra. M, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research* 37(5) (2007) 735-742.
- Evangelista. L, de Brito. J, Concrete with fine recycled aggregates: a review, *Eur. J.*
- Evangelista. L, de Brito. J, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* 29(5) (2007) 397-401.
- Ezziane. K, cours matériaux recyclés, Université de Chlef, (2017).
- Fathifazl. A, Abbas. A.G, Razaqpur. O.B, Isgor. B.F, Foo. S, New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate, *J. Mater. Civ. Eng.* 21 (2009) 601–611. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:10\(601\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:10(601)).
- Fathifazl. G, Abbas. A, Razaqpur. A.G, Isgor. O.B, Fournier. B, Foo. S, New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate, *Journal of materials in civil engineering* 21(10) (2009) 601-611.
- Ferreira. L, De Brito. J, Barra. M, Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *Magazine of Concrete Research* 63(8) (2011) 617-627.
- Garg. N, Shrivastava. S, A review on utilization of recycled concrete aggregates (RCA) and ceramic fines in mortar application. *Materials Today: Proceedings* 73 (2023) 64–73.
-

- Gokce A, Nagataki. S, Saeki. B, Hisada. M, Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (5) (2011) 2426–2431.
- Gomart. H, Etude de l'ouvrabilité et des propriétés mécaniques de mortiers à base de sable recyclé, 2013.
- Guo, Y. et Wang, X. Experimental study on forecasting mathematical model of drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012:14 p.
- Gupta. P.K, Khaudhair. Z, Ahuja. A.K, A new method for proportioning recycled concrete, *Stru. Con.* 4 (2016) 677–687, <https://doi.org/10.1002/suco.201400076>.
- Guuneyisi. E, Gesoglu. M, Algin. Z, Yazıcı. H, Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates, *Constr. Build. Mater.* 64 (2014) 172–183.
- Haach. V.G, Vasconcelos. G, Lourenço. P.B, Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars, *Construct. Build. Mater.* 25 (2011) 2980–2987.
- Herihiri, Ouided, Abdelhamid Guettala. Etude sur les Performances des composites à base de sable bitumineux recyclés (S06). CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France.
- Itim. A, Ezziane. K, Kadri. E.-H, Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions, *Construction and Building Materials* 25(8) (2011) 3603-3609.
- Jesus. S, Maia. C, Brazão Farinha. C, de Brito. J, Veiga. R, Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste, *Constr.Build.Mater.* 229 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116844>.
- Katz. A, Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research* 33(5) (2003) 703-711.
-

- Kaufmann, J.**, Huang, B., Shu, X., & Birgisson, B. (2019). Fresh Properties of Sustainable Asphalt Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(4), 04019015.
- Kenai, S, Debieb, F, Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés, *Materials and Structures* 44(4) (2011) 815-824.
- Khatib, J.M, Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, *Cem. Concr. Res.* 35 (4) (2005) 763–769, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>.
- Khouildi, S, Hamdi, M, Kabdi, S, La gestion des déchets industriels. Etude de cas flash chemicals industry (FCI), Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017, p. 47.
- Komkorn Chaidachatorn, Jirayut Suebsuk, Suksun Horpibulsuk, Arul Arulrajah. Extended water/cement ratio law for cement mortar containing recycled asphalt pavement. *Construction and Building Materials* 196 (2019) 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.047>
- Kou S.C., Poon. C.S, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 622–627.
- Kou. S.C, Poon. C.S, Chan. D, Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete, *Materials and Structures* 41(7) (2008) 1191-1201.
- Kou. S.C, Poon. C.S, Chan. D, Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(9) (2007) 709-717.
- Kple. M, Étude des voies de valorisation des déchets ménagers au Bénin: cas de la ville d'Abomey-Calavi, Université de Lorraine, 2015.
- Kple. M, Étude des voies de valorisation des déchets ménagers au Bénin: cas de la ville d'Abomey-Calavi, Université de Lorraine, 2015.
-

- Kumar. S.G, Influence of fluidity on mechanical and permeation performances of recycled aggregate mortar. *Construction and Building Materials* 213 (2019) 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.093>
- Kumar. S.G, Influence of fluidity on mechanical and permeation performances of recycled aggregate mortar. *Construction and Building Materials*, Volume 213, 20 July 2019, Pages 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.093>
- Le. T, Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers, Lille 1, 2015.
- Ledesma. E.F, Jiménez. J.R, Fernández. J.M, Galvín. A.P, Agrela. F, Barbudo. A, Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates, *Comput. Chem. Eng.* 71 (2014) 289–298, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.080>.
- Malešev. M, Radonjanin. V, Marinković. S, Recycled concrete as aggregate for structural concrete production, *Sustainability* 2(5) (2010) 1204-1225.
- Malier. Y, Moranville-Regourd. M, De Larrard. F, Puch. C, Levy. C, Vernet. C, Cadoret. G, Acker. P, Lorrain. M, Fvre. R, Les bétons a hautes performances-caractérisation, durabilité, applications-la connaissance du matériau, 1992.
- Maria E. Sosa, Juan M. Etcheverry, Yury A. Villagran Zaccardi, Claudio J. Zega
- Marianne Saba, Joseph J. Assaad. Effect of recycled fine aggregates on performance of geopolymer masonry mortars. *Construction and Building Materials* 279 (2021) 122461
- Mechanical and microstructural properties of mortar with fine recycled aggregates. *Materials Today: Proceedings* 4 August 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.148>
- Mehdi Cheikh Rouhou «Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment» thèse de fin de formation 2007.
- Mr.GUENDOOUZ Mohamed , contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base de déchets plastiques: application au béton de sable,2017.
-

- Nealen A and Schenk S, The Influence of Recycled Aggregate Core Moisture on Freshly Mixed and Hardened Concrete Properties. (1998). See <http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon13nealenschenk.htm> for further details.
- Neno. C, de Brito. J, Veiga. R, Using fine recycled concrete aggregate for mortar production, Mater. Res. 17 (1) (2014) 168–177, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.362>.
- NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques. Avril 2006.
- NF-P15-433, Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement, Edition Afnor1994.
- NF-P-18-555, Granulats - mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables, Edition Afnor,1990.
- NF-P-18-598, Granulats équivalent de sable, Edition Afnor,1991.
- Ngô. C, Régent. A, Déchets et pollution: impact sur l'environnement et la santé, Dunod2004.
- Ngô. C, Régent. A, Déchets et pollution: impact sur l'environnement et la santé, Dunod2004.
- Norme Française P 18-555, "Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables", AFNOR, (1990).
- Olorunsogo. F.T, Padayachee. N, Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, Cement and Concrete Research 32(2) (2002) 179-185.
- OUAFI Soumia et MAGHLOUFI Aida «Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base de sable recyclé». Mémoire de fin d'étude de l'Université de Université Hassiba Benbouali –Chlef 2017/2018.
- Padmini. A.K, Ramamurthy. K,Mathews. M.S, Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials 23(2) (2009) 829-836.
- Pedro. D, de Brito. J, Evangelista. L, Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete, Construction and Building Materials 71 (2014) 141-151.
-

- Poon. C.S, Kou. S, Wan cong, wen. H, Etxeberria. M, Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates, *Waste Manag.* 29 (8) (2009) 2369–2377, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.02.018>.
- Rao. A, Jha. K.N, Misra. S, Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, *Resources, Conservation and Recycling* 50(1) (2007) 71-81.
- Rasheeduzzafar . A and Khan, *Recycled Concrete—A Source for New Aggregate*, 6(1) (1984) 17-27.
- Ravindra K. Dhir OBE, Jorge de Brito, Rui V. Silva, Chao Qun Lye, *Availability of Recycled Aggregates, Sustainable Construction Materials, Recycled Aggregates, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (2019), 35-56.
- Ravindrarah. R, Steward. M, Greco. D, Variability of recycled concrete aggregate and its effect on concrete properties: A case study in Australia, *International workshop on recycled concrete*, 2000.
- Richardson. A, Coventry. K, Bacon. J, Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production* 19(2-3) (2011) 272-277.
- Salahuddin. H, Qureshi. L.A, Nawaz. A, Raza. S.S, Effect of recycled fine aggregates on performance of Reactive Powder Concrete, *Construct. Build. Mater.* 243 (2020), 118223, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118223>.
- Sandrine Braymand, Pierre François, Françoise Feugeas and Christophe Fond, *Rheological Properties of Recycled Aggregate Concrete Using Superplasticizers*, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2015;9:591-597.
- Serifou. M, *Béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et rôle de la formulation*, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2013.
- Silva. R.V, de Brito. J, Dhir. R.K, Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials* 65 (2014) 201-217.
-

- SPERANDIO K « identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales» thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.
- Tabatabaee, N., Shafabakhsh, G. H. R., & Mirabdolazimi, S. M. (2016). Investigation of the Effect of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Recycled Asphalt Shingles (RAS) on the Fresh Properties of Warm Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015125.
- William-D Jr Callister, « Science et génie des matériaux », Modulo Edition, 2001.
- Yacoub. A, Djerbi. A, Fen-Chong. T, The effect of the drying temperature on water porosity and gas permeability of recycled sand mortar, *Constr. Build. Mater.* 214 (2019) 677–684, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.128>.
- Zhen Li, Jiaping Liu, Jianzhuang Xiao, Peihua Zhong. A method to determine water absorption of recycled fine aggregate in paste for design and quality control of fresh mortar. *Construction and Building Materials* 197 (2019) 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.115>.
- Kwan AKH., Fung WWS., "Roles of water film thickness and SP dosage in rheology and cohesiveness of mortar", *Cement and concrete composites*, vol, 34,2012, pp.121–130.
-