

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

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

Faculté des Sciences et de la technologie

Département GENIE CIVIL

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

Présenté par :

- **LOUASSA Tahar**
- **BENZEGHIBA Moussa nacer eddine**

Intitulé

Etude du comportement physique, mécanique et durabilité des bétons à base des nouvelles additions minérales et des différentes fractions des granulats recyclés traités

Soutenu le : .././2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Noui Ammar</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>C-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

De prime abord, on tient à remercier le dieu est miséricordieux de nous avoir donnés la force, le courage et la patience durant notre étude pour arriver à ce jour-là.

Comme, c'est un plaisir de remercier tous ce qui a contribué à la réalisation de ce mémoire :

En premier lieu, nous voudrions exprimer nos sincères remerciements à **Dr. BELKADI Ahmed Abderraouf** et **Dr. KESSAL Oussama**, Nos encadreurs, pour l'aide qu'ils ont apporté à la réalisation de ce travail et pour leur précieux conseils.

Nous tenons à remercier également les professeurs de département de génie civil, les ingénieurs de laboratoire, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Résumé

L'utilisation des bétons autoplaçants revêt un intérêt particulier sous l'éclairage du développement durable.

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets. Les granulats recyclés (GR) obtenus par concassage et calibrage des graviers de béton collectés sur les chantiers de démolition sont composés de granulats naturels grossiers et de mortier résiduel adhérent. Ce dernier, donne des caractéristiques spécifiques du squelette granulaire telles qu'une densité faible, une absorption d'eau plus élevée, une angularité et surface plus rugueuse. Cela a modifié par conséquent la capacité de l'écoulement, la résistance et la déformabilité des BAP...etc.

Cette étude a analysé l'effet de remplacement total du filler calcaire par deux types de déchets (fines de béton et de verre provenant de déchets de construction) sur le comportement physique et mécanique des BAP à base des GR en utilisant différentes méthodes d'analyse. Ainsi, les GR sont traités mécaniquement à l'aide de l'essai Los-Angeles afin d'enlever le mortier adhérent. De plus, des performances mécaniques et physiques des BAP ont été étudiées (Étalement, résistance à la compression, vitesse de l'ultrason, l'absorption et l'attaque chimique). Les résultats obtenus par ce travail montrent que les fines recyclées (verre ou fines de béton) ont un effet significatif sur les performances des BAP.

De plus la présence de poudre de verre et fine de béton démolie provoque une augmentation de la résistance à la compression jusqu'à 7% par rapport au BAP à base de filler calcaire.

A partir de ces résultats on va attester de la viabilité scientifique du recyclage de ces produits en tant qu'ajouts minéraux dans la fabrication des BAP et, par conséquent, d'éliminer le besoin de stocker ces matériaux dans des usines de recyclage/stockage.

Mots clés :

Béton autoplaçant, granulats recyclés, matériaux cimentaire, écologique, résistance à la compression, absorption d'eau, traitement mécanique, poudre de verre, fine de béton démolie.

Abstract

The use of self-compacting concrete is of particular interest in the light of sustainable development.

The demolition of concrete structures and the building materials industry are always accompanied by secondary products or wastes. The recycled aggregates (RAC) obtained by crushing and calibrating concrete gravel collected on demolition sites are composed of coarse natural aggregate and residual adhesive mortar. The latter gives specific characteristics of the granular skeleton such as low density, higher water absorption, rougher angularity and surface. This consequently changed the flow capacity, strength and deformability of SCC ... etc.

Hus, our bibliographical summary is made up of two parts. The first part concerns the study of the influence of RAC on the short- and long-term characteristics of the commented materials (concrete mortar). The second part is dedicated to an in-depth look at the effect of recycled aggregates on the behavior of SCC in the fresh and hardened state.

It was concluded that it can be clearly stated that the use of RAC in the production of SCC is viable.

Keywords :

Self-compacting concrete, recycled aggregates, ecological, resistance, cementitious materials, water absorption.

ملخص

إن استخدام الخرسانة المضغوطة ذاتيًا له أهمية خاصة في ضوء التنمية المستدامة.

دائمًا ما يكون هدم الهياكل الخرسانية وصناعة مواد البناء مصحوبًا بمنتجات ثانوية أو نفايات. الركام المعاد تدويره (GRB) الذي تم الحصول عليه عن طريق تكسير ومعايرة الحصى الخرساني الذي تم جمعه في مواقع الهدم يتكون من الركام الطبيعي الخشن والملاط اللاصق المتبقي. يعطي الأخير خصائص محددة للهيكل الحبيبي مثل الكثافة المنخفضة ، وامتصاص الماء العالي ، والزاوية الخشنة والسطح. أدى هذا بالتالي إلى تغيير سعة التدفق والقوة والتشوه لـ ... BAPS إلخ.

وهكذا ، يتألف ملخصنا الببليوغرافي من جزأين. يتعلق الجزء الأول بدراسة تأثير GRB على الخصائص قصيرة وطويلة المدى للمواد المعلقة (الملاط الخرساني). الجزء الثاني مخصص لإلقاء نظرة متعمقة على تأثير الركام المعاد تدويره على سلوك BAPS في الحالة الطازجة والمتصلبة.

تم التوصل إلى أنه يمكن القول بوضوح أن استخدام GRBs في إنتاج BAPS قابل للتطبيق.

الكلمات الدالة

الخرسانة ذاتية التماسك ، الركام المعاد تدويره ، الألياف ، البيئة ، المقاومة ، امتصاص الماء ، مواد اسمنتية.

Table des matières

Résumé..... 3

Abstract..... 4

ملخص.....	5
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1: Etat de l'art sur les granulats recyclés	
1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition de déchets recyclés	4
1.3 Historique des granulats recyclés.....	6
1.4 Classification de granulats recyclés (filière de la construction)	6
1.4.1 les granulats mixtes	7
1.4.2 la production des granulats recyclés.....	7
1.5 Propriétés des granulats recyclés.....	8
1.5.1 Interface pâte granulats	8
1.5.2 Propriétés mécaniques.....	9
1.5.3 Absorption d'eau et la porosité	10
1.6 Obstacles de l'utilisation des granulats recyclés	11
1.7 Conclusion	11
CHAPITRE 2: Effet du traitement des granulats recyclés sur le comportement des béton	
2.1 Introduction.....	14
2.2 traitement mécanique des granulats	14
2.3 traitement chimique.....	16
2.4 carbonatation.....	17
2.5 Effet des GR sur le comportement du béton autoplacants.....	18
2.5.1 Effet des GR sur les propriétés des BAP à l'état frais.....	18
2.5.2 ouvrabilités et vitesse d'écoulement en l'absence d'obstacles.....	19
2.5.3 Résistance à la compression.....	20
2.6 conclusion.....	21
CHAPITRE 3: Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais	
3.1 Introduction.....	23
3.2 Matériaux de construction de base.....	23
3.2.1 Granulats.....	23
3.2.1.1 Analyse granulométrique	23
3.2.1.2 Masse volumique absolue et apparente des granulats.....	24
3.2.1.3 Caractéristiques physico-chimiques	25
➤ Résistance des granulats	25
3.2.2 Ciment.....	25

3.2.3	Additions minérales	26
3.2.4	Les adjuvants (super plastifiant)	26
3.2.5	Eau de gâchage	26
3.2.6	Granulats recyclés.....	26
3.3	Traitement des granulats recyclés	27
➤	Traitement mécanique.....	27
3.4	Formulation.....	28
3.4.1	Méthode de formulation LCPC (BETONLAB pro)	28
➤	La composition retenue	29
3.5	Essais de caractérisations des BAP	30
3.5.1	Caractérisation à l'état frais	30
3.5.2	Caractérisation à l'état durci	30
3.5.2.1	Essai de compression.....	30
3.5.2.2	La vitesse de l'ultrason	31
3.5.2.3	Absorption capillaire	32
3.6	Conclusion	32

CHAPITRE 4: Resultats et discussion

4.1	Introduction.....	34
4.2	Performances à l'état frais	34
4.3	Performances à l'état durci	35
4.3.1	Résistance à la compression	35
4.3.2	Densité apparente	36
4.3.3	Relation entre la Densité apparente et la résistance à la compression	37
4.3.4	Absorption d'eau	37
4.3.5	Vitesse ultrason	38
4.4	Conclusion	39
	CONCLUSION GENERALE	41
	Références	43

Liste des figures

Figure 1. 1	Schématisation d'un granulat recyclé.....	5
Figure 1. 2	Production de béton entre 2001et 2015(données ERMCO).....	7

Figure 1. 3 Représentation schématique de la double ITZ dans le béton de granulats recyclés...	9
Figure 1. 4 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché (Fiandaca , 2015)	Erreur ! Signet non défini.
Figure2. 1 .Méthode de traitement mécanique.....	15 Erreur ! Signet non défini.
Figure2. 2 Variation de la densité et de l'absorption d'eau des bétons contiennent des GR traités et non traité(Dilbas et al., 2019).....	15
Figure 2. 3 Silicium.....	16
Figure 2. 4 Résistance à la compression et la flexion des bétons a base de GR traités et non traités	17
Figure 2. 5 Résistances à la compression des bétons à base des granulats recyclés carbonatée et non carbonatés	18
Figure 2. 6 Observation microstructurale (a) béton avec GR non traité et (b) béton avec GR traité.....	18
Figure 2.7 Effet des GRB sur la diamètre de l'étalement des BAP (Santos et al 2019).....	19
Figure 2.8 Effet de GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP (Kou and Poon 2009).....	20
Figure 2.9 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP (Travaux de la littérature) (Tuyan et al 2014) (Kou and Poon 2009).....	20
Figure3. 1 Courbe granulométrique des mélanges.....	24
Figure3. 2 Concasseur et granulats recyclé sans traitement.....	27
Figure3. 3 Appareil Los angles et granulats recyclés traités.	27
Figure3. 4 Organigramme de formulation betonlab pro (De Larrard et Sedran 1999).	28
Figure3. 5 Interface de Bétonlab pro.	29
Figure3.6 teste de l'étalement des BAP.....	30
Figure3. 7 Appareil d'essai de la résistance à la compression.	30
Figure3. 8 Essai de l'ultrason.	31
Figure4. 1 Teste de l'étalement des BAP.....	34
Figure4. 2 Résistance à la compression de différents mélanges.....	35
Figure4. 3 Densité sèche de différents mélanges.	36
Figure4. 4 Relation entre la densité sèche et la résistance à la compression.	37
Figure4. 5 Absorption d'eau par immersion totale.	38
Figure4. 6 Vitesse d'impulsion de différents mélanges.....	38
Figure4. 7 Relation entre la vitesse d'impulsion et la résistance à la compression.	39

Liste des tableaux

Tableau1. 1 Pourcentage des différents déchets (Vachon et coll., 2009).	5
Tableau1. 2 Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés (Hansen, 1992).	Erreur ! Signet non défini.
Tableau1.3 Propriétés de béton de granulats recyclés.	9
Tableau3. 1 Valeurs des masses volumiques des granulats utilisés.	24
Tableau3. 2 Valeurs de l'équivalent de sable.	25
Tableau3. 3 Caractéristiques mécaniques des gravillons 8/15.	25
Tableau3. 4 Caractéristiques chimiques et physique des ciments utilisés.	26
Tableau3. 5 Composition chimique et physique de fillers calcaire et du metakaolin.	26
Tableau3. 6 Composition de différents mélanges de BAP utilisés.	29
Tableau4. 1 Diamètre de l'étalement des différents mélanges.	34

INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du béton a une énorme empreinte écologique sur la planète. Premièrement, les ressources naturelles s'épuisent en raison des vastes quantités de matières premières nécessaires pour produire des milliards de tonnes de béton chaque année dans le monde. Ensuite, les émissions de CO₂ dégagées lors de la production du ciment Portland. Dans le cadre du développement durable et de la gestion optimisée des déchets liés à l'industrie de la construction, il est crucial d'étudier les possibilités d'amélioration du processus actuel de recyclage du béton. En effet, contrairement aux ressources naturelles telles que les roches sédimentaires, les déchets de construction n'ont cessé de croître au fil des années. Il est donc devenu nécessaire de recycler ces déchets en granulats recyclés (GR) pour créer une économie circulaire, notamment la fabrication de béton prêt à l'emploi ou de blocs préfabriqués de type dalle. Cette nécessité n'est pas seulement dû au fait que le béton est actuellement le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, mais aussi parce que le granulat est une partie importante de la composition de ce béton, et son pourcentage volumique atteint 75% du béton. Le but de ce mémoire est d'analyser l'effet de remplacement total du filler calcaire par deux types de déchets (fines de béton et de verre provenant de déchets de construction) sur le comportement physique et mécaniques des BAP à base des GR en utilisant différentes méthodes d'analyse. Ainsi, les GR sont traités mécaniquement à l'aide de l'essai los-Angeles afin d'enlever le mortier adhérent et améliorer leurs propriétés chimiques, physiques et mécaniques. L'approche est essentiellement expérimentale et comporte deux axes principaux :

Le premier axe concerne l'étude de l'effet des granulats recyclés et les déchets recyclés sur les performances mécaniques des BAP.

Le deuxième axe concerne l'influence de la présence des déchets recyclés sur le comportement et à la durabilité des BAP.

Ainsi, le mémoire de thèse se compose de deux grandes parties.

La première partie est dédiée à l'étude bibliographique, elle se décompose en deux chapitres :

- Le premier est consacré à des généralités sur les granulats recyclés (GR), suivi de leur comportement vis-à-vis de différents phénomènes (Résistance à la compression ...etc)
- Le deuxième chapitre est destiné à une revue de littérature des travaux antérieurs en mettant l'accent sur l'influence du traitement des granulats recyclés sur le comportement des bétons à l'état frais, durcissant et durabilité.

La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales et aux analyses des résultats, elle est structurée comme suit :

INTRODUCTION GENERALE

- Une description détaillée de tous les matériaux utilisés et regroupe la caractérisation classique des mélanges retenus. Ceci constitue le troisième chapitre
- Le quatrième chapitre s'intéresse à l'étude de l'influence des fines recyclées et granulats recyclés (GR) sur le comportement et la durabilité des BAP.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LES GRANULATS RECYCLES

1.1 Introduction

Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement Algérien a décidé en 2001 de consacrer de près de 970Md (Soumah, 2019), pour atteindre les objectifs inscrits dans le plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD).

L'augmentation de la population de la planète et l'amélioration générale du niveau de vie moyen des habitants a conduit à une augmentation de la production de biens de consommation, tout en générant un flux de déchets de plus en plus important. Cette accumulation de déchets dont la durée de vie est de plusieurs milliers d'années a posé de gros problèmes à notre société de consommation car elle pollue l'environnement et cause parfois des dommages au cadre de vie. De plus, la production d'une tonne de ciment provoque une tonne de CO₂ ainsi elle consomme des ressources naturelles et de l'énergie, mettant en danger les économies de certains pays.

En effet, la diminution des réserves récupérables des déchets provenant du béton ou du verre ont conduit à rechercher d'autres voies d'approvisionnement en fine pour l'industrie du ciment. C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme la solution d'avenir pour combler le déficit entre production, consommation et protéger l'environnement.

Dans ce chapitre on donnera la définition et les différentes propriétés des granulats recyclés utilisés dans la fabrication des bétons.

1.2 Définition de déchets recyclés

Le secteur de la déconstruction qui concerne les matériaux destinés à la démolition de bâtiments ou de routes : on parle de granulats recyclés car les matières premières utilisées pour les produire sont elles-mêmes des granulats « purs » ou des granulats associés à des liants (en béton et enrobés routiers moyens), (Pacheco-Torgal and Labrincha, 2013). Selon le rapport sur la gestion des déchets en Algérie (Soumah, 2019), l'Algérie génère 2 550 000 tonnes de déchets industriels chaque année. Le stock de déchets spéciaux en Algérie est estimé à 2,8 millions de tonnes et la production de déchets spéciaux est estimée à 325 000 tonnes/an.



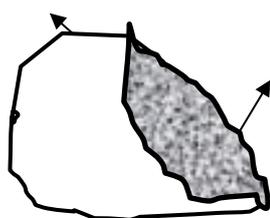
Figure 1.1 Béton démoli.

Selon (Pedro *et al.*, 2017), les granulats recyclés peuvent être définis comme des granulats grossiers et fins, qui sont obtenus en tamisant et en séparant leurs composants des déchets de construction et de démolition. De plus, ils sont classés en fonction de la disponibilité et des besoins. De façon générale, le tableau 1.1 regroupe les proportions de résidus de construction, de rénovation et de démolition dans une même catégorie. Le granulat de béton recyclé est composé de granulats naturels et d'environ 30 % de mortier lié (Poon *et al.*, 2004). Ce dernier rend la surface GR rugueuse avec de nombreux pores et microfissures. Pour ces raisons, le GR se caractérise par une faible densité, une forte absorption d'eau et une faible résistance mécanique par rapport aux granulats naturels (Tam *et al.*, 2005, Kou and Poon, 2010). Il n'existe actuellement aucun moyen pratique de séparer le mortier résiduel et les agrégats naturels dans les usines de recyclage (Xiao *et al.*, 2018).

Tableau1. 1 Pourcentage des différents déchets (Vachon et coll., 2009).

	Béton	Briques, tuiles, céramiques	Métal	Bois	Verre	Plastique	Papier et carton
Déchet (%)	64	32	1,6	0,8	0,8	0,4	0,4

Mortier résiduel



Granulat naturel

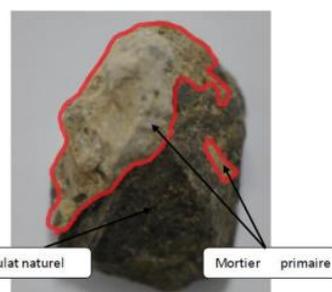


Figure 1. 1 Schématisation d'un granulat recyclé.

1.3 Historique des granulats recyclés

L'utilisation de granulats recyclés issus de la démolition d'anciens bétons dans du béton neuf n'est pas un phénomène récent (Nixon, 1978). RILEM a publié le premier état de l'art sur le sujet en 1978. La première utilisation du béton concassé remonte à l'Antiquité, enregistrée pour la première fois en Allemagne en 1960 (Seconde Guerre mondiale). Pendant et après la guerre, les décombres des bombardements, en particulier des bombardements aériens, ont été utilisés dans le béton pour reconstruire la ville (Buck, 1972). Il est devenu populaire aux États-Unis dans les années 1970 lorsque les décharges à proximité des zones peuplées ont commencé à refuser d'accepter le béton brisé. Le problème est que le béton reste inactif et prend trop de place. Par conséquent, les gens ont commencé à le broyer en agrégat et à le réutiliser comme charge (Poon and Chan, 2007).

1.4 Classification de granulats recyclés (filière de la construction)

Les granulats récupérés des déchets de construction et de démolition doivent respecter certaines exigences en matière de granulométrie et de présence minimale de contaminants (Silva *et al.*, 2014). Parmi les différentes définitions et classifications des granulats recyclés, on distingue : Agrégat recyclé principalement à partir de béton, ces granulats doivent contenir 90 % de ciment et de granulats naturels (DIN, 2002). Les granulats de maçonnerie recyclés sont divers minéraux de matériaux de construction résultant de la construction et de la démolition de bâtiments et de structures. La gamme de matériaux peut inclure des blocs de béton cellulaire et léger, des céramiques, des briques, des blocs de laitier de haut fourneau et des briques de sable calcaire. Ce type d'agrégat contient généralement du mortier et de l'argile cuite. Les granulats de maçonnerie recyclés doivent être constitués d'au moins 90 % de tous les matériaux ci-dessus.



Figure 1.2 Les granulats de maçonnerie recyclés.

1.4.1 Les granulats mixtes

se sont des matériaux constitués de béton concassé et de déchets de maçonnerie (céramique, béton léger). Une autre catégorie, selon lui, est constituée de granulats recyclés extraits d'enrobés bitumineux. Cette catégorie provient du recyclage des chaussées composées d'asphalte. Le recyclage sur site des granulats qui composent la base de la route est très courant : les granulats retirés de l'ancienne voie sont concassés et triés dans des unités mobiles (concassage et criblage) situées sur le site de la route, puis immédiatement réutilisés. Dans notre mémoire, nous nous intéresserons aux granulats récupérés de la déconstruction du béton dans les bâtiments et les structures.

1.4.2 La production des granulats recyclés

Ces dernières années, on peut remarquer (Figure 1.2) une augmentation spectaculaire de la production de béton comme matériau de construction. Le secteur de la construction est le coupable d'une forte consommation d'énergie. De plus, ces bâtiments ont une durée de vie limitée : après un certain nombre d'années, ils sont démolis. Cela crée des déchets. Afin de pouvoir améliorer l'impact environnemental du béton, les déchets de béton peuvent être réutilisés pour la fabrication de nouveaux matériaux de construction, comme le prévoit la norme UNI EN ISO 14040 : 2006. Les déchets de construction et de démolition (C&D) représentent environ 25 à 35 % du total des déchets générés dans l'UE. Il existe différents matériaux tels que le béton, la maçonnerie, le bois, le verre. Une fois les déchets traités, ils peuvent entrer dans la composition du béton. À cette fin, la recherche montre qu'il existe plus ou moins d'États éthiques dans l'UE.

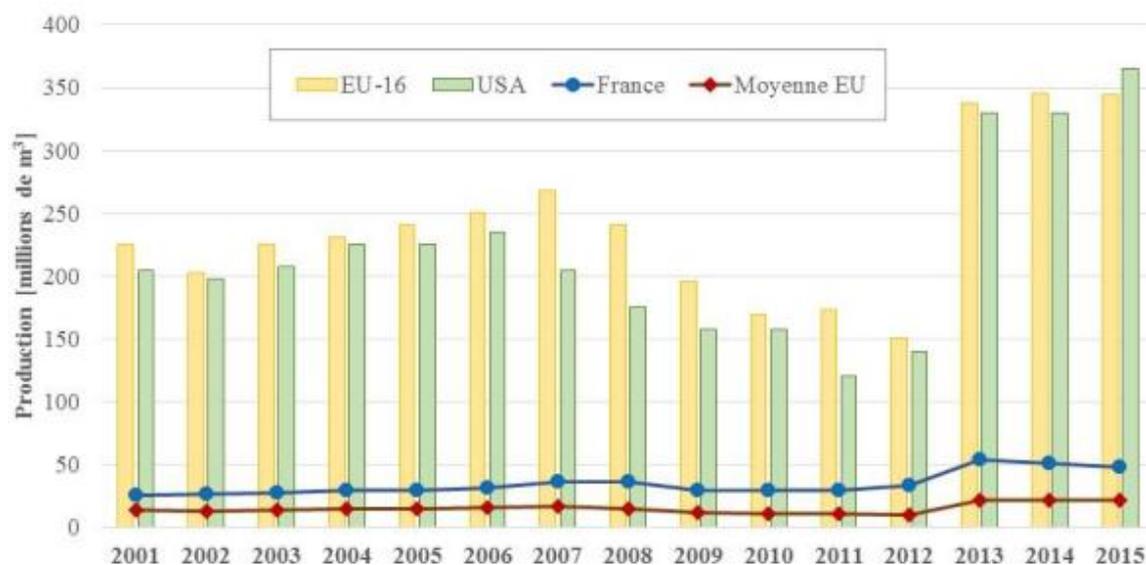


Figure 1.2 Production de béton entre 2001 et 2015. (Données ERMCO) (Xiao *et al.*, 2018)

1.5 Propriétés des granulats recyclés

Il existe de nombreux types de granulats recyclés, selon l'industrie locale et les matériaux utilisés. Nous l'avons vu dans les paragraphes précédents. Les granulats recyclés (GR) sont très hétérogènes et poreux et peuvent contenir des impuretés. L'hétérogénéité affecte les propriétés des GR, compromettant ainsi la qualité du béton fabriqué avec ces derniers. Les propriétés ci-dessus conduisent à une diminution de la quantité d'eau disponible et à une zone de transition interfaciale (ITZ) plus faible entre le granulat recyclé et la pâte de ciment. Les recherches confirment que les granulats recyclés ont : une densité plus faible, un coefficient d'absorption plus élevé et une résistance à l'abrasion plus faible par rapport aux propriétés observées avec les granulats naturels. Le tableau 1.2 donne quelques exemples de propriétés représentatives des granulats recyclés par rapport à leurs granulats vierges.

Tableau1. 2 Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés (Hansen, 1992).

Granulat	Classe (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)	Perte par abrasion Los Angeles (%) (L500)	% volumique de mortier attaché aux particules naturelles
Gravillon naturel initial	4-8	2500	3,7	25,9	0
	8-16	2620	1,8	22,7	0
	16-32	2610	0,8	18,8	0
Recyclé 1	4-8	2340	8,5	30,1	58
	8-16	2450	5,0	26,7	38
	16-32	2490	3,8	22,4	35
Recyclé 2	4-8	2350	8,7	32,6	64
	8-16	2440	5,4	29,2	39
	16-32	2480	4,0	25,4	28

1.5.1 Interface pate granulats

En ce qui concerne les bétons contenant des granulats recyclés, il existe deux catégories de ZIT, comme expliqué par Tam et al: - une « nouvelle ITZ » constituée de la zone d'interface entre le granulat recyclé et la nouvelle matrice cimentaire ; - « Old ITZ » constitué de la zone interfaciale

entre le granulat d'origine et l'ancien ciment. La figure 10 fournit un diagramme schématique où les deux régions ci-dessus. La nouvelle ITZ est mise en évidence par une ligne rouge continue et l'ancienne ITZ est mise en évidence par une ligne verte continue. Ce double ITZ ajoute une zone de faiblesse supplémentaire où fissure. De plus, la porosité accrue causée par ces multiples régions d'interface affecte la résistance à la compression ultime du béton. Cependant, Etxeberria et al. ont constaté que la nouvelle ITZ peut avoir un effet favorable sur la résistance du béton.

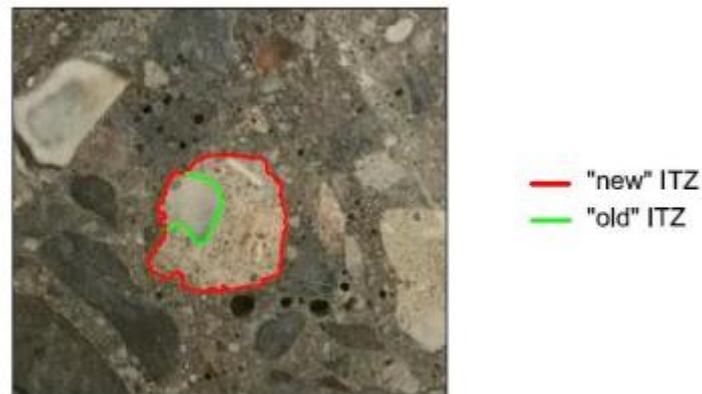


Figure 1.3 Représentation schématique de la double ITZ dans le béton de granulats recyclés.

1.5.2 Propriétés mécaniques

Plusieurs études ont été menées sur les propriétés mécaniques du béton de granulats recyclés à température ambiante. De manière générale, une perte progressive des propriétés mécaniques est observée avec le pourcentage de granulats recyclés. Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau 8 présenté par Marinković.

Tableau 1.3 . Propriétés de bétons de granulats recyclé.

Propriétés	Effet de l'ajout de granulats recyclés
Résistance à la compression	Réduction jusqu'à le 25%
Résistance à la traction par fendage	Réduction jusqu'à le 10%
Module dynamique	Réduction jusqu'à le 45%

La résistance à la compression est l'un des paramètres les plus importants pour déterminer la qualité du béton.

L'ampleur de de la réduction de la résistance à la compression des bétons à base des granulats recyclés varie selon plusieurs paramètres :

- De faibles teneurs de granulats recyclés (jusqu'à 30%) produisent des pertes marginales (moins de 5% de la résistance initiale) résistance à la compression. En revanche, à partir de 50%

Alternativement, la perte de résistance est d'environ 30% par rapport au béton de référence, mais l'étude de Kou et al (Kou *et al.*, 2011) et Alexandridou et al. ont montré que cette perte peut être plus élevée si le taux de remplacement atteint 100 %.

- La qualité du granulat et la présence d'impuretés peuvent encore réduire la résistance à la compression. Comme suggéré par Medina, si le granulat recyclé contient des « matériaux flottants » tels que le verre ou le bois, l'ITZ entre ces matériaux et la pâte de ciment est moins résistant.

1.5.3 Absorption d'eau et la porosité

Selon plusieurs chercheurs (Rakshvir and Barai, 2006), les granulats recyclés ont une absorption d'eau plus élevée que les granulats naturels, qui doit être compensée lors de la conception du béton. (Gayarre *et al.*, 2013) ont montré que plus la présence de mortier résiduel était importante, plus l'absorption d'eau par les granulats recyclés augmentait (Figure 1.6). Le même effet est observé si les granulats recyclés contiennent des matériaux céramiques et des impuretés comme le gypse (Kou *et al.*, 2011). En règle générale, les granulats naturels ont une absorption d'eau comprise entre 0,5 % et 1,5 %, ce qui est généralement requis pour la plupart des applications de béton (Rakshvir and Barai, 2006). D'autre part, en raison de la forte porosité des GR, l'absorption d'eau des granulats recyclés est comprise entre 3 % et 12 %. Ces substances sont également liées aux valeurs de densité et affectent le comportement du béton à base de GR à l'état frais et durci.

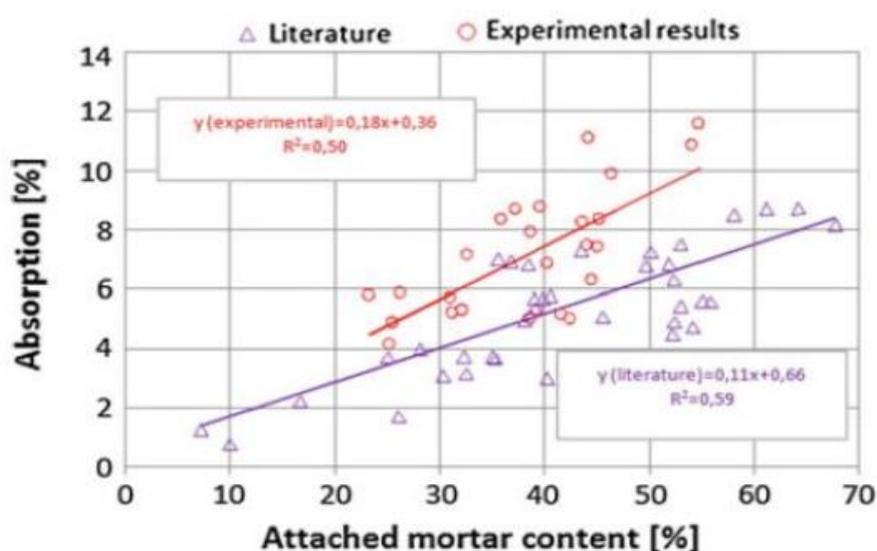


Figure 1. 4 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché(Fiandaca, 2015).

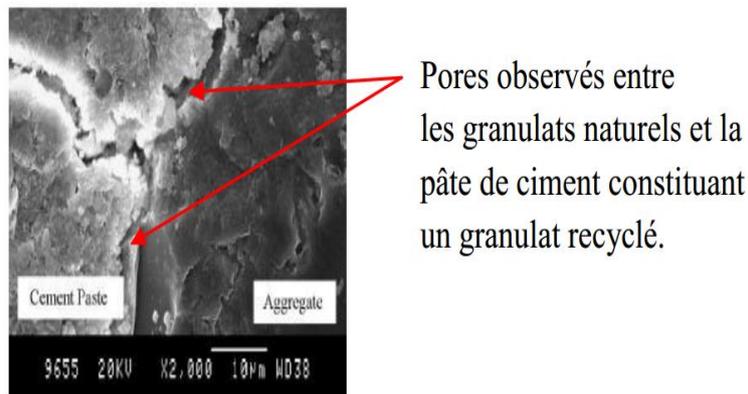


Figure 1. 5 Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton (Tam *et al.*, 2008).

1.6 Obstacles de l'utilisation des granulats recyclés

- Manque de confiance des clients et des sous-traitants.
- Incertitude sur ses bénéfices environnementaux.
- Absence de normes et de spécifications que les producteurs de béton peuvent prendre en compte.
- Mauvaise qualité du produit final en raison du manque de connaissances et d'intérêt des propriétaires d'usines de recyclage.
- La distance entre le bâtiment et le chantier de démolition entraînant des pertes d'énergie.
- Absence d'approvisionnement continu en granulats recyclés de haute qualité pouvant répondre à la demande existante. Pour encourager et faciliter l'utilisation des ressources génétiques, les gouvernements et les agences du monde entier introduisent souvent des taxes et des lois dans le but de surmonter les obstacles, avec plus ou moins de succès. Les directives européennes (LE CONSEIL, 2011) encouragent la réutilisation et le recyclage des déchets. D'ici 2020, les nouvelles structures de construction devraient inclure au moins 5 % de matériaux recyclés.

1.7 Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu détaillé des granulats recyclés. Il révèle d'abord leur définition, leur origine, leur classification et leur évolution. Selon cette étude bibliographique, il a été constaté que les propriétés des granulats recyclés dépendent principalement de la source des granulats, tels que : béton concassé, briques, verre...etc. Par conséquent, les propriétés mécaniques et physiques de ces granulats sont plus complexes que celles des granulats naturels.

De plus, cette étude permet de mettre en évidence la possibilité de réutiliser les déchets de béton sous forme de granulats (fins et grossiers) dans le béton.

CHAPITRE 2

EFFET DU TRAITEMENT DES GRANULATS RECYCLES SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, l'industrie de la construction s'est développée rapidement, en particulier dans les pays en développement, entraînant l'épuisement des ressources naturelles et la génération de grandes quantités de déchets de construction et de démolition. Les Granulats de Béton Recyclés (GR) constituent la majorité des déchets de granulats de béton démolis. La fabrication de béton à base de GR en remplaçant les granulats naturels (GN) a été promue comme un moyen efficace d'utiliser les déchets de construction et de préserver les ressources naturelles. On pense généralement que les mauvaises caractéristiques du GR par rapport au GN, telles qu'une absorption d'eau considérable, une porosité plus élevée et une faible densité, ont un effet négatif sur les propriétés fraîches et durcies des bétons. Par conséquent, la PR a été principalement limitée à des utilisations non structurelles à l'heure actuelle. De plus, la cause principale de ces inconvénients du GR est due à l'adhérence du mortier aux granulats. Ce mortier forme une nouvelle zone de transition d'interface (ITZ) entre lui-même et la nouvelle pâte de ciment, qui devient la région la plus faible du béton avec GR. Par conséquent, les performances du béton de granulats recyclés devraient être améliorées en améliorant les propriétés du GR et/ou de l'ITZ pour faciliter la réutilisation de ces déchets à grande échelle dans le domaine de la construction. Plusieurs chercheurs ont proposé de nombreuses techniques pour tenter d'améliorer les propriétés de la PR. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : (1) Enlèvement d'ancien mortier collé en GR ; (2) Renforcement de l'ancien mortier collé en GR ; (3) Amélioration de la zone de transition entre GR et le nouveau mortier. Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les propriétés des différents bétons à base des granulats recyclés fins et grossiers.

2.2. Traitement mécanique des granulats

Les méthodes qui ont été adoptées pour éliminer l'ancien mortier collé dans les GR, on distingue le broyage mécanique à billes.

Une étude comparative sur les méthodes de traitement de GR rapporte que les processus mécaniques présentés une faible consommation d'énergie par rapport à autres procédés de traitement. La méthode de fraisage à billes est l'un des traitements les plus connues et les plus efficaces en fonction de son impact sur l'environnement ainsi une augmentation de la consommation d'énergie pendant le processus de traitement doit être prise en compte en compte. Ont utilisé la méthode de broyage à billes sur des granulats recyclés (GR) avec une optimisation processus qui est mené pour améliorer GR en éliminant efficacement le contenu d'ancien mortier adhérent dans GR. Diverses combinaisons de rotation du tambour (R) (100-200-300-400-

500) et des billes en acier (S) (0-2-5-710-12) appliqué sur le granulat recyclé lors du procédé du traitement. Les propriétés mécaniques (valeurs de résistance à la compression, à la traction par fendage et à la flexion et module d'élasticité) de bétons dont granulats recyclés bruts et traités sont déterminés. Les résultats des tests ont prouvé que les valeurs d'absorption d'eau des granulats recyclés d'une taille de 4 à 11,2 mm et de 11,2 à 22,4 mm sont passées de 8,80 % à 1,40 % et de 8,95 % à 0,84 %, respectivement, après le processus de traitement. On constate également que la résistance à la compression des bétons est légèrement affectée par l'utilisation de granulats recyclés traités (GRT). De plus, une teneur en GR de 60 % dans le béton peut être recommandée en termes des propriétés mécaniques.

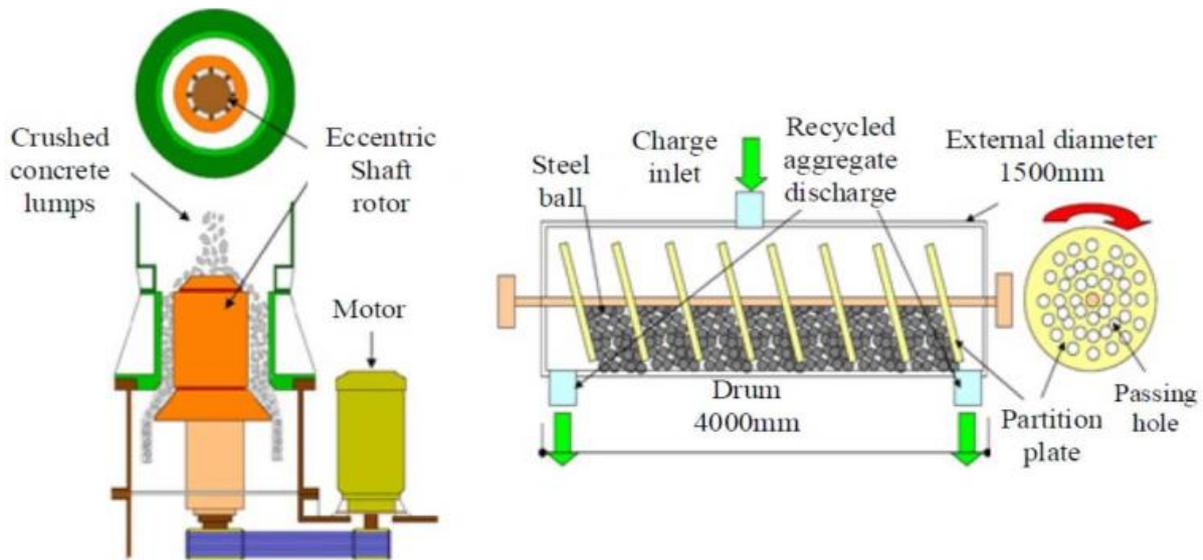


Figure 2.1 Méthode du traitement mécanique

Selon (Dilbas et al., 2019) la méthode de fraisage à billes en est une des méthodes bien connues de traitement par abrasion mécanique s'applique à GR. Cette méthode peut être appliquée seule ou avec d'autres méthodes disponibles. Ils ont trouvé une diminution de l'absorption d'eau et une augmentation de la densité des bétons à base des GR traités figure (2.2)

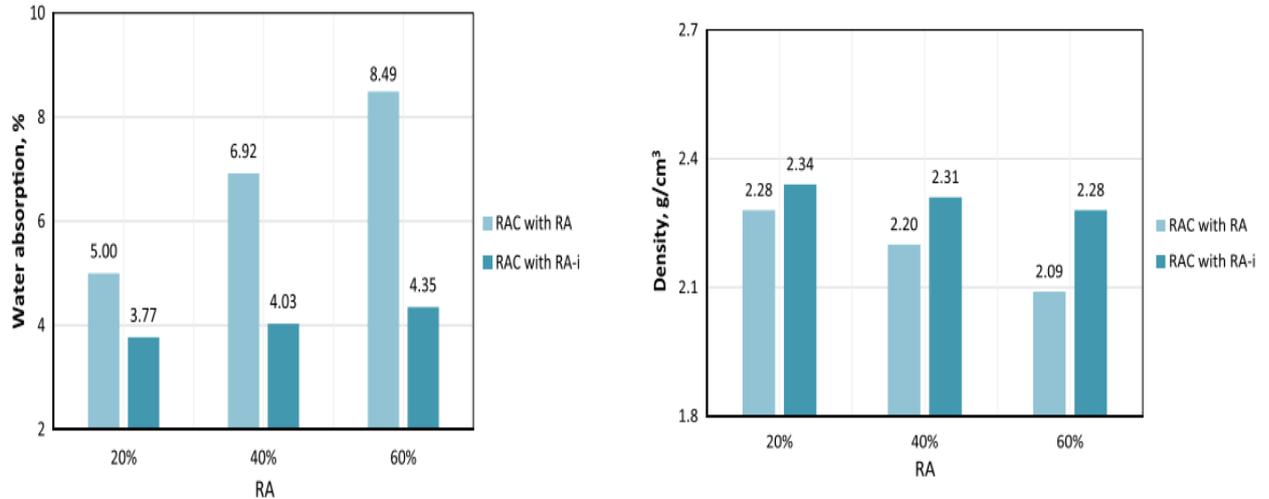


Figure 2. Variation de la densité et de l’absorption d’eau des bétons contiennent des GR traités et non traité (Dilbas et al., 2019).

Ont étudié l’effet des granulats recyclés traités par un broyeur à boulet en ajoutant la fumée de silice sur la durabilité des bétons. Ils ont conclu que le traitement

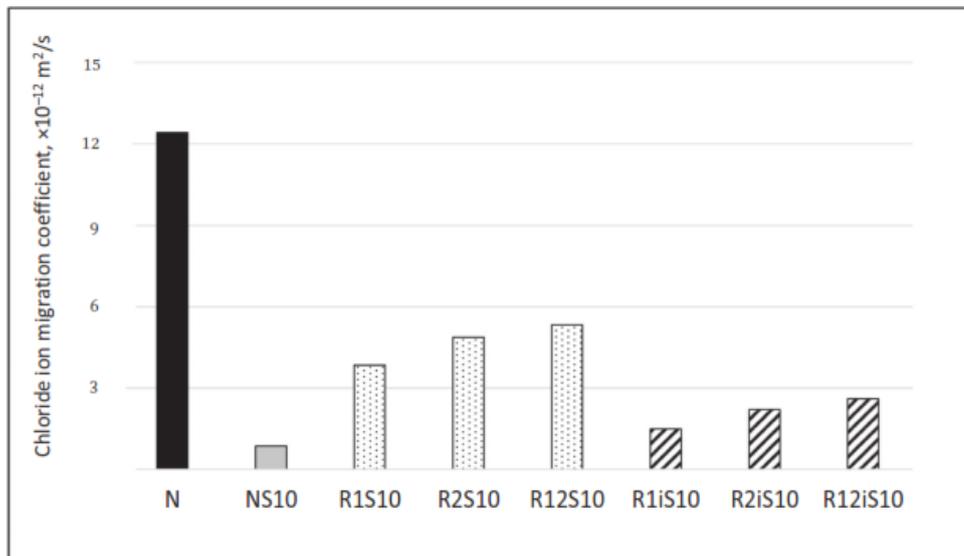


Figure 2.3 mécanique des granulats recyclés à un effet positif sur la résistance à la compression des bétons (Kô et coll ; 2011).

2.3 Traitement chimique

(Kô et coll ; 2011) ont montré que l’immersion des granulats recyclés GR dans la solution de polymère l’alcool polyvinylique (PVA) diminue considérablement l’absorption d’eau de GR et

augmente l'adhérence granulat/pâte. Cependant cette solution provoque une pollution de l'environnement. Kô et coll. ont proposé d'immerger les GR (10 et 20 mm) dans la solution de PVA pendant 24h. Ils ont découvert que le PVA peut remplir les pores des mortiers et sceller la surface apparente de GR. Ceci, provoque une diminution de la porosité et une amélioration de l'adhérence avec la nouvelle pâte de ciment au GR. Le polymère à base de silicium peut remplir les pores du GR et réagir avec le C-S-H pour former un film hydrophobe à la surface du béton.

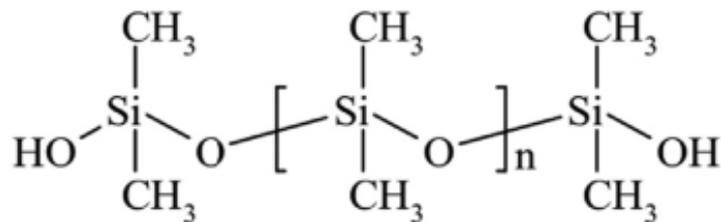


Figure2.3 silicium

(Tuyan, M., et all 2014) ont proposé une nouvelle méthode efficace pour améliorer l'adhérence du mortier sur les granulats de béton recyclé (RCA). Ils ont renforcé la couche de mortier de GR par traitement avec un agent cristallisant (CA). Ils ont conclu que le traitement par CA améliore significativement les performances de GR en augmentant la densité et la teneur en hydrate de silicate de calcium (C-S-H), ce qui améliore les propriétés des nouvelles et anciennes zones de transition interfaciale et les propriétés mécaniques du béton à base de GR. Ces améliorations ont été attribuées à la réaction de CA avec des produits d'hydratation riches en calcium dans la couche de mortier de béton, qui ont formé des C-S-H. Ce dernier a rempli les pores du RCA et bloqué les fissures, ce qui a amélioré la compacité du béton.



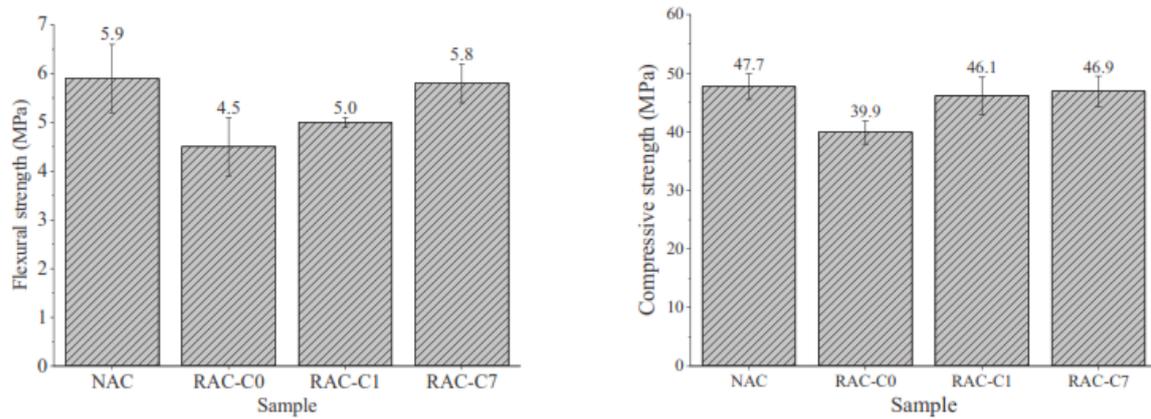


Figure 2.4 Résistance à la compression et à la flexion des bétons à base de GR traités et non traités.

2.4 Carbonatation

Ces dernières années, la technique de durcissement au CO₂ a été développée pour améliorer les propriétés des granulats recyclés (GR) et du béton de granulats recyclés (BGR), des matériaux capables d'absorber le gaz CO₂ et plus durables pour l'industrie de la construction. Plusieurs recherches dans la littérature sur le renforcement au CO₂ des GR est actuellement disponible. (Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. 2002) ont étudié l'effet du granulats de béton recyclé carbonaté (GRC) sur les propriétés et la microstructure du béton. L'absorption d'eau des GRC a été diminué de 30% et leur densité apparente a augmenté de 4,8 % après traitement de carbonatation. La résistance à la compression du béton avec 50 % de GR carbonaté était supérieure de 16,7 % à celle avec du GR non carbonaté à 28 jours. Le traitement de carbonatation a amélioré efficacement la micro-dureté de la zone de transition interfaciale (ITZ). Tout cela est dû à la réduction de la taille des pores et de la porosité dans la matrice et l'ITZ.

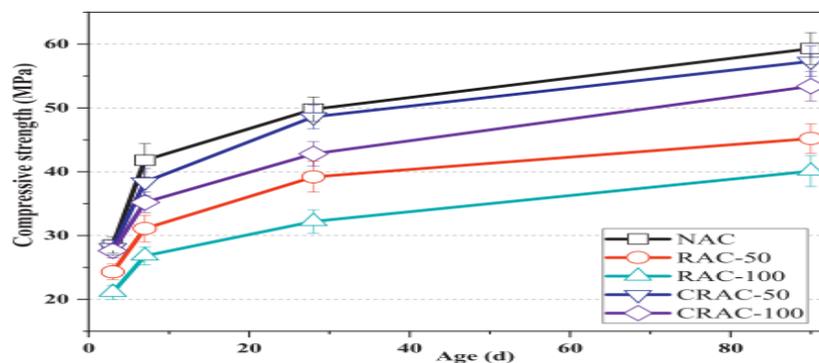


Figure 2.5 Résistance à la compression des bétons à base de granulats recyclés carbonatés et non carbonatés (Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. 2002).

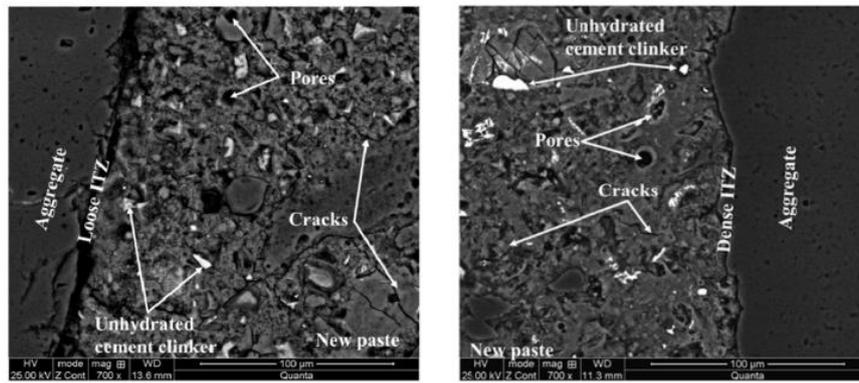


Figure 2.6 observation microstructurale (a) béton avec GR non traité et (b) béton avec GR traité.

2.5 Effet des GR sur le comportement du béton autoplaçants

Effet des GR sur les propriétés des BAP à l'état frais

Dans les études consultées, le test d'étalement (pour évaluer la fluidité et le débit en l'absence d'obstructions), le test V-funnel (pour évaluer la viscosité et la capacité de remplissage) et le test L-box pour obtenir des taux de blocage (pour évaluer la capacité de remplissage dans un milieu confiné) sont le plus couramment utilisés à l'état frais du BAP. Le test de stabilité du tamis (qui évalue la résistance à la ségrégation) et le test d'expansion de l'anneau en J (qui évalue la capacité à traverser un espace confiné similaire à une boîte en L) n'ont pas été trouvés dans la plupart des études car ils sont relativement nouveaux.

Ouvrabilité et vitesse d'écoulement en l'absence d'obstacles

Le test d'étalement de BAP est effectué conformément à la norme EN 12350-8 (EN12350-8, 2009). Les paramètres utilisés pour évaluer la fluidité et la vitesse d'écoulement en l'absence d'obstructions étaient le temps T500 nécessaire au BAP pour former un cercle de 500 mm et le diamètre du frottis (D).

Au fur et à mesure que le GRB est incorporé au BAP, le diamètre D diminue et le T500 augmente (Santos *et al.*, 2019). Cela est principalement dû à l'absorption d'eau plus élevée du GRB par rapport aux granulats naturels. Lors de l'analyse de ces paramètres, les aspects suivants ont été pris en compte : le rapport eau-ciment du mélange, l'effet de la teneur en Sp et l'effet du taux de remplacement des agrégats. (Grdic *et al.*, 2010) ont constaté qu'à mesure que le taux

d'incorporation d'agrégats recyclés dans le BAP augmentait, la réduction de l'étalement augmentait également. Cela était dû à l'absorption plus élevée de GRB.

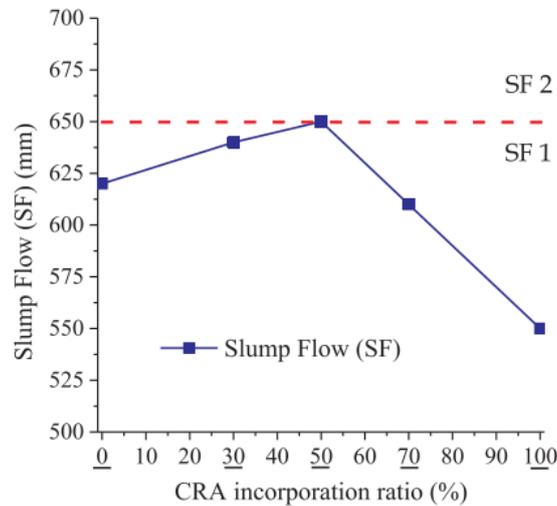


Figure 2.7 Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP (Santos et al., 2019).

2.1.1 Résistance à la compression

L'ajout de GBR au béton entraîne une diminution des propriétés de résistance à la compression. Cela est dû à l'augmentation du rapport E/C due à la forte capacité d'absorption du matériau recyclé et à sa forme plate et angulaire. Les résultats de résistance à la compression de (Kou et Poon, 2009) sont présentés à la Figure 2.8. La résistance à la compression diminue avec le taux de remplacement du GBR. La figure 20 montre une légère diminution à mesure que le taux de remplacement GRB augmente. Ce phénomène varie avec l'âge, ce qui peut être dû à l'activation du ciment non hydraté dans la GBR (Kou and Poon, 2009).

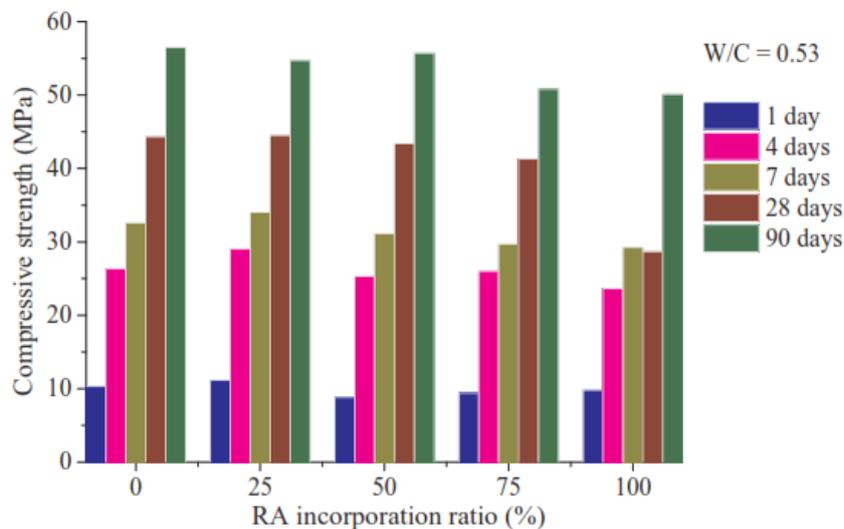


Figure2. 8 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP(Kou and Poon, 2009).

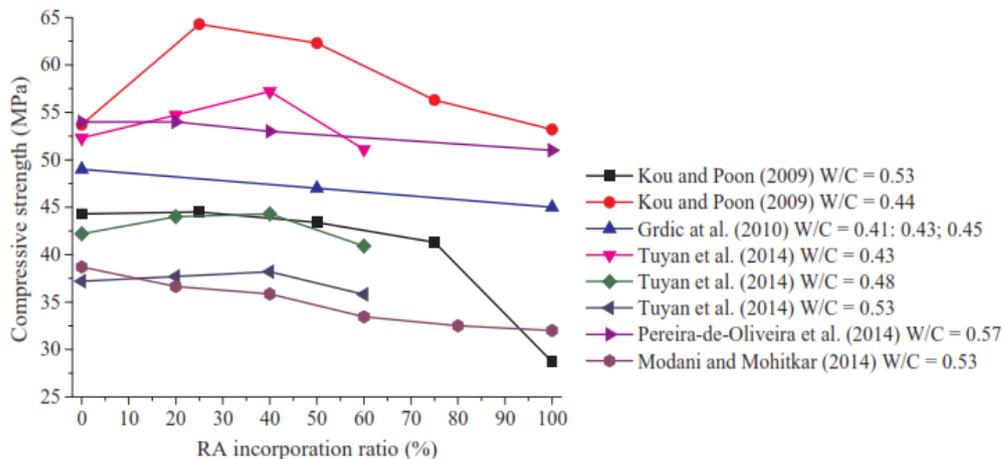


Figure2. 9 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP (travaux de la littérature) (Tuyan et al., 2014) (Kou and Poon, 2009).

Cependant, selon (Kou and Poon, 2009) et (Tuyan *et al.*, 2014), il a été constaté que la résistance à la compression était la plus élevée lorsque le rapport GRB était de 25 % et 40 %. Ceci est justifié par la présence de fumé de silice dans les deux cas.

2.6 Conclusion

Cette étude bibliographique peut clairement confirmer que l'utilisation de GRB dans la production de BAP est fiable. En général, les GRB ne sont pas aussi performants que les GN, principalement en raison de la présence de mortier qui adhère dans les GRB. Par conséquent, il est conclu que c'est l'une des principales raisons du diminue de la qualité du GRB. Par conséquent, les granulats recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une densité plus faible et une résistance mécanique plus faible que les granulats naturels. Plusieurs chercheurs ont proposé de nombreuses techniques pour tenter d'améliorer les propriétés de la PR. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : (1) Enlèvement d'ancien mortier collé en RA ; (2) Renforcement de l'ancien mortier collé en RA ; (3) Amélioration de la zone de transition entre RA et le nouveau mortier RA. Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les propriétés des différents bétons à base des granulats recyclés fins et grossiers.

Dans le chapitre suivant on va adopter le traitement mécanique des granulats recyclés en ajoutant des poudres de verre et de fines recyclés.

Chapitre 3

CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET METHODOLOGIE D'ESSAIS

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

3.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la description des matériaux et protocoles expérimentaux utilisés pour la réalisation du programme expérimental de nos travaux de recherche.

Nous procéderons donc dans cette partie, successivement à la présentation des essais et procédure, à l'identification des matériaux de base utilisés et à la caractérisation des matériaux élaborés. On utilise une gamme de constituants disponibles et très utilisés localement pour confectionner des bétons autoplaçants et des mortiers pouzzolaniques. Les différents constituants utilisés sont :

- CEM I/42.5
- Fillers calcaires UF10
- Granulats (sable d'Oued Souf et gravier de bordj),
- Superplastifiant R 27
- Eau du robinet des réseaux urbains,

3.2 Matériaux de construction de base

3.2.1 Granulats

La norme (NF P18-541) montre que les granulats présentent des caractéristiques, pouvant leur permettre d'être utilisés pour la confection des bétons. Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

3.2.1.1 Analyse granulométrique

Les granulats sont d'origine naturelle concassés calcaires proviennent de la carrière de AIN ABID (est d'Algérie). De cette carrière, nous avons pu et obtenir trois classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes : Sable 0/3, Gravier 3/8, 8/15. L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon. Les résultats de l'essai effectuer pour les granulats utilisés est présenté dans la Figure 3.1.

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

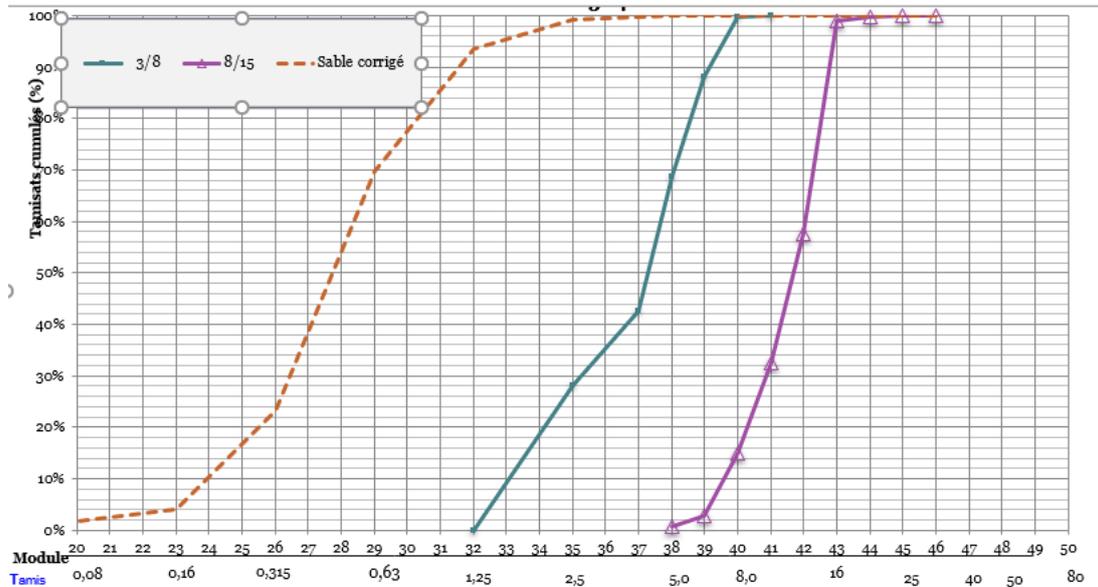


Figure3. 1 Courbe granulométrique des mélanges.

3.2.1.2 Masse volumique absolue et apparente des granulats

La masse volumique est l'une des plus importantes caractéristiques physiques des granulats influençant sur le comportement de béton frais et par conséquent leur performance après durcissement. Différentes masses volumiques peuvent être définies pour les granulats : masses volumiques apparente et absolue (NF EN 1097-3). Le Tableau 3.1 présente différents granulats utilisés.

Tableau3. 1 Valeurs des masses volumiques des granulats utilisés.

	Absolute (kg/m ³)	Apparente (kg/m ³)
Sable	2600	1446,63
Gravier (3/8)	2631,578	1412,3
Gravier (8/16)	2631,578	1364,3

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais



3.2.1.3 Caractéristiques physico-chimiques

L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Le tableau 3.2 montre les valeurs de l'équivalent de sable (NF EN 933-8+A1).

Tableau3. 2 Valeurs de l'équivalent de sable.

	ES/ESV
Sable	88; 86.5

➤ Résistance des granulats

Lors de fabrication de béton, le malaxage est la source de frottement intense entre les grains. Si les granulats ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Les essais effectués sont :

- Résistance au choc ; Los Angeles (NF EN 1097-2): l'essai consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1.6 mm. Produits par la fragmentation du granulat testé et qui est soumis aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine de Los Angeles en 500 rotations.

Tableau3. 3 Caractéristiques mécaniques des gravillons 8/15.

Los Angeles	Gravier
20%	(8/15)

3.2.2 Ciment

Les ciments utilisés sont de type CEM I/ 42,5. Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques fournis par la

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

cimentrie. Les résultats de la composition chimique du clinker du ciments sont représentés dans le tableau 3.4.

Tableau3. 4 Caractéristiques chimiques et physique des ciments utilisés.

Elément	Cao	Sio ₂	Na ₂ O	Mgo	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
CEMI 42.5	61,60	20,40	/	1,73	5,53	/	/	3,54	2,29	3100	/	3600

3.2.3 Additions minérales

Les additions minérales que nous avons utilisées dans notre étude sont caractérisées par une granulométrie inférieure à 80µm. Des fillers calcaires, provenant d'ENG d'El Khroub, noté UF10 dont les principales caractéristiques sont représentées dans le Tableau 3.5. Ainsi une poudre de verre issu du broyage de verre des vitres. Il a été fourni sous forme de pièces de dimension d'environ 5 cm, nettoyant de ses impuretés. Le déchet de verre a été introduit dans un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg et broyé jusqu'à l'obtention d'une poudre.

Tableau3. 5 Composition chimique et physique de fillers calcaire et du metakaolin.

Elément	Cao	Sio ₂	Na ₂ O	Mgo	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Densité absolue (kg/m ³)	Densité apparente (kg/m ³)	La finesse (cm ² /g)
Filler calcaire	55,88	0.01	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01	0,0021	2700	1090	4100

3.2.4 Les adjuvants (super plastifiant)

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau. Ils sont incorporés aux bétons à des doses inférieures ou égales à 5% du poids de ciment. Dans notre étude nous avons utilisé le

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

Superplastifiant de marque Granitex, R 27 (haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C et un long maintien d'ouvrabilité).

3.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente les laboratoires : de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj.

3.2.6 Granulats recyclés

On a récupéré les granulats recyclés des éprouvettes déjà détériorées. Ainsi on a mis ces blocs dans un concasseur. La densité des granulats recyclé est de 2300 kg/m^3



Figure3. 2 Concasseur et granulats recyclé sans traitement.

3.3 Traitement des granulats recyclés

➤ Traitement mécanique

On a mis une quantité des granulats recyclés avec 7 boulets métallique dans le tambour de l'appareil de Los Angles. On a fixé le compteur à 500 tours. L'objectif de ce traitement est d'enlever les mortiers attachés aux granulats naturels voir la figure.



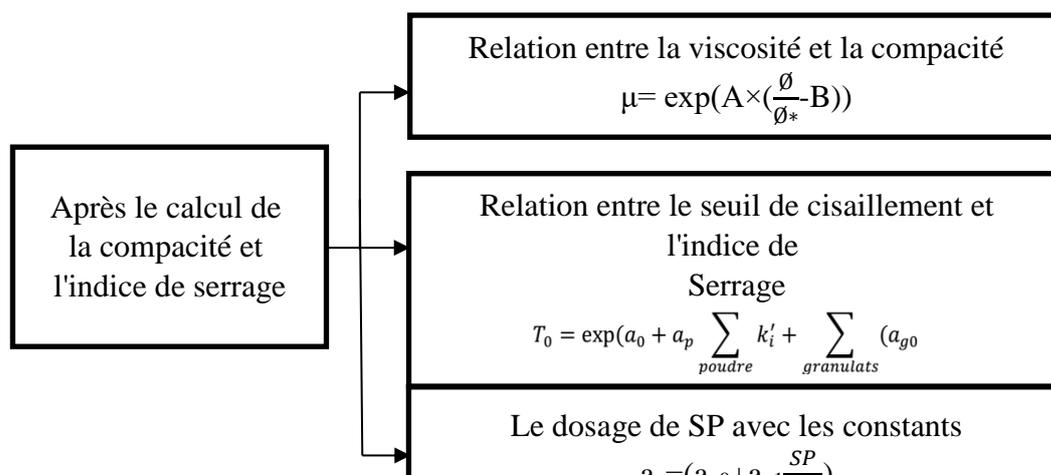
Figure 3. 3 Appareil Los angles et granulats recyclés traités.

3.4 Formulation

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde, (approches japonaise, suédoise, et approche du LCPC...etc.). Dans notre étude nous utiliserons la méthode de LCPC (BETONLAB pro) (De Larrard et Sedran 1999).

3.4.1 Méthode de formulation LCPC (BETONLAB pro)

Cette approche française a été développée dans le laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Sedran et De Larrard (1999) (De Larrard et Sedran 1999) ont utilisé un modèle de «suspension solide». Ce modèle peut prédire la teneur en vide entre les granulats (la compacité) visant à optimiser le squelette granulaire et minimiser la quantité d'eau dans les BAP. Le concept de « viscosité relative » est utilisé pour évaluer l'état de l'empilement granulaire des matériaux constitutifs et à obtenir une optimisation de la distribution des granulats. Cette méthode a permis de réduire les essais sur béton. Toutefois, il faut un certain nombre d'essais préliminaires (la compacité...etc). Dans l'organigramme suivant nous donnons les principales équations utilisées dans cette méthode. La figure 3-7 récapitule les étapes principales de l'approche LCPC.



Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

Figure3.4 Organigramme de formulation betonlab pro (De Larrard et Sedran 1999).

Gâchée n°	1	2	3	4	5	6	7	8
G1 (kg/m3)	542,5	547,4	505,3	505,3	498,6	492,2	490,1	492,6
G2 (kg/m3)	293,2	295,9	338,1	338,1	333,7	329,4	328	329,7
S1 (kg/m3)	333,8	336,9	336,8	336,9	332,4	328,1	326,7	328,4
S2 (kg/m3)	498,8	503,4	503,3	503,4	496,7	490,3	488,2	490,7
C1 (kg/m3)	400	400	400	400	400	400	400	410
FCalc1 (kg/m3)	120	120	120	120	120	120	120	110
SP1 (kg/m3)	20	9,33	9,33	6,67	6,67	6,67	6,67	6,83
Eau (kg/m3)	159,2	166,7	166,7	168,5	178,5	187,4	190,4	187,3
G1 (%)	32,5	32,5	30	30	30	30	30	30
G2 (%)	17,5	17,5	20	20	20	20	20	20
S1 (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
S2 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30
Taux de saturation (%)	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86
Taux de superplastifiant (%)	1,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Eau eff	170	170	170	170	180	189	192	189
Air total (%)	1,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3
AEA	Non							
Rapport G/S	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004
Eff/C	0,425	0,425	0,425	0,425	0,45	0,473	0,48	0,461
Environnement	X0							
C + kA	430	430	430	430	430	430	430	438
Eff / (C + kA)	0,395	0,395	0,395	0,395	0,419	0,44	0,447	0,432
Densité	2,367	2,38	2,38	2,379	2,366	2,354	2,35	2,356
Affaissement (cm)	24,4	23,7	23,6	20,5	23,1	24,6	25	24,7
fc7 (MPa)	41,5	42,6	42,8	42,7	39,1	36,1	35,1	37,6
fc28 (MPa)	46,2	47,2	47,4	47,4	43,8	40,9	39,9	42,3
Retrait total (10-6)	785	754	750	750	807	864	884	852
Indice de serrage du béton non confiné	6,591	6,659	6,679	6,83	6,337	5,949	5,829	5,931

Figure3. 5 Interface de Bétonlab pro.

➤ La composition retenue

Tableau 3.6 présente les proportions de mélange des BAP développés dans cette étude.

Tableau3. 6 Composition de différents mélanges de BAP utilisés.

les quantités (kg/m ³)	Ciment	Filler calcaire	Verre	Fines recyclée	Sable de dune	Sable concassé	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)	GR (3/8)	GR (8/15)	Eau	SP
BAP-FCT	400	120			328	490	329	492			165	6
BAP-FCR	400	120			328	490			329	492	165	6
BAP-VT	400		120		328	490	329	492			165	6
BAP-VR	400		120		328	490			329	492	165	6

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

BAP-RT	400			120	328	490	329	492			165	6
BAP-RR	400			120	328	490			329	492	165	6

Sachant que béton autoplaçant avec filler calcaire (BAP-FCT), béton autoplaçant à base des granulats recyclés avec filler calcaire (BAP-FCR), béton autoplaçant avec poudre de verre (BAP-VN), béton autoplaçant à base des granulats recyclés avec poudre de verre (BAP-VR), béton autoplaçant avec des fines recyclées de béton démolé (BAP-RT) et béton autoplaçant à base de granulats recyclés avec fine recyclé de béton démolé (BAP-RR)..

3.5. Essais de caractérisations des BAP

3.5.1 Caractérisation à l'état frais

Afin de qualifier notre BAP nous avons procédé à l'essai d'étalement.



Figure3.6 Teste de l'étalement des BAP

3.5.2. Caractérisation à l'état durci

Les essais sur béton durci visent à vérifier des propriétés du matériau en place.

3.5.1.1 Essai de compression

Les essais de compression simple sont réalisés à 7, 28 et 90 jours par un écrasement des éprouvettes de bétons cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, sous une presse.

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais



Figure3. 4 Appareil d'essai de la résistance à la compression.

3.5.1.2 La vitesse de l'ultrason

Des mesures de vitesse d'impulsions ont été effectuées selon la norme (NF EN 12504-4) sur des cylindres de section $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^2$. Le principe de la mesure consiste à envoyer une impulsion d'onde dans l'éprouvette et on mesure le temps d'exécution de la propagation à travers ce spécimen. L'impulsion est générée par un émetteur et reçu par un récepteur. Connaissant la longueur du trajet et le temps mesuré (A_t) on peut calculer la vitesse d'impulsion (v).



Figure3. 5 Essai de l'ultrason.

Chapitre 3. Caractérisation des matériaux de base et méthodologie d'essais

3.5.1.3 Absorption

L'absorption d'eau a ensuite été étudiée. C'est un paramètre important lors de l'évaluation et de la prévision de la durabilité des structures en béton. L'objectif de ce test est donc de suivre la masse d'eau absorbée par les bétons dans le temps pour mettre en évidence une éventuelle différence de porosité ouverte de nos mélanges. Ce test a été réalisé à 28 jours selon la procédure décrite dans la norme (EN 1015-18) (1015-18, 2002).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les essais de caractéristique des matériaux de base des différents mélanges. Les constituants sont conformes aux normes et recommandations pour leur utilisation dans les bétons et les mortiers hydrauliques. Ce qui nous facilite l'adoption d'une approche de formulation adéquate. Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges sous différentes sollicitation.

CHAPITRE 4

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre on va étudier différentes propriétés et caractéristiques des bétons autoplaçants à base des granulats recyclés. Pour atteindre cet objectif on a confectionné 6 mélanges tels que : béton autoplaçant avec filler calcaire (BAP-FCT), béton autoplaçant à base des granulats recyclés avec filler calcaire (BAP-FCR), béton autoplaçant avec poudre de verre (BAP-VN), béton autoplaçant à base des granulats recyclés avec poudre de verre (BAP-VR), béton autoplaçant avec des fines recyclées de béton démolé (BAP-RT) et béton autoplaçant à base de granulats recyclés avec fine recyclé de béton démolé (BAP-RR). Ces mélanges ont été soumis différents essais expérimentaux tels que : l'étalement, résistance à la compression, ultrason et la densité...etc.

4.2 Performances à l'état frais

Afin de qualifier notre BAP nous avons procédé à l'essai d'étalement. Les résultats de ce test sont donnés dans le tableau 4.1.

Tableau4. 1 Diamètre de l'étalement des différents mélanges.

BAP-FCT	BAP-FCR	BAP-VN	BAP-VR	BAP-RT	BAP-RR
71	67	69	64	68	63

D'après le tableau 4.1. On conclut que l'introduction des granulats recyclés dans les BAP provoque une légère modification sur le diamètre des différents BAP. Ainsi la présence de la poudre de verre et de la poudre de fine recyclée dans le BAP révèle une légère diminution de l'étalement. Ceci est dû à l'absorption élevée de ces fines.



Figure4. 1 Teste de l'étalement des BAP.

4.3 Performances à l'état durci

4.3.1 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des différents mélanges sont représentés dans la figure 4.2.

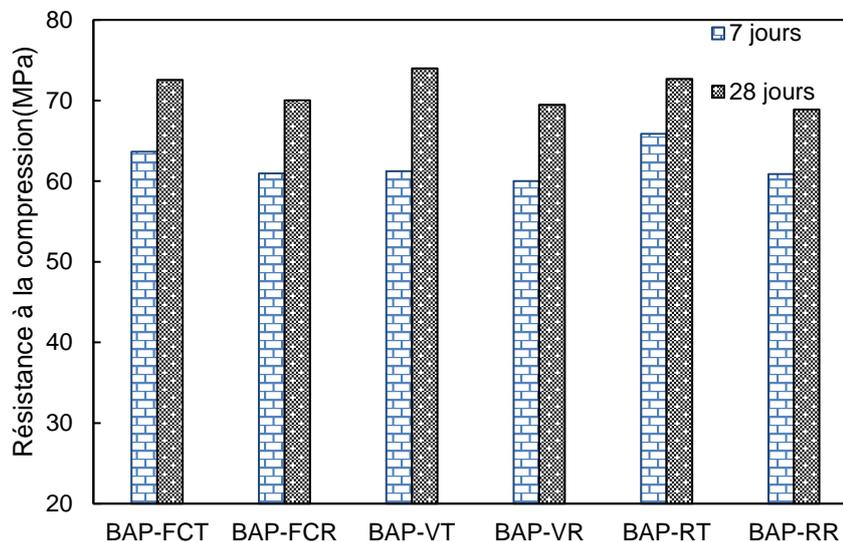


Figure 4. 2 Résistance à la compression de différents mélanges.

A partir de la figure 4.2 on constate que l'introduction des granulats recyclés traités diminue légèrement la résistance à la compression des bétons autoplaçants à 7 et 28 jours que ce soit les fines ajoutées. Ce bon comportement des BAP avec des granulats recyclés est dû au traitement mécanique des GR. Ceci, s'est expliqué par l'efficacité du traitement qui peut enlever le mortier attaché aux GR et améliorer la compacité du mélange.

Pour les BAP avec les fines recyclées (BAP-RT) présente une résistance à la compression plus élevée que les BAP-FCT. Ce qui conduit de pouvoir remplacer fillers calcaires (ressource naturelle) par des fines de béton démolie (déchet recyclés). De plus la possibilité de confectionner un BAP contenant des fines et des granulats recyclés est possible selon la comparaison entre la résistance de BAP-RR et BAP-FCT.

4.3.2 Densité apparente

Les résultats de la densité apparente des différents mélanges sont représentés dans la figure 4.3.

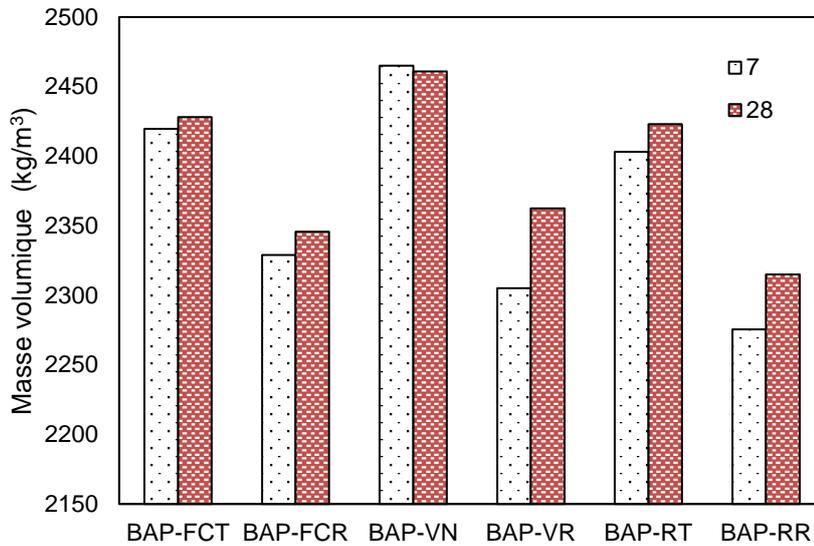


Figure4. 3 Densité sèche de différents mélanges.

A partir de la figure 4.3 on remarque que la présence des GR traités diminue légèrement la masse volumique. Ceci, est dû à la faible densité des granulats recyclés par rapport à celle des granulats naturels. Ainsi, le traitement mécanique des GR transforme leur forme à la sphère augmentant la compacité du mélange. Concernant les BAP-VT présentent une densité plus élevée par rapport au BAP-FCT. Cette augmentation est probablement dû à la réaction pouzzolanique des fines de verres qui améliore la compacité du mélange.

4.3.3 Relation entre la Densité apparente et la résistance à la compression

La figure 4.10 présente la courbe de corrélation établie entre la masse volumique et la résistance à la compression.

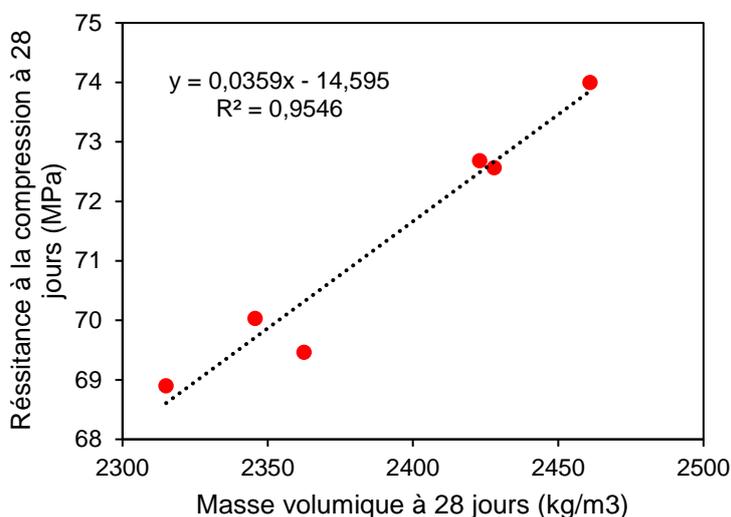


Figure 4.4 Relation entre la densité sèche et la résistance à la compression.

On constate qu'il y a une bonne corrélation (relation linéaire) entre la densité et la résistance à la compression avec un coefficient est égal de $R^2 = 0.95$. De plus, on remarque que la densité apparente s'augmente, la résistance à la compression s'augmente proportionnellement. L'expression proposée est égale $RC = 0.035\rho_s - 14.59$. Cette fonction est utile afin de prédire la résistance à la compression à travers la densité sèche.

4.3.4 Absorption d'eau

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée. Rappelons que l'essai consiste à un séchage des éprouvettes (10 x 10 x 10) cm³ du béton jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à 150°C. Ensuite l'émersion totale des éprouvettes dans un bac à l'eau à 20±2°C durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée de l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. Les figures 4-5 illustrent l'absorption par immersion totale dans l'eau des différents mélanges de BAP.

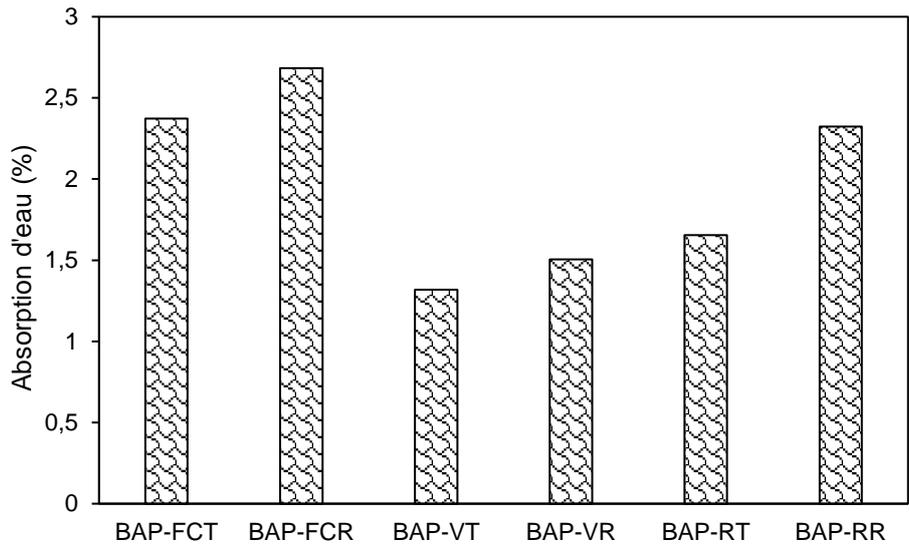


Figure4. 5 Absorption d'eau par immersion totale.

L'absorption d'eau par immersion totale fournit une estimation des pores totaux du matériaux qui peuvent être atteints par l'eau. La plus faible d'absorption a été observée à partir du mélange BAP-VT. Cependant, l'ajout des fines de béton démolli diminue l'absorption d'eau par rapport au béton avec filler calcaire. La présence des granulats recyclés provoque une légère augmentation de l'absorption d'eau. Ceci est dû à l'absorption élevée des GR.

4.3.5 Vitesse ultrason

Le principe de la mesure de la vitesse ultrasonique consiste à envoyer une impulsion d'onde dans le mortier durcis et de mesurer le temps de sa propagation à travers ces matériaux. L'impulsion est générée par un émetteur et reçu par un récepteur. La connaissance de la distance entre les deux sondes et le temps mesuré permet de calculer la vitesse d'impulsion du son (v).

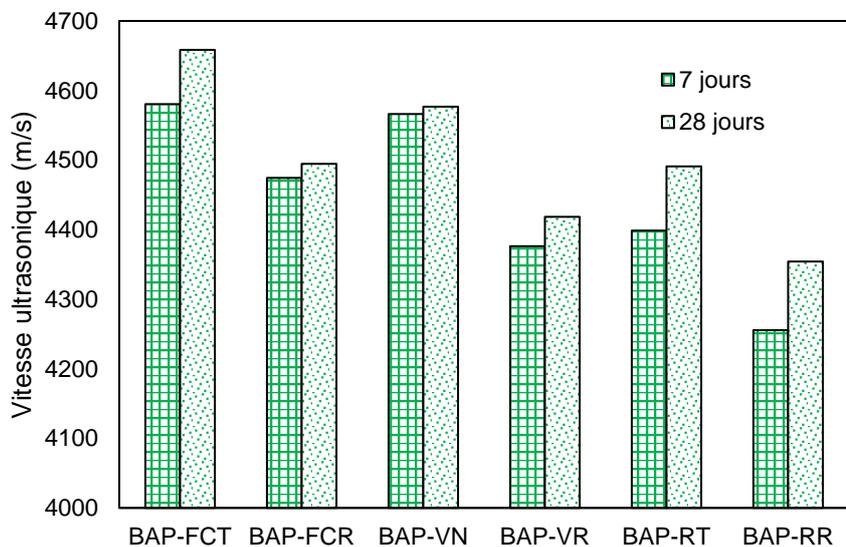


Figure4. 6 Vitesse d’impulsion de différents mélanges.

A partir de la figure 4.6 on constate que la vitesse d’impulsion des BAP avec des granulats recyclés diminue par rapport au BAP avec des granulats naturels. La plus faible vitesse a été trouvée pour les BAP-RR. En générale cet essai donne une explication et une confirmation concernant les performances mécaniques. Cependant le meilleur mélange est le BAP-FCT qui représentent une vitesse de son à 28 jours est égale 4650 m/s.

La figure 4.7 montre une relation linéaire entre la vitesse de l’ultrason et la résistance à la compression.

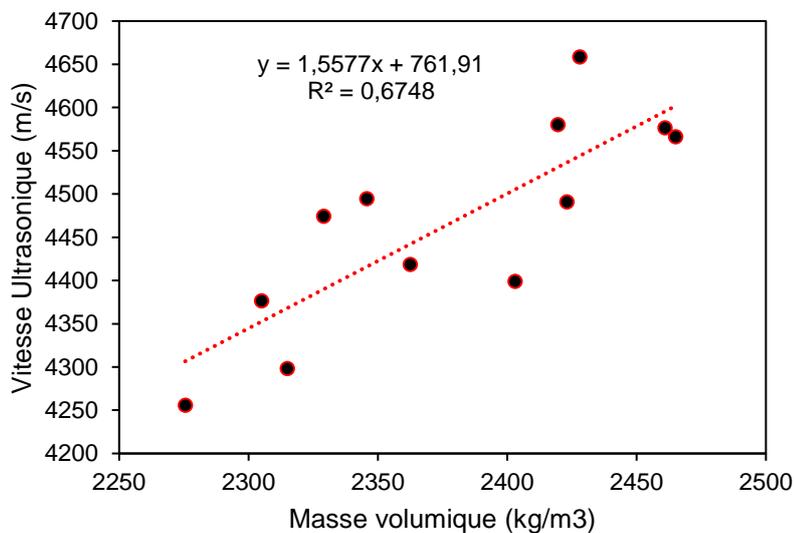


Figure4. 7 Relation entre la vitesse d’impulsion et la résistance à la compression.

On constate qu’il y a une bonne corrélation (relation linéaire) entre la masse volumique et la vitesse ultrasonique avec un coefficient est égal de $R^2 = 0.67$. De plus, on remarque que la vitesse ultrasonique s’augmente, la masse volumique s’augmente proportionnellement. L’expression proposée est égale $VS = 1.55\rho_s + 761.91$.

4.4 Conclusion

L’étude menée dans le présent chapitre vise à contribuer à mieux comprendre le comportement de granulats recyclés traités mécaniquement dans les bétons autoplaçants. On a démontré dans cette étude la possibilité que les BAP avec des granulats recyclés traités présentent des bonnes propriétés physiques et mécanique que les BAP avec granulats naturels. Les conclusions suivantes sont tirées sur la base des résultats des différents tests et d’analyses :

- Le traitement mécanique des GR montre une bonne performance mécanique et physique que les granulats naturels. Ceci, s'est expliqué par l'efficacité du traitement qui peut enlever le mortier attaché aux GR et améliorer la compacité du mélange par conséquent une amélioration de la résistance à la compression.
- Pour les BAP avec les granulats recyclés traités et fine de béton démolé révèlent une légère diminution de la résistance par rapport au BAP-FCR. Ceci, est dû à l'absorption d'eau élevée de ces fines.
- Les BAP avec fine de verre présente une résistance élevée par rapport aux autres BAP grâce à la réaction pouzzolanique de cette poudre.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, l'extraction incontrôlée des granulats naturels utilisés pour produire le béton exerce une pression sur l'environnement et nuit au développement durable de l'industrie de la construction. Dans le même temps, la quantité de matériaux dans la décharge après la démolition de la structure mise au rebut est un problème urgent à résoudre. Ces déchets peuvent et doivent être récupérés/réutilisés dans la production de granulats recyclés à intégrer dans la production de béton. D'autre part, le BAP représente actuellement une technologie de production et de mise en place du béton qui tend à remplacer le béton conventionnel avec divers avantages. Par conséquent, il est nécessaire de démontrer la faisabilité du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés pour produire du BAP.

La propriété la plus pertinente des GR est leur forte absorption d'eau, ce qui signifie que la teneur en eau du mélange peut être efficacement compensée lorsque les méthodes actuelles de conception du béton sont utilisées. La performance de BAP dépendra du taux de remplacement de GN et de la qualité de GR. Pour mieux comprendre l'impact de la GR sur le comportement BAP, nous avons conclu :

- La première partie traite des granulats de béton recyclé (GR) : comment sont-ils produits et quelles sont leurs principales caractéristiques. Les résultats obtenus montrent que les propriétés des granulats recyclés dépendent principalement de la source des granulats, tels que : béton concassé, briques, vert, etc. Par conséquent, les propriétés mécaniques et physiques de tels granulats sont plus complexes que celles des granulats naturels. De plus, cette étude nous permet de mettre en évidence la possibilité de la réutilisation des déchets de béton comme des agrégats (fines et gros) dans les bétons.
- Le deuxième volet qui explique l'effet des GR sur le comportement des bétons autoplaçants. De plus, différentes méthodes ont été proposées pour améliorer les caractéristiques des granulats recyclés.
- Une étude expérimentale est basée sur l'effet des traitements mécanique des granulats recyclés dans le comportement des BAP. On a conclu que le traitement mécanique des GR montre une performance plus élevée que les autres types des granulats. Ceci, s'est expliqué par l'efficacité du traitement qui peut enlever le mortier attaché aux GR et améliorer la compacité du mélange par conséquent une amélioration de la résistance à la compression.

- Pour les BAP avec les granulats recyclés traités et fine de béton démolé révèlent une légère diminution de la résistance par rapport au BAP-FCR. Ceci, est dû à l'absorption d'eau élevée de ces fines.
- Les BAP avec fine de verre présente une résistance élevée par rapport aux autres BAP grâce à la réaction pouzzolanique de cette poudre.

Références

- Ajdukiewicz, A. and Kliszczewicz, A. (2002), "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24 No. 2, pp. 269-79.
- Buck, A.D. (1972), "Recycled concrete".
- Caijun, S., Yake, L., Jiake, Z., Wengui, L., Linlin, C. and Zhaobin, X. (2016), "Performance enhancement of recycled concrete aggregate", *A Review Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 466-72.
- Coelho, A. and de Brito, J. (2013), "Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal–Part I: Energy consumption and CO2 emissions", *Waste management*, Vol. 33 No. 5, pp. 1258-67.
- de Larrard, F. and Colina, H. (2019). *Concrete Recycling: Research and Practice*. CRC Press.
- Dilbas, H., Çakır, Ö. and Atış, C. (2019), "Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method", *Construction and Building materials*, Vol. 212, pp. 716-26.
- DIN, D. (2002). 4226-100. Aggregates for concrete and mortar—part 100: recycled aggregates. Berlin.
- Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M., Serna, P. and Castaño-Tabares, J.O. (2009), "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete", *Construction and Building materials*, Vol. 23 No. 7, pp. 2545-53.
- Eiad-Ua, A., Shirai, T., Kato, T., Orito, K., Watanabe, H., Fuji, M. et al. (2010), "Novel fabrication route for porous ceramics using waste materials by non-firing process", *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 118 No. 1380, pp. 745-48.
- Evangelista, L. and de Brito, J. (2007), "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and concrete composites*, Vol. 29 No. 5, pp. 397-401.
- Fiandaca, T. (2015), "Prétraitement et fonctionnalisation de la surface des granulats recyclés pour la fabrication de bétons".
- Gabr, A. and Cameron, D. (2012), "Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24 No. 6, pp. 754-64.
- Gayarre, F.L., López-Colina, C., Serrano, M. and López-Martínez, A. (2013), "Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW", *Construction and Building materials*, Vol. 40, pp. 1193-99.
- Guedes, M., Evangelista, L., De Brito, J. and Ferro, A.C. (2013), "Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates", *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 19 No. 5, p. 1222.
- Hansen, T.C. (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press.
- Kou, S.-C. and Poon, C.-S. (2010), "Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32 No. 8, pp. 649-54.
- Kou, S.-c., Poon, C.-s. and Agrela, F. (2011), "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33 No. 8, pp. 788-95.
- LE CONSEIL, D.L.U.E. (2011), "RÈGLEMENT (UE) No 333/2011 DU CONSEIL du 31 mars 2011 établissant les critères permettant de déterminer à quel moment certains types de débris métalliques cessent d'être des déchets au sens de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil", *Revue du Droit de l'Union Européenne*, p. 317.
- Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S. and Shah, S.P. (2012), "Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1045-55.

- Meddah, M.S. "Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact". MATEC Web of Conferences 2017, EDP Sciences.
- Montero, A., Tojo, Y., Matsuo, T., Matsuto, T., Yamada, M., Asakura, H. et al. (2010), "Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs", *Journal of hazardous materials*, Vol. 175 No. 1-3, pp. 747-53.
- Neto, R.O., Gastineau, P., Cazacliu, B.G., Le Guen, L., Paranhos, R.S. and Petter, C.O. (2017), "An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms", *Waste management*, Vol. 60, pp. 277-89.
- Nixon, P. (1978), "Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review", *Matériaux et Construction*, Vol. 11 No. 5, p. 371.
- Pacheco-Torgal, F. and Labrincha, J. (2013), "Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability", *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 1136-41.
- Pedro, D., De Brito, J. and Evangelista, L. (2017), "Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement", *Construction and Building Materials*, Vol. 147, pp. 803-14.
- Petavratzi, E. and Wilson, S. (2007), "Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing technologies—Integrated waste management for the production of construction material", *Case Study: Foundry dust in facing bricks*, Smartwaste website [online] http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/Brick_foundry_sand.pdf (accessed 12 April 2008).
- Poon, C.-S. and Chan, D. (2007), "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 50 No. 3, pp. 293-305.
- Poon, C., Kou, S. and Lam, L. (2002), "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks", *Construction and Building Materials*, Vol. 16 No. 5, pp. 281-89.
- Poon, C.S., Shui, Z. and Lam, L. (2004), "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 18 No. 6, pp. 461-68.
- Quattrone, M., Angulo, S.C. and John, V.M. (2014), "Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production", *Resources, conservation and recycling*, Vol. 90, pp. 21-33.
- Rakshvir, M. and Barai, S.V. (2006), "Studies on recycled aggregates-based concrete", *Waste Management & Research*, Vol. 24 No. 3, pp. 225-33.
- Silva, R.V., De Brito, J. and Dhir, R. (2014), "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production", *Construction and Building materials*, Vol. 65, pp. 201-17.
- Sim, J. and Park, C. (2011), "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate", *Waste management*, Vol. 31 No. 11, pp. 2352-60.
- Soumah, D.M.B.S., Mouloukou (2019), "Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l'Algérie".
- Tam, V.W., Gao, X. and Tam, C.M. (2005), "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and concrete research*, Vol. 35 No. 6, pp. 1195-203.
- Tam, V.W., Wang, K. and Tam, C.M. (2008), "Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152 No. 2, pp. 703-14.
- Thomas, C., Sosa, I., Setién, J., Polanco, J.A. and Cimentada, A.I. (2014), "Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete", *Journal of cleaner production*, Vol. 65, pp. 397-405.

- Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A. and Duan, Z. (2018), "Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 188, pp. 720-31.
- Xing, W. and Hendriks, C. (2006), "Decontamination of granular wastes by mining separation techniques", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 14 No. 8, pp. 748-53.
- EN12350-8 (2009), "Testing fresh concrete. Part 8: self-compacting concrete, slump-flow. CEN, European Committee for Standardization Brussels, , 12 p.".
- EN12350-9 (2009), "Testing fresh concrete. Part 9: self-compacting concrete, V-funnel test. CEN, European Committee for Standardization Brussels, 11 p.".
- EN12350-10 (2009), "Testing fresh concrete. Part 10: self-compacting concrete, L-box test, CEN, European Committee for Standardization Brussels., 2 p.".
- EN12350-11 (2009), "Testing fresh concrete. Part 11: self-compacting concrete, Sieve segregation test, CEN, European Committee for Standardization Brussels,12 p.".
- Grdic, Z.J., Toplicic-Curcic, G.A., Despotovic, I.M. and Ristic, N.S. (2010), "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 24 No. 7, pp. 1129-33.
- Kou, S. and Poon, C. (2009), "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31 No. 9, pp. 622-27.
- Manzi, S., Mazzotti, C. and Bigozzi, M. (2013), "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 312-18.
- Modani, P.O. and Mohitkar, V.M. (2014), "Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainable development", *International Journal of Civil & Structural Engineering*, Vol. 4 No. 3, pp. 430-40.
- Nanthagopalan, P. and Santhanam, M. (2011), "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33 No. 3, pp. 353-58.
- Pereira-de-Oliveira, L., Nepomuceno, M., Castro-Gomes, J. and Vila, M.d.F.C. (2014), "Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 51, pp. 113-20.
- Safiuddin, M., Salam, M. and Jumaat, M.Z. (2011), "Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11 No. 4, pp. 1023-41.
- Santos, S., Da Silva, P. and De Brito, J. (2019), "Self-compacting concrete with recycled aggregates—a literature review", *Journal of Building Engineering*, Vol. 22, pp. 349-71.
- Topcu, I.B. and Şengel, S. (2004), "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate", *Cement and concrete research*, Vol. 34 No. 8, pp. 1307-12.
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A. and Ramyar, K. (2014), "Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate", *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 983-91.