

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED EL-BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE Département de GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière: Génie Civil– Spécialité: Matériaux

Valorisation des déchets recyclés dans les bétons autoplaçants contenant des fibres de polypropylènes et métalliques.

Présenté par :

CHIHAI Rania

MOHAMADI Amel

Devant le jury composé de :

M. ACHOUR Yacine	MCA	Président	Université de BBA
Mme. TABET Souad	MAA	Examineur	Université de BBA
M. LOUMACHI Lazhar	MAA	Examineur	Université de BBA
M. BELKADI Ahmed Abderraouf	MCB	Rapporteur	Université de BBA
M. KESSAL Oussama	MCB	Co-Rapporteur	Université de BBA

2019-2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



D'abord nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser ce mémoire.

- *Nous adressons nos sincères remerciements aux:*

*Docteur **BELKADI AHMED ABDERAOUF** et Docteur **KESSEL OUSSAMA**, pour tous les conseils et orientations précieuses.*

*Nous remercions vivement M. **ACHOUR Yacine**, pour avoir présidé le Jury. Aussi M. **LOUMACHI Lazhar** et Mme. **TABAT Souad** les membres de jury de soutenance qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi au Chef département **AMMAR NOUI** et tous les professeurs du département de génie civil*

- *Nous remercions également :*
 - *Nos parents généreux, que dieu les protégés, la famille **CHIH** et la famille **MOHAMADI** et à tous les amis qui étaient avec nous durant notre vie universitaires.*
 - *Un merci Spécial à **BENCHIKH ADEL** et **CHETTOH NOREDDIN** et à tous ceux qui nous ont encouragés de près et de loin.*

Résumé

Le BAP est utilisé dans de nombreux pays pour diverses applications et configurations structurelles. Le développement durable exige des matériaux respectueux de l'environnement.

Les granulats recyclés (GRB) 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 une surface plus rugueuse. Cela a modifié par conséquent la capacité de l'écoulement, la résistance et la déformabilité des BAP...etc.

En générale, l'introduction de fibres (métalliques ou synthétiques) dans les matériaux cimentaires améliorent leurs performances : limitation des propagations des fissures, amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction, à la flexion) et amélioration de la ténacité du béton durci. Les effets couplés des granulats recyclés de béton et des fibres de polypropylène sur l'ouvrabilité du béton autoplaçants ne sont pas quantifiés dans la littérature.

Ainsi, notre synthèse bibliographique se compose de trois parties. La première partie concerne l'étude de l'influence des fibres sur les caractéristiques à court et à long terme du béton autoplaçants. La seconde partie est dédiée à une approfondie sur l'effet des fibres et des granulats recyclés sur les BAP. La troisième partie consiste la modélisation des différents phénomènes des travaux d'antérieurs à l'aide de logiciel JMP.

On a conclu que la diminution de la résistance à la traction due aux ajouts de GRB peut être compensée par l'incorporation de fibre de polypropylène.

Mots clés :

Béton autoplaçants, granulats recyclés, fibres, écologique, résistance, absorption d'eau.

Abstract

SCC is used in many countries for various applications and structural configurations. Sustainable development requires environmentally friendly materials.

The recycled aggregates (GRB) 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 altered the flow capacity, strength and deformability of SCC... etc.

In general, the introduction of fibers (metallic or synthetic) in cementitious materials improves their performance: limitation of crack propagation, improvement of mechanical resistance (tensile strength, flexural strength) and improvement of the toughness of hardened concrete. The coupled effects of recycled concrete aggregates and polypropylene fibers on the workability of self-consolidating concrete are not quantified in the literature.

Thus, our bibliographical summary is made up of three parts. The first part concerns the study of the influence of fibers on the short- and long-term characteristics of SCC. The second part is dedicated to an in-depth look at the effect of recycled fibers and aggregates on SCC. The third part consists of the modeling of the different phenomena of previous work using JMP software.

It was concluded that the decrease in tensile strength due to additions of GRB can be compensated by the incorporation of polypropylene fiber.

Keywords:

Self-compacting concrete, recycled aggregates, fibers, ecological, strength, water absorption.

ملخص

يتم استخدام BAP الخرسانة ذات الضغط الذاتي في العديد من البلدان لمختلف التطبيقات والتكوينات الهيكلية. تتطلب التنمية المستدامة مواد صديقة للبيئة.

الركام المعاد تدويره (GRB) الذي تم الحصول عليه عن طريق تكسير ومعايرة الحصى الخراساني الذي تم جمعه في مواقع الهدم يتكون من الركام الطبيعي الخشن والملاط اللاصق المتبقي. يعطي هذا الأخير خصائص محددة للهيكل الحبيبي مثلا لكثافة المنخفضة، وارتفاع امتصاص الماء، وزاوية وسطح أكثر قسوة. هذا أدى إلى تغيير سعة التدفق والقوة والتشوه لـ ... BAPs إلخ.

بشكل عام، يؤدي إدخال الألياف (المعدنية والاصطناعية) في المواد الإسمنتية إلى تحسين أدائها: الحد من انتشارا لشقوق، وتحسين المقاومة الميكانيكية (قوة الشد، قوة الانثناء) وتحسين صلابة الخرسانة المتصلبة. لم يتم تحديد التأثيرات المزدوجة للركام الخراساني المعاد تدويره وألياف البولي بروبيلين على قابلية تشغيل الخرسانة ذاتية التوحيد في الأدبيات.

وهكذا، يتألف ملخصنا الببليوغرافي من 3 أجزاء. يتعلق الجزء الأول بدراسة تأثيرا لألياف على الخصائص قصيرة وطويلة المدى للخرسانة ذاتية التماسك. الجزء الثاني مخصص لإلقاء نظرة متعمقة على تأثير الألياف المعاد تدويرها والركام على BAP. الجزء الثالث يتكون من نمذجة الظواهر المختلفة للعمل السابق باستخدام برنامج JMP

تم استنتاج أن الانخفاض في مقاومة الشد بسبب إضافات GRB يمكن تعويضه عن طريق دمج ألياف البولي بروبيلين.

الكلمات الدالة:

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

Table des matières

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les granulats recyclés

1	Introduction	5
2	Définition de déchets recyclés	5
	□ La filière de la déconstruction	5
	□ La filière des sous-produits industriels.....	5
3	Historique des granulats recyclés	6
4	Classification de granulats recyclés (filière de la construction)	7
	□ Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.....	7
	□ Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie	7
	□ Agrégats recyclés mixtes.....	7
5	Procédure d'obtention des granulats recyclés issus de la déconstruction des bétons	8
6	Propriétés des granulats recyclés	10
6.1	Masse volumique.....	11
6.2	Absorption d'eau porosité.....	11
6.3	Relation entre la densité et l'absorption des granulats recyclés	12
6.4	Propriétés mécaniques des granulats recyclés	13
7	Obstacles de l'utilisation des granulats recyclés	13
8	Technique d'amélioration des granulats recyclés	14
9	Conclusion	15
10	Référence	15

Chapitre 2 : Effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants

1	Généralité sur les fibres	21
1.1	Introduction	21
1.2	Propriétés des fibres	22
2	Bétons fibrés	22
2.1	Définition.....	22
2.2	Domaines d’application des bétons fibrés.....	23
3	Généralité sur les bétons autoplaçants	23
3.1	Définition.....	23
3.2	Caractéristiques des BAP à l’état frais	23
3.2.1	Essai d’étalement.....	23
3.2.2	Essai de V entonnoir.....	24
3.2.3	Essai de Boîte en L.....	25
3.2.4	Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11) (12350-11, 2010) (12350-11, 2010) (12350-11, 2010).....	25
3.3	Caractéristique des BAP à l’état durci.....	26
4	Influence des fibres sur les bétons autoplaçants	26
4.1	A l’état frai	26
4.2	A l’état durci	27
5	Conclusion	28
6	Référence	28

Chapitre 3 : Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

1	Introduction	33
2	Comportement à l'état frais des BAP fibré à base des GRB	33
2.1	Etalement	33
2.2	V-funnel	34
2.3	Boite en L	34
2.4	Ségrégation	35
2.5	Propriétés rhéologiques	36
3	Effet des fibres sur le comportement des BAP-GRB à l'état durci	37
3.1	Résistance à la compression	37
3.2	Résistance à la traction	38
4	Conclusion	39
5	Référence	39

Chapitre 4 : Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci.

1	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
2	Plan d expérience	Erreur ! Signet non défini.
2.1	Définition	44
2.2	Intérêts des plans d'expériences :	44
2.3	Types de plans d'expériences :	44
2.3.1	Plans factoriels complets :	45
2.3.2	Plans factoriels complets à deux niveaux	45
2.3.3	Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres	45
2.3.4	Plans fractionnaires	45
3	Modélisation des résultats expérimentaux de (Matar and Assaad, 2019)	46
3.1	Modélisation T50 de l'étalement	46
3.1.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées	46
3.1.2	Expression de la prevision	48
3.1.3	surface de réponse	48
3.2	Modélisation de la résistance à la compression	49
3.2.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées	49
3.2.2	Expression de la prévision	51
3.2.3	Surface de réponse	51
4	Conclusion	52
5	Référence	52

Liste des figures

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les granulats recyclés

Figure 1. 1 Schématisation d'un granulats recyclé (Xiao et coll., 2011).	6
Figure 1. 2 Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.	7
Figure 1. 3 Agrégats recyclés mixtes.....	8
Figure 1. 4 Flottation du type « aquamator »	9
Figure 1. 5 Concassage des déchets de démolition.....	9
Figure 1. 6 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché thomas..	11
Figure 1. 7 Interface granulats naturels/pâte de ciment d'un granulats recyclés de béton (Tam et al., 2008].	12
Figure 1. 8 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité.	12
Figure 1. 9 Variation de la densité et de l'absorption d'eau des bétons contiennent des GR traités et non traité.....	15

Chapitre 2 : Effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants

Figure 2. 1 Différents types de fibres.	22
Figure 2. 2 Béton fibré.....	23
Figure 2. 3 Essai d'étalement.	24
Figure 2. 4 V-funnel.	25
Figure 2. 5 Boîte en L.....	25
Figure 2. 6 Essai de stabilité au tamis.	26
Figure 2. 7 Effet de la teneur en fibre sur l'étalement des BAP (a) et sur le v-funnel (b) (A.S. El-Dieb et al 2012).....	27

Chapitre 3 : Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

Figure3. 1 Effet des GBR et des fibres de PP sur T500 des BAP (Matar and Assaad, 2019).	33
Figure3. 2 Effet des fibres de PP et des GRB sur le temps d'écoulement des BAP(Matar and Assaad, 2019).....	34
Figure3. 3 Effet des fibres de PP et des GRB sur le rapport du blocage des BAP(Matar and Assaad, 2019).....	35
Figure3. 4 Effet des fibres de PP et des GRB sur la ségrégation des BAP(Matar and Assaad, 2019). 36	
Figure3. 5 Effet des fibres de PP et des GRB sur les propriétés rhéologiques des BAP(Matar and Assaad, 2019).	37
Figure3. 6 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Matar and Assaad, 2019).	38
Figure3. 7 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la traction des BAP(Matar and Assaad, 2019).	38

Chapitre 4 : Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci.

Figure 4. 1 Effet des GBR et des fibres de PP sur T500 des BAP (Matar and Assaad, 2019).....	46
Figure 4. 2 Relation entre les valeurs du T50 expérimentales et celles de la simulation	46
Figure 4. 3 Surface de réponse entre T50, GR, PP et E/C.....	48
Figure 4. 4 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Matar and Assaad, 2019).....	49
Figure 4. 5 Relation entre les valeurs de la résistance à la compression expérimentales et celles de la simulation.....	49
Figure 4. 6 Surface de réponse entre E/C, F-PP, GRB et RC.....	51

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les granulats recyclés

Tableau 1. 1	Pourcentage des différents déchets (Vachon et coll., 2009).....	6
Tableau 1. 2	Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés [Hansen, 1992].	11

Chapitre 2 : Effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants

Tableau 2. 1	Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9.....	24
--------------	--	----

Chapitre 4 : Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci.

Tableau 4. 1	Résumé de l'ajustement	47
Tableau 4. 2	Testes des effets.....	47
Tableau 4. 3	Analyse de la variance.....	47
Tableau 4. 4	Résumé de l'ajustement.	50
Tableau 4. 5	Testes des effets	50
Tableau 4. 6	Analyse de la variance.....	50

INTRODUCTION GENERALE

Le béton autoplaçant (BAP) est un nouveau béton qui ces, dernières années occupe une importante et considérable place au sein de l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Ceci est dû aux nombreux avantages qu'il présente : un écoulement sous son propre poids et sans aucune vibration ; même dans les milieux à forte densité de ferrailage. Ainsi, le BAP est utilisé dans de nombreux pays pour diverses applications et configurations structurelles.

Toutefois, en ce XXI^e siècle, l'humanité se trouve confrontée à son défi le plus difficile de son histoire : comment conserver la viabilité de la planète pour les générations futures, avec une population approchant les dix milliards d'habitants et une pénurie croissante des ressources non renouvelables ? La plupart des citoyens éclairés défendent aujourd'hui la nécessité de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire. Le béton ne peut échapper à ce changement de paradigme.

Les granulats recyclés (GR) de bétons constituent un matériau de plus en plus sollicité dans le domaine de la construction pour la fabrication de bétons prêts à l'emploi. Cependant, la porosité de ce matériau est nettement supérieure à celle des granulats naturels (GN). De plus, la qualité et la pureté de ce matériau sont fonction du processus de traitement des déchets. Ces deux raisons font qu'il n'est pas envisageable d'employer les GR en l'état actuel, hormis pour des applications non liées en technique routière telles que les fondations et sous-fondations.

De plus, l'introduction de fibres dans ce béton va étendre ses avantages : comme la limitation des propagations des fissures, l'amélioration des résistances mécaniques (résistance à la traction, à la flexion) et l'amélioration de la ténacité du béton durci.

Les effets couplés des granulats recyclés de béton et des fibres sur le comportement des béton autoplaçant à l'état frais et durcis ne sont pas quantifiés dans la littérature.

Ce mémoire a pour but de présenter à un large public un résumé des travaux accomplis.

Le choix a été fait de situer les résultats de l'état de l'art, afin que le lecteur puisse accéder aux connaissances les plus récentes concernant l'art de recycler le béton dans le béton :

- Le chapitre I traite des granulats recyclés de béton (GRB) : comment sont-ils produits, quelles sont leurs caractéristiques principales ;
- Le chapitre II explique l'effet des fibres sur le comportement des béton autoplaçant à l'état frais et durci.
- Le chapitre III fournit des informations sur l'effet des fibres sur le comportement des béton autoplaçants à base des granulats recyclés.

- Le chapitre IV : consiste la modélisation des différents phénomènes d'un travail récent d'un chercheur avec la méthode de plan d'expérience à l'aide de logiciel JMP.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LES GRANULATS RECYCLES

Table des matières

1	<u>Introduction</u>	5
2	<u>Définition de déchets recyclés</u>	5
	□ <u>La filière de la déconstruction</u>	5
	□ <u>La filière des sous-produits industriels</u>	5
3	<u>Historique des granulats recyclés</u>	6
4	<u>Classification de granulats recyclés (filière de la construction)</u>	7
	□ <u>Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton</u>	7
	□ <u>Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie</u>	7
	□ <u>Agrégats recyclés mixtes</u>	7
5	<u>Procédure d'obtention des granulats recyclés issus de la déconstruction des bétons</u>	8
6	<u>Propriétés des granulats recyclés</u>	10
	6.1 <u>Masse volumique</u>	11
	6.2 <u>Absorption d'eau porosité</u>	11
	6.3 <u>Relation entre la densité et l'absorption des granulats recyclés</u>	12
	6.4 <u>Propriétés mécaniques des granulats recyclés</u>	13
7	<u>Obstacles de l'utilisation des granulats recyclés</u>	13
8	<u>Technique d'amélioration des granulats recyclés</u>	14
9	<u>Conclusion</u>	15
10	<u>Référence</u>	15

Liste des figures

Figure 1. 1	<u>Schématisation d'un granulat recyclé (Xiao et coll., 2011)</u>	6
Figure 1. 2	<u>Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton</u>	7
Figure 1. 3	<u>Agrégats recyclés mixtes</u>	8
Figure 1. 4	<u>Flottation du type « aquamator »</u>	9
Figure 1. 5	<u>Concassage des déchets de démolition</u>	9
Figure 1. 6	<u>Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché thomas</u> ..	11
Figure 1. 7	<u>Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton (Tam et al., 2008)</u>	12
Figure 1. 8	<u>Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité</u>	12
Figure 1. 9	<u>Variation de la densité et de l'absorption d'eau des bétons contiennent des GR traités et non traité</u>	15

Liste des tableaux

Tableau 1. 1	<u>Pourcentage des différents déchets (Vachon et coll., 2009)</u>	6
Tableau 1. 2	<u>Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés [Hansen, 1992]</u>	11

• 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).

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets. Le stockage de tels déchets solides dans les dépôts va favoriser la pollution de l'environnement. De plus les données sur les émissions de CO₂ proviennent par la production des granulats naturels fins et grossiers ne sont pas disponible. Par contre le rapport de l'énergie publié en 2010 estime que la production d'une tonne d'agrégats, y compris l'extraction et la transformation, génère en moyenne 8,1 kg de CO₂.

Ainsi, selon les dernières statistiques, les réserves en granulats naturels vont s'épuiser. Il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser les déchets comme des granulats ou des additions dans les matériaux cimentaires.

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

• Définition de déchets recyclés

Dans le secteur des granulats, 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 and 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. Selon le rapport sur la gestion des déchets en Algérie (Soumah, 2019), l'Algérie génère 2550000t/an de déchets industriels. Les stocks de déchets spéciaux en Algérie sont estimés à 2,8 millions de tonnes et la production de déchets spéciaux est estimée quant à elle à 325000t/an.

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

Selon (Pedro *et al.*, 2017) Les granulats recyclés peuvent être définis comme des granulats grossiers et fins, qui sont obtenus par du tamisage et de la séparation de ses constituants de déchets de construction et de démolition. De plus ils sont classés selon la disponibilité et les exigences.

Généralement, les proportions des résidus de construction, de rénovation et de démolition sont regroupées dans le tableau 1.1.

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

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

Concernant les granulats de béton recyclé sont constitués de granulats naturels environ 30% de mortier adhérent (Poon *et al.*, 2004). Ce dernier donne à GR une surface rugueuse avec de nombreux pores et micro-fissures (Tam *et al.*, 2005, Kou and Poon, 2010). Pour ces raisons, GR sont caractérisés par une densité plus faible, une eau plus élevée absorption et une résistance mécanique plus faible que celles de granulats naturels (Guedes *et al.*, 2013) (Silva *et al.*, 2014). Il n'y a pas encore de méthodes pratiques pour séparer les morceaux du mortier résiduel et les granulats naturels dans une usine de recyclage (Xiao *et al.*, 2018).

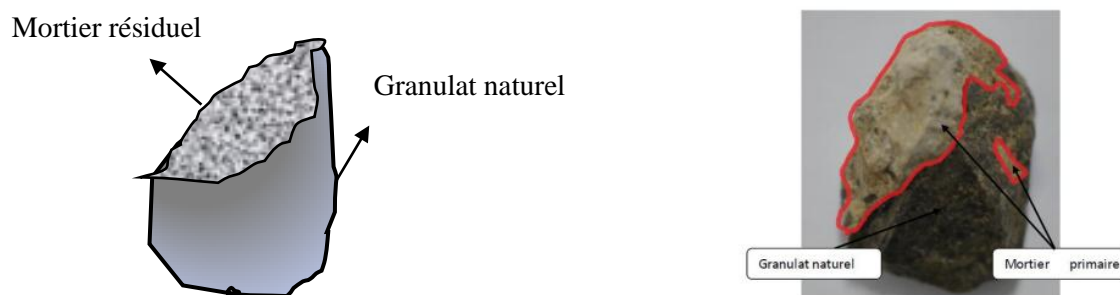


Figure 1. 1 Schématisation d'un granulat recyclé.

• Historique des granulats recyclés

L'utilisation des granulats recyclés issus de la démolition d'anciens bétons dans des nouveaux bétons n'est pas récente. Le premier État de l'Art sur le sujet, publié par la RILEM, remonte à 1978 (Nixon, 1978). La première utilisation du béton concassé remonte à l'Antiquité, elle a été enregistrée pour la première fois en 1960 en Allemagne (Seconde Guerre mondiale).

Durant et après la guerre, les décombres issus des bombardements, surtout aériens, ont été utilisées dans les bétons de la reconstruction des villes (Buck, 1972).

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

Il est devenu populaire aux États-Unis dans les années 1970, alors que les décharges près des zones fortement peuplées ont commencé à refuser d'accepter le béton cassé. Le problème était que le béton restait inactif et prenait trop de place. Ce n'était plus durable, car à mesure que les populations augmentaient, davantage de déchets étaient acheminés vers les décharges. En conséquence, les gens ont commencé à le broyer en agrégats pour une réutilisation comme charge.

Aujourd'hui, dans de nombreux pays, les bétons incorporant des granulats de béton recyclé (GBR) ont dépassé le stade de la recherche et sont devenus une réalité concrète (Poon and Chan, 2007).

- **Classification de granulats recyclés (filière de la construction)**

L'agrégat recyclé des déchets de démolition de la construction doit satisfaire à certaines exigences de taille des particules ainsi que la présence minimale de contaminants (Silva *et al.*, 2014). Parmi les différentes définitions et classifications d'agrégats recyclés, On distingue :

- **Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton**

Les granulats issus du béton démolie doivent comprendre de 90% du ciment et des granulats naturels (DIN, 2002).



Figure 1. 2 Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.

- **Agrégats recyclés dérivés essentiellement de maçonnerie**

Les granulats de maçonnerie recyclé sont des divers minéraux de matériaux de construction résultant de la construction et de la démolition des bâtiments et des ouvrages. Cette famille de matériaux peut comprendre des blocs de béton aérés et légers, de la céramique, des briques, des blocs de laitier de haut fourneau et des briques silico-calcaires. Ce type des granulats contiennent souvent du mortier et de l'argile cuite. Les granulats de maçonnerie recyclé doivent composer d'au moins 90% en masse de tous les matériaux mentionnés au-dessus.

- **Agrégats recyclés mixtes**

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

Ce matériau est composé de béton concassé et de déchet de maçonnerie (céramique, béton léger). Un mélange contient d'au moins 80% d'agrégats naturels et pas plus de 10% d'agrégats recyclés de type II et jusqu'à 20% d'agrégats recyclés de Type I.



Figure 1. 3 Agrégats recyclés mixtes.

Selon (Meddah, 2017) il a ajouté une autre classe qui est les agrégats recyclés **dérivés d'enrobés hydrocarbonés**. Cette catégorie provient du recyclage des chaussées, composées de bitume.

Le recyclage in situ des granulats qui constituent les couches d'assise des routes est très répandu : les granulats retirés de l'ancienne voie sont concassés et triés dans une installation mobile (de concassage et criblage) positionnée sur le chantier routier, avant leur réutilisation immédiate. Le recyclage des matériaux peut atteindre 100 % !

Dans notre mémoire on va s'intéresser aux granulats recyclés issus de la déconstruction des bétons des bâtiments et des ouvrages d'art. Parce que ce type de granulats recyclés est cependant les plus abondante en raison de la disponibilité de sa source et démolition continue de vieux bâtiments(Meddah, 2017).

- **Procédure d'obtention des granulats recyclés issus de la déconstruction des bétons**

En revanche, le recyclage du béton (qui, rappelons-le, est constitué pour l'essentiel de granulats) s'avère parfois plus complexe (Gabr and Cameron, 2012).

- Les ouvrages d'art sont faciles à recycler (car constitués de béton pur)
- Mais dans un bâtiment, le béton « cohabite » avec d'autres matériaux tels que le verre et l'aluminium (fenêtres), le bois, le plâtre, le plastique, la brique, etc.

Le recyclage du béton suppose alors un tri préalable lors de la démolition du bâtiment. Pour obtenir des granulats recyclés propres à un nouvel usage, les matériaux de déconstruction sont traités suivant plusieurs étapes :

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

- Sélection complémentaire des composants présents dans les matériaux bruts (à l'aide d'un aimant pour séparer les ferrailles, par flottation pour le bois, ou par tri visuel pour les résidus de plâtre)



Figure 1. 4 Flottation du type « aquamator »

- Préparation avant traitement : réduction des plus gros éléments à l'aide d'un brise-roche hydraulique, coupe des éléments longs à l'aide d'une cisaille, extraction des impuretés les plus grosses
- Concassage et criblage.

Ces opérations de recyclage se déroulent : soit sur une plate-forme de recyclage ; Celle-ci est située à proximité du point de démolition, donc en général en périphérie d'un grand centre urbain figure 1.5. Soit sur le chantier de démolition lui-même.



Figure 1. 5 Concassage des déchets de démolition.

Par contre, la littérature propose aussi des procédés beaucoup plus complexes, faisant appel à des opérations complémentaires pour améliorer l'efficacité du tri :

- tri aéraulique des contaminants tel le papier, le plastique, le bois (Coelho and de Brito, 2013);
- tamis rotatifs (trommels) pour les gros blocs et autres contaminants de grande taille (Montero *et al.*, 2010);
- systèmes à courant de Foucault pour les métaux non ferreux (Xing and Hendriks, 2006);

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

- installations de lavage, avec traitement des boues (Petavratzi and Wilson, 2007) ;
- spirales pour séparer les éléments lourds dans les sables (Coelho and de Brito, 2013);
- tri par capteurs (Neto *et al.*, 2017);
- systèmes pour séparer le mortier des GBR (Eiad-Ua *et al.*, 2010);

Le choix des différents traitements automatiques repose sur la masse de déchets à trier et sur leur composition, mais aussi sur les objectifs technico-économiques du producteur. En France, le SRBTP (Syndicat de Recycleurs du Bâtiment et des Travaux Publics)(de Larrard and Colina, 2019) suggère de ne pas opposer tri simple ou manuel et tri automatique, souvent complémentaires sur une plateforme de recyclage.

• Propriétés des granulats recyclés

Les propriétés des granulats utilisés pour fabriquer du béton sont connues pour avoir un effet significatif sur les performances du béton. Les agrégats recyclés sont disponibles en grande variété en fonction des industries locales et des matériaux utilisés(Meddah, 2017). On a vu ça dans les paragraphes précédents. Les granulats recyclés (GR) sont très hétérogènes et poreux pouvant contenir des impuretés(Pedro *et al.*, 2017). L'hétérogénéité affecte les caractéristiques des GR qui nuisent à la qualité du béton réalisé avec eux. Les caractéristiques susmentionnées peuvent entraîner une réduction de la quantité d'eau efficace et créer une zone de transition interfaciale (ZTI) plus faible entre le granulats recyclé et la pâte de ciment (Li *et al.*, 2012).

Selon des études de (Evangelista and de Brito, 2007)ont confirmé que les granulats recyclés possèdent : une densité plus faible, un coefficient d'absorption plus élevé et une résistance à l'abrasion faible comparativement aux propriétés observées pour les granulats naturels. Le Tableau 6 présente quelques exemples de valeurs représentatives des caractéristiques des granulats recyclés comparativement à celles de leurs granulats originels.

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

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

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

*Les recyclés 1 et 2 sont issus de deux bétons d'origines différentes

Tableau 1. 2 Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés (Hansen, 1992).

Masse volumique

La densité des granulats recyclés (GR) est plus faible que celle des granulats naturels (GN) en raison de la présence du mortier collé, des matières céramiques et d'autres impuretés, tel que le gypse (Sim and Park, 2011).

La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³).

Absorption d'eau porosité

Selon plusieurs chercheurs (Rakshvir and Barai, 2006) l'absorption d'eau des agrégats recyclés est supérieure aux agrégats naturels, et cela doit être compensé pendant la conception des bétons. (Gayarre *et al.*, 2013) ont montré que la présence plus importante du mortier résiduel provoque une augmentation du taux d'absorption d'eau des GR (figure 1.6). Le même effet est constaté si les GR contiennent des matériaux céramiques et des impuretés, tel que le gypse (Kou *et al.*, 2011)

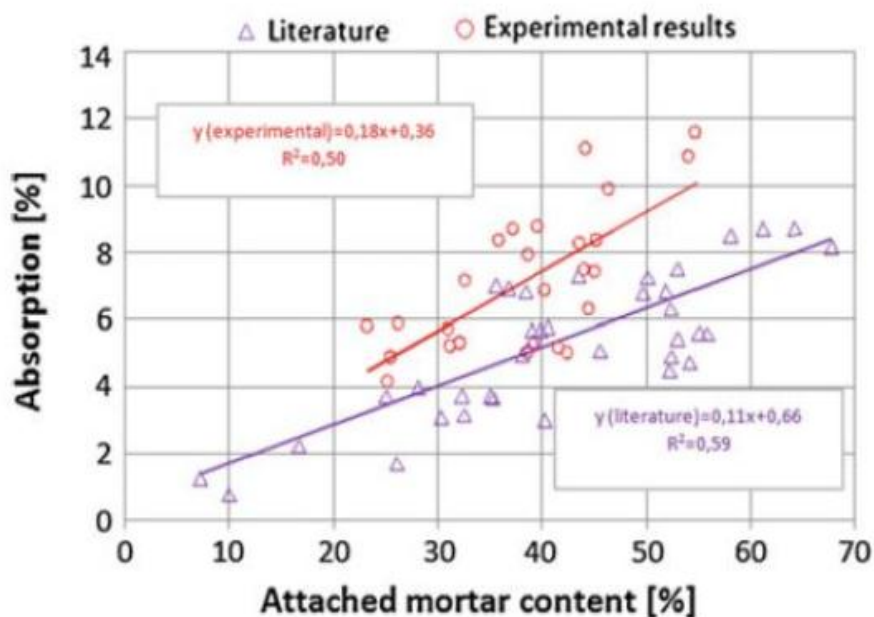


Figure 1. 6 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché (Fiandaca, 2015).

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

Généralement, les granulats naturels ont des valeurs d'absorption d'eau comprises entre 0,5% et 1,5%, ce qui est normalement exigé pour la plupart des applications concrètes (Rakshvir and Barai, 2006). Par contre les valeurs d'absorption d'eau des granulats recyclés sont comprises entre 3 et 12% en raison de de la porosité élevée des GR. Ces substances sont également liées aux valeurs de la densité et affectent le comportement du béton à base de GR à l'état frais et durci.

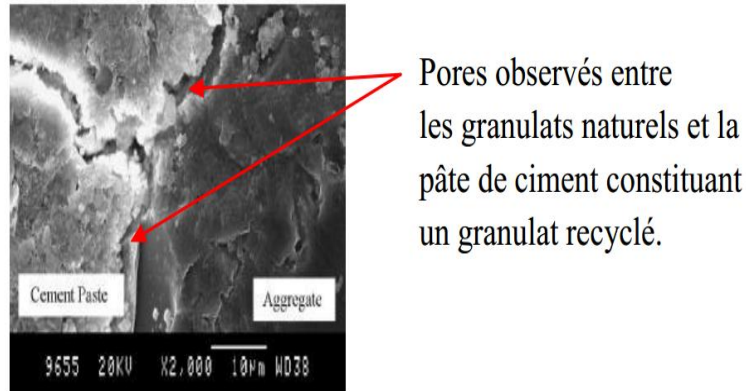


Figure 1. 7 Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton (Tam *et al.*, 2008).

Relation entre la densité et l'absorption des granulats recyclés

Selon (Silva *et al.*, 2014) ont présenté la relation entre les valeurs de la densité et de l'absorption de 589 différents types d'agrégats (tailles, origines), provenant de 116 publications sur une période de 18 ans (de 1996 à 2013). Ces publications ont été sélectionnée d'après 20 pays de 4 continents.

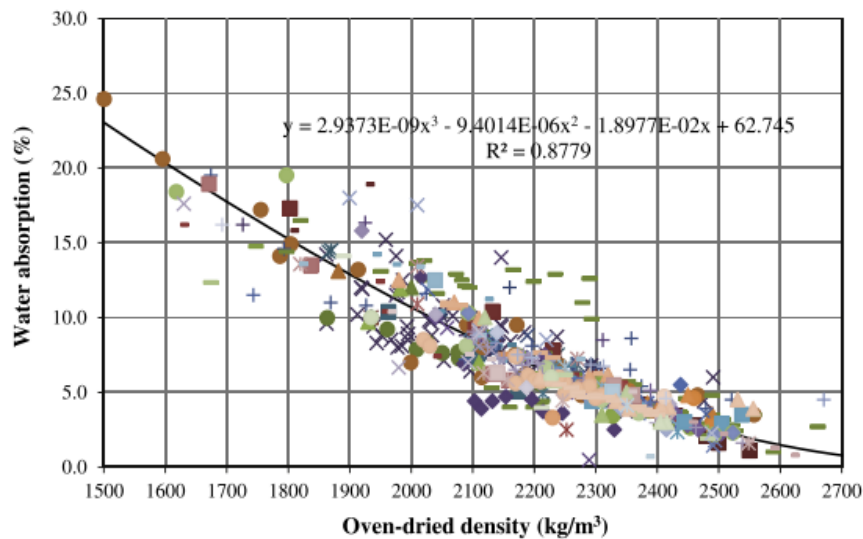


Figure 1. 8 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité (Silva *et al.*, 2014).

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

Une bonne corrélation entre les deux caractéristiques a été trouvée, quels que soient le type, la taille et l'origine des granulats, à condition que la densité des aggrégats se situe entre 1500 kg / m³ et 2900 kg / m³. Par conséquent, à la lumière de ces résultats, la courbe polynomiale présentée sur la figure 1.8 peut être considérée comme un modèle général de prévision de la nature de l'agrégat.

Propriétés mécaniques des granulats recyclés

Les propriétés mécaniques des matériaux de bases ont un impact significatif sur les performances mécaniques du béton fabriqué avec les GR (Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002). En cas général les exigences mécaniques spécifiées dans les normes des différents pays selon le type de GR se résument principalement à l'essai Los Angeles. La valeur d'abrasion des granulats correspond au pourcentage de perte de poids résultant de l'abrasion. Ainsi, une valeur élevée de l'abrasion indique une faible résistance à l'abrasion. En général, les GR ont un coefficient d'abrasion plus élevée que les GN, c'est la teneur en mortier qui explique cette différence (Domingo-Cabo *et al.*, 2009). Parce que la quantité de mortier attaché aux GN est liée à l'augmentation de l'abrasion Los Angeles. Ce qui s'explique par le fait que le mortier attaché se détache facilement à cause de l'ITZ existant entre le GN et ce dernier. De plus la qualité du béton concassé a aussi un impact important sur la valeur de LA, alors que la proportionnalité entre la résistance du béton d'origine et la teneur en mortier des grains de GBR n'est pas évidente ou avérée (Thomas *et al.*, 2014).

• Obstacles de l'utilisation des granulats recyclés

- Manque de confiance des clients et des sous-traitants.
- Incertitude quant à ses avantages environnementaux.
- Manque des normes et des spécifications que les producteurs de béton peuvent prendre en considération.
- Mauvaise qualité du produit final, à cause de manque des connaissances et de l'intérêt des propriétaires d'usines de recyclage.
- Distance entre chantiers de construction et de démolition qui provoque une perte d'énergie.
- Absence d'un approvisionnement constant en granulats recyclés de bonne qualité qui peut satisfaire la demande existante.

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

Espérant encourager et promouvoir l'utilisation des GR le gouvernement et les agences du monde entier ont souvent introduit des prélèvements et des lois pour tenter de surmonter les obstacles, avec des degrés divers de succès.

La directive de l'Union européenne n ° 2008/98 / CE (LE CONSEIL, 2011) encourage la réutilisation et le recyclage des déchets. Il est prévu que d'ici 2020, les nouvelles structures de construction comprendront au moins 5% de matériaux recyclés. Il s'agit notamment du papier, du métal, du plastique et du verre, ou autres origines dont le flux de déchets est non dangereux.

- **Technique d'amélioration des granulats recyclés**

La plupart des chercheurs ont montré que l'influence des GR sur les propriétés de l'ouvrabilité et de la mécanique des bétons est défavorable (Dilbas *et al.*, 2019).

Par conséquent, la plupart des recherches axées sur l'amélioration de ces propriétés des GR pour rendre leur utilisation possible dans la production de béton (Caijun *et al.*, 2016). Le broyage mécanique et les méthodes de traitement à l'acide sont utilisés pour éliminer le mortier résiduel attaché. L'élimination de ce mortier et le processus efficace d'améliorer les propriétés des GR. Cependant, lorsque ces traitements ont pris en compte, la consommation d'énergie et leurs effets sont néfastes sur l'environnement (Quattrone *et al.*, 2014). À cet égard, la méthode de traitement mécanique est la plus utilisée, car elle est plus respectueuse de l'environnement. Parmi ce type de traitement on trouve l'abrasion mécanique (Quattrone *et al.*, 2014). La méthode de fraisage à billes en est une des méthodes bien connues de traitement par abrasion mécanique s'applique à RA. Cette méthode peut être appliquée seule ou avec d'autres méthodes disponibles. Une étude de top et al on fait ce traitement sur les GR. Ils ont trouvé une diminution de l'absorption d'eau et une augmentation de la densité des bétons à base des GR traités figure (1.9)

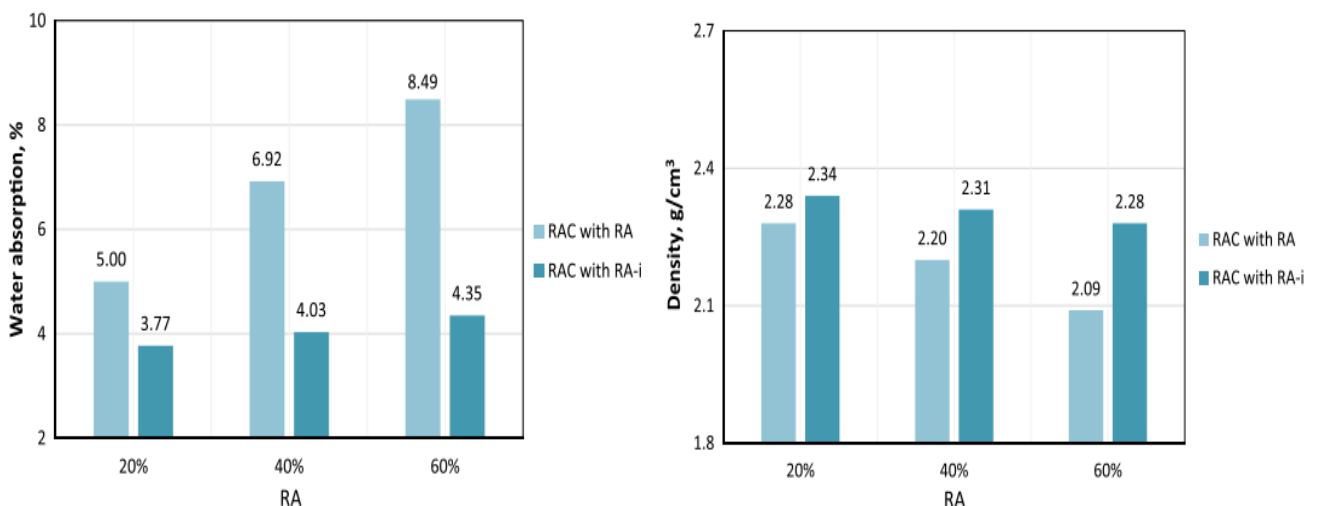


Figure 1. 9 Variation de la densité et de l'absorption d'eau des bétons contiennent des GR traités et non traité(Dilbas et al., 2019).

• Conclusion

Ce chapitre présente un aperçu détaillé sur les granulats recyclés. Elle expose d'abord leur définition, leurs sources, leurs classifications ainsi que leur développement.

D'après cette recherche bibliographique, on a trouvé que les propriétés de granulats recyclés dépendent essentiellement à l'origine de l'agrégat tel que : béton concassé, brique, verts...etc. Ainsi, les propriétés mécaniques et physiques de ce type de granulats sont plus complexes que celles des granulats naturels.

De plus, cette étude nous a permis de mettre en évidence la possibilité de la réutilisation des déchets de béton comme des agrégats (fines et gros) dans les bétons.

• Référence

- 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 Atiş, 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.

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

- 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.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".

Chapitre 1.Etat de l'art sur les granulats recyclés

- 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.

CHAPITRE 2

EFFET DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Table des matières

1	Généralité sur les fibres	21
1.1	Introduction	21
1.2	Propriétés des fibres	22
2	Bétons fibrés	22
2.1	Définition.....	22
2.2	Domaines d’application des bétons fibrés.....	23
3	Généralité sur les bétons autoplaçants	23
3.1	Définition.....	23
3.2	Caractéristiques des BAP à l’état frais	23
3.2.1	Essai d’étalement.....	23
3.2.2	Essai de V entonnoir.....	24
3.2.3	Essai de Boîte en L.....	25
3.2.4	Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11) (12350-11, 2010) (12350-11, 2010) (12350-11, 2010).....	25
3.3	Caractéristique des BAP à l’état durci.....	26
4	Influence des fibres sur les bétons autoplaçants	26
4.1	A l’état frai	26
4.2	A l’état durci	27
5	Conclusion	28
6	Référence	28

Liste des Figures

Figure 2. 1 Différents types de fibres.	22
Figure 2. 2 Béton fibré.....	23
Figure 2. 3 Essai d'étalement.	24
Figure 2. 4 V-funnel.	25
Figure 2. 5 Boite en L.....	25
Figure 2. 6 Essai de stabilité au tamis.	26
Figure 2. 7 Effet de la teneur en fibre sur l'étalement des BAP (a) et sur le v-funnel (b) (A.S. El-Dieb et al 2012).....	27

Liste des tableaux

Tableau 2. 1 Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9.	24
---	----

Généralité sur les fibres

1.1 Introduction

Les fibres dans les matrices cimentaire sont actuellement largement utilisées grâce à sa bonne efficacité. Les composites à matrice cimentaire renforcés de fibres ont gagné un certain intérêt au cours de la dernière décennie. De nombreux travaux ont démontré que ce nouveau matériau contribue de manière avantageuse pour réduire le retrait, pour augmenter la ductilité des bétons...etc. Toute une variété des fibres a été utilisée conduisant des résultats bénéfiques, comme l'acier, le verre, les fibres synthétiques (polypropylène, polyéthylène, polyvinyle et carbone) et des fibres naturelles (sisal, lin, cellulose, etc.... Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres en termes de dimensions (diamètre, longueur...), de formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), de résistance à la traction et d'adhérence au béton.

Il existe sur le marché diverses catégories de fibres pouvant être incorporées dans le béton. Ces fibres sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques (Hadjoudja, 2014):

- **Synthétique** : acrylique, aramide, carbone, nylon, polyester, polyéthylène et polypropylène ;
- **Métallique** : inoxydable, galvanisé, fil étiré à froid, tôle découpée et extrusion de matière fondue ;
- **Verre** : sodocalcique, borosilicaté ;
- **Naturelle** : bagasse, noix de coco, jute, maguey, banane, chanvre, palmier et bambou.

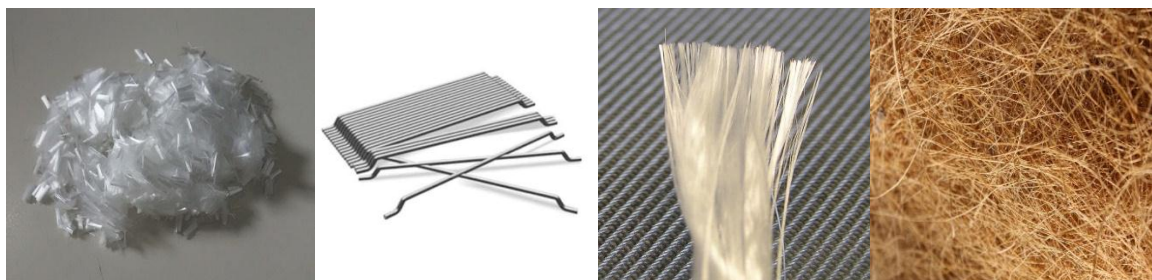


Figure 2.1 Différents types de fibres.

1.2 Propriétés des fibres

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces mince ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation de structure.....), de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés, adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leurs prix.

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

- Être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;
- Se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent :

- Être déformables sans être fragiles ;
- Être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique ;
- Offrir une bonne capacité de déformation ;
- Posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire ;
- Présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment.

En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier.

2 Bétons fibrés

2.1 Définition

Le béton fibré est un matériau composé de fibres. Lors de la formulation de ce béton, des fibres sont ajoutées aux divers matériaux qui le composent. Pour obtenir un béton fibré à la hauteur des performances recherchées, vous devez obtenir un mélange dans lequel les fibres sont réparties de manière homogène. L'utilisation des fibres peut

remplacer certaine armature, ce qui facilite l'application de ce type de béton dans divers domaines de génie civil.



Figure 2. 2 Béton fibré.

2.2 Domaines d'application des bétons fibrés

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil (Ferrara *et al.*, 2012):

- Béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.);
- Béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.);
- Béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.);
- Mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement. Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées.

Dans les paragraphes suivants on parlera du rôle des différentes fibres dans les bétons en générale et dans les BAP en particulier.

3 Généralité sur les bétons autoplaçants

3.1 Définition

Le béton autoplaçant (BAP) est un nouveau béton qui intéresse beaucoup l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Ceci est dû aux nombreux avantages qu'il présente : un écoulement sous son propre poids et sans aucune vibration même dans les milieux à forte densité de ferrailage. Ainsi, le BAP est utilisé dans de nombreux pays pour diverses applications et configurations structurelles. Dans les paragraphes suivants on décrira les principales caractéristiques de ce type de béton à l'état frais, à l'état durci.

3.2 Caractéristiques des BAP à l'état frais

3.2.1 Essai d'étalement

On considère l'essai de l'étalement comme un test de base pour contrôler la qualité des BAP. Il est largement utilisé, car il est facile à mettre en œuvre. L'objectif de cet essai est

Chapitre 2Effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants

d'évaluer la capacité de déformation des bétons sous leur propre poids. Si le diamètre est grand, le béton est fluide tout en gardant sa stabilisation (aucune ségrégation). Selon (Domone, 2007) a trouvé que 90% des BAP effectués présentaient un étalement d'un diamètre e 600 à 750 mm environ.

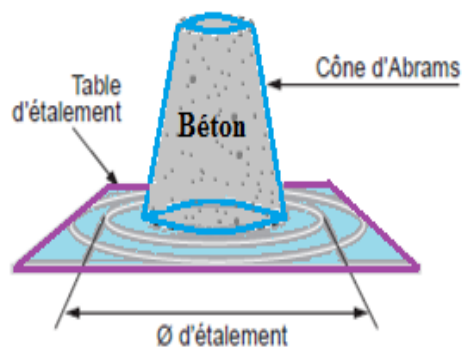


Figure 2. 3 Essai d'étalement.

3.2.2 Essai de V entonnoir

L'essai de V-entonnoir est effectué en mesurant le temps que met le béton à s'évaluer à travers l'entonnoir sous son propre poids. Cet essai permet aussi d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. Un temps élevé peut indiquer une faible capacité de remplissage du BAP.

La norme donne les classes de viscosité apparente en fonction du temps d'écoulement au V-funnel.

Tableau 2. 1 Classification des BAP selon la norme NFP 12350-9.

Classe	Temps (seconde) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en v
	(Valeurs limites applicables aux charges individuelles)
VF1	<9,0
VF2	9,0 à 25,0

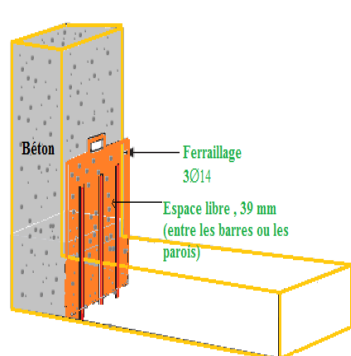


Figure 2. 4 V-funnel.

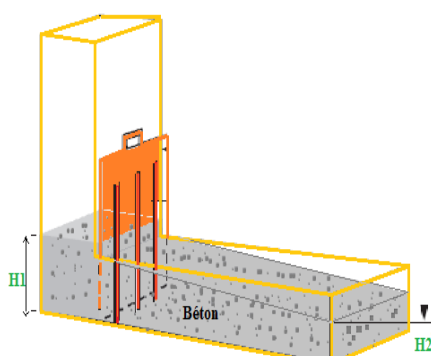
3.2.3 Essai de Boîte en L

L'objectif de cet essai est d'évaluer la capacité de passage des bétons autoplaçants par un milieu confiné. Le rapport des hauteurs du béton aux deux extrémités de la boîte est appelé le rapport de blocage $BR=H_2/H_1$ (figure 2.5).

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage (rapport H_2/H_1) de la boîte en L doit être



Avant



Après



supérieur à 0,8 (NF EN 12350-10).

Figure 2. 5 Boite en L.

3.2.4 Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11) (12350-11, 2010)

L'essai de stabilité au tamis est un essai développé afin d'évaluer le potentiel de la ségrégation statique. Le principe de cet essai est de mesurer la quantité de passage de laitance à travers les mailles du tamis de 5 mm.

$$\text{Le pourcentage de la laitance} = \frac{\text{la masse de laitance}}{\text{la masse de l'échantillon}} * 100\% = \Pi$$

Le critère de la stabilité des BAP:

- ✓ $0 \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- ✓ $15 < \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique.
- ✓ $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.



Figure 2. 6 Essai de stabilité au tamis.

3.3 Caractéristique des BAP à l'état durci

Les performances mécaniques : la résistance en compression, en traction et le module d'élasticité dépendent de la composition et le mode de la cure du béton. On générale les BAP montrent des résistances mécaniques quasiment similaires aux bétons ordinaires (BOV). (Almeida Filho *et al.*, 2010) ont réalisé une étude expérimentale sur trois compositions différentes de BAP. Leur résultats montrent que le module d'élasticité, la résistance à la compression et à la traction sont plus faible que ceux des BOV d'environ 3.6%, 5.7% et 14.4% respectivement. (Felekoglu, 2007) (Zhu and Gibbs, 2005) (Bosiljkov, 2003) ont trouvé que la résistance à la compression et à la traction sembleraient beaucoup influencées par la présence des fillers dans le BAP. Ceci a été également confirmé par les travaux de (BOUKNI and HOUARI, 2010).

4 Influence des fibres sur les bétons autoplaçants

4.1 A l'état frai

Les fibres sont connues pour affecter les caractéristiques de maniabilité et la capacité d'écoulement de béton frais (Hamzaoui *et al.*, 2014). La diminution de ces caractéristiques dépend du type et de la teneur de fibres. (Anastasiou *et al.*, 2014) ont montré une diminution notable de la maniabilité des BAP en fonction de la teneur **en** fibres. Ils ont trouvé aussi que la ségrégation augmente avec la teneur de fibres. Les auteurs ont noté une augmentation considérable de la densité, à cause de la présence des fibres d'aciers. (Hamzaoui *et al.*, 2014) ont fait une étude expérimentale sur l'effet des fibres de polypropylènes et métalliques sur la fluidité des BAP. Les caractéristiques de l'écoulement ont été évaluées en fonction de l'essai de l'étalement, le V-funnel et l'essai de la boîte en L. Ils ont constaté qu'il est tout à fait possible d'atteindre les propriétés autoplaçantes avec l'utilisation d'un renfort fibreux, même si l'introduction des fibres et le type de fibres influencent la fluidité du béton.

Il existe une teneur maximale de fibres qui pourrait être utilisé pour produire des BAP fibrés.

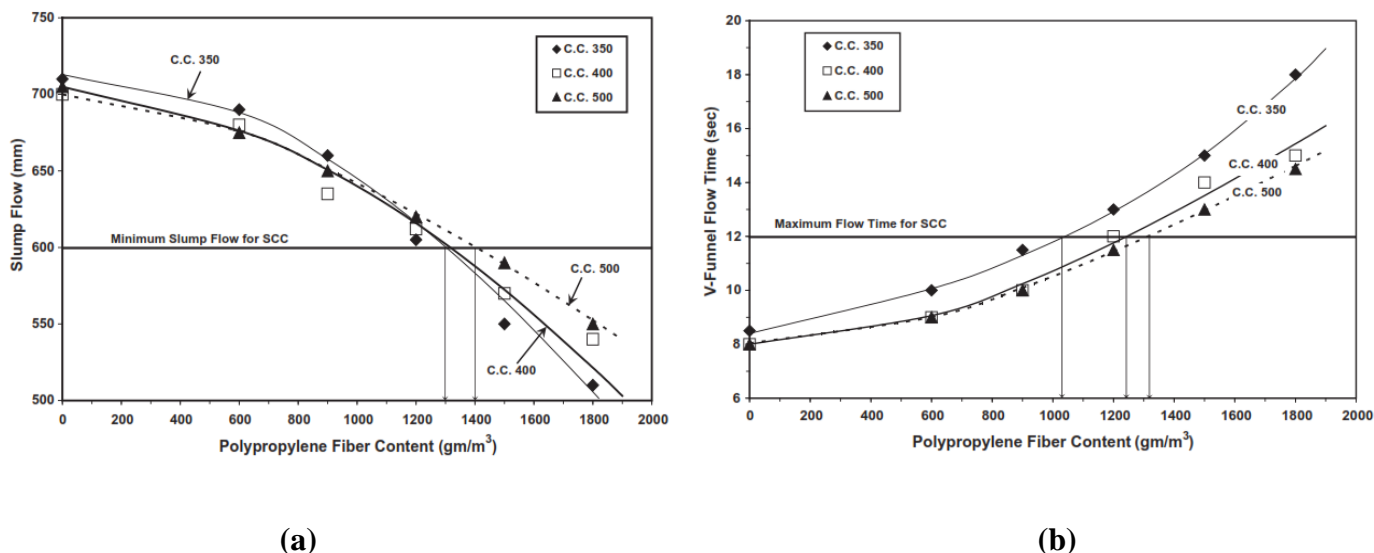


Figure 2. 7 Effet de la teneur en fibre sur l'étalement des BAP (a) et sur le v-funnel (b) (Abu-Eishah *et al.*, 2012).

La figure 2.1 montre l'effet de la teneur en fibres sur l'étalement, temps d'écoulement de V-funnel. Les auteurs ont observé que la teneur maximale des fibres pour obtenir un BAP est de 1300 à 1400g/m³. Ils ont mentionné également que la maniabilité de BAP fibrés est non seulement affectée par le volume de fibres et le type de fibre mais aussi par la composition du mélange.

4.2 A l'état durci

(Mazaheripour *et al.*, 2011) ont réalisé une étude expérimentale sur l'effet des fibres de polypropylènes sur les performances à l'état frais et durci des bétons autoplaçants légers. Leurs résultats ont indiqué que ce type de renfort n'améliore pas la résistance à la compression et le module d'élasticité. Par contre ils ont observé une augmentation de la résistance à la traction par fendage et à la flexion de 10.7 % et 14.4% respectivement.

(Anastasiou *et al.*, 2014) ont trouvé que la vitesse d'impulsion est légèrement diminuée lorsque en augmentant la teneur en fibres. Ce qui peut être attribué à la présence des vides dans la zone de transition entre les fibres et la pâte. Les résultats de la résistance à la compression sont diminués aussi avec l'augmentation de la teneur en fibres. Par contre la teneur élevée de fibres semble contribuer à une bonne ténacité à tous les niveaux de chargement. (Anastasiou *et al.*, 2014) ont rapporté que la résistance et la ténacité des BAP augmentent avec une teneur en volume de 0,3% et 0,5% de fibres de polypropylènes et d'acier respectivement. Plusieurs auteurs ont montré l'efficacité de l'introduction de fibres sur la lutte contre la fissuration par retrait plastique des bétons (Corinaldesi and Moriconi, 2011). Ainsi,

Chapitre 2Effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants

les fibres ont un effet positif sur la réduction de la fissuration du béton due au retrait de séchage.

(Anastasiou *et al.*, 2014) ont introduit les fibres métalliques avec un 0.7% par rapport au volume du béton soumis au gèle dégel et la diffusion du chlorure. Les mélanges avec cette teneur de fibres ont montré une légère augmentation de la teneur en chlorures mesurées à l'intérieur du béton.

5 Conclusion

À partir de cette étude on conclut que l'introduction des fibres quel que soit leur type influe sur le comportement des BAP à l'état frais, durci et vis-à-vis de la durabilité. A titre d'exemple les fibres métalliques diminuent le retrait à long terme. De plus les fibres polypropylène empêchent le retrait plastique et l'écaillage du béton soumis à l'élévation de la température.

Par contre l'utilisation des granulats naturels favorise de l'utilisation des ressources non renouvelables. Par conséquent, la possibilité de les remplacer par granulats recyclés se concrétise de plus en plus. Ceci se confirme par les récentes les recherches et enquêtes effectuées.

Dans les paragraphes suivants on va étudier l'effet des granulats naturels sur les bétons autoplaçants fibrés.

6 Référence

- 12350-11, N.E. (2010), "Essai pour béton frais - Partie 11 : béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis".
- Abu-Eishah, S.I., El-Dieb, A.S. and Bedir, M.S. (2012), "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region", *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 249-56.
- Almeida Filho, F., Barragán, B.E., Casas, J. and El Debs, A.L.H. (2010), "Hardened properties of self-compacting concrete—a statistical approach", *Construction and Building Materials*, Vol. 24 No. 9, pp. 1608-15.
- Anastasiou, E.K., Papayianni, I. and Papachristoforou, M. (2014), "Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement", *Materials & Design*, Vol. 59, pp. 454-60.
- Bosiljkov, V.B. (2003), "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 No. 9, pp. 1279-86.
- BOUKNI, B. and HOUARI, H. (2010), "ETUDE DE L'INFLUENCE DU RAPPORT CIMENT/LIANT (C/L) ET DU MODE DE CONSERVATION SUR LE RETRAIT DES BETONS AUTOPLACANTS", *Sciences & Technologie B*, No. 31, pp. 17-22.
- Corinaldesi, V. and Moriconi, G. (2011), "Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33 No. 5, pp. 596-601.

Chapitre 2Effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants

- Domone, P. (2007), "A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29 No. 1, pp. 1-12.
- Felekoglu, B. (2007), "Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 51 No. 4, pp. 770-91.
- Ferrara, L., Bamonte, P., Caverzan, A., Musa, A. and Sanal, I. (2012), "A comprehensive methodology to test the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete (SFR-SCC)", *Construction and Building Materials*, Vol. 37, pp. 406-24.
- Hadjoudja, M. (2014). *Influence de l'incorporation des fibres métalliques sur les propriétés physico-mécaniques et sur le mécanisme de fissuration d'un béton de sable de dune.*
- Hamzaoui, R., Guessasma, S., Mecheri, B., Eshtiaghi, A.M. and Bennabi, A. (2014), "Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes", *Materials & Design*, Vol. 56, pp. 60-68.
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. and Hosseinpour, I. (2011), "The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 25 No. 1, pp. 351-58.
- Zhu, W. and Gibbs, J.C. (2005), "Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 8, pp. 1457-62.

CHAPITRE 3

EFFET DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT DES BAP A BASE DES GRANULATS RECYCLES

Table des matières

1	Introduction	33
2	Comportement à l'état frais des BAP fibré à base des GRB	33
2.1	Etalement.....	33
2.2	V-funnel.....	34
2.3	Boite en L	34
2.4	Ségrégation.....	35
2.5	Propriétés rhéologiques	36
3	Effet des fibres sur le comportement des BAP-GRB à l'état durci.....	37
3.1	Résistance à la compression	37
3.2	Résistance à la traction	38
4	Conclusion.....	39
5	Référence.....	39

Liste des Figures

Figure3. 1 Effet des GBR et des fibres de PP sur T500 des BAP (Matar and Assaad, 2019).	33
Figure3. 2 Effet des fibres de PP et des GRB sur le temps d'écoulement des BAP(Matar and Assaad, 2019).....	34
Figure3. 3 Effet des fibres de PP et des GRB sur le rapport du blocage des BAP(Matar and Assaad, 2019).....	35
Figure3. 4 Effet des fibres de PP et des GRB sur la ségrégation des BAP(Matar and Assaad, 2019). 36	
Figure3. 5 Effet des fibres de PP et des GRB sur les propriétés rhéologiques des BAP(Matar and Assaad, 2019).	37
Figure3. 6 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Matar and Assaad, 2019).	38
Figure3. 7 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la traction des BAP(Matar and Assaad, 2019).	38

1 Introduction

Les fibres de polypropylène (PPF) sont couramment incorporées dans les bétons structuraux pour améliorer la ténacité à la flexion, post-fissuration...etc.

Un travail considérable a été réalisé dans le domaine du béton autoplaçant contenant des granulats recyclés obtenus à partir de débris de construction et de démolition. Par contre, les effets des granulats recyclés (GR) et des fibres de polypropylène (PP) sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) à l'état frais et durcis n'est pas quantifiée dans la littérature.

Dans ce chapitre on démontra ces phénomènes à partir des travaux de la littérature existants.

2 Comportement à l'état frais des BAP fibré à base des GRB

2.1 Etalement

Peu d'étude réalisée sur l'effet combiné de GRB et de fibre de polypropylène sur les propriétés frais et rhéologiques des BAP. (Akça *et al.*, 2015) ont fait une investigation expérimentale sur l'effet des fibres de polypropylènes avec une longueur de 50 mm et 1 mm de diamètre sur le comportement à l'état frais des bétons à base de granulats recyclés. Ils ont conclu que le mélange avec 25% à 55%, l'affaissement se varie entre 100 à 140 mm. (Fathi *et al.*, 2017) ont conclu qu'il y a une possibilité d'ajouter de fibre de PP avec 1% dans les BAP contenant des déchets de verre recyclé, à condition d'ajouter plus de superplastifiant pour compenser la perte de la maniabilité. Les auteurs ont signalé que l'ouvrabilité du béton est diminuée à l'effet de combiner des granulats recyclés et de fibre de PP.

L'effet des F-PP sur l'étalement devient particulièrement aggravé pour les mélanges des BAP avec de E/C faible et /ou un pourcentage de substitution élevé accrues des GRB.

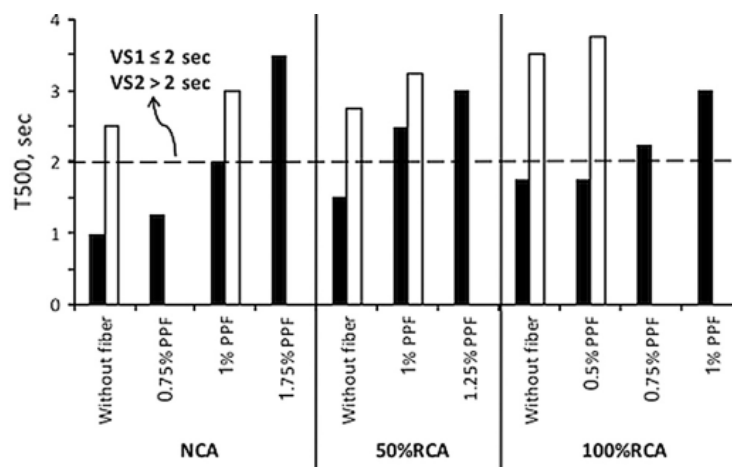


Figure3. 1 Effet des GRB et des fibres de PP sur T500 des BAP (Matar and Assaad, 2019).

2.2 V-funnel

(Mazaheripour *et al.*, 2011) ont examiné l'effet de la fibre de PP de 12 mm de longueur sur les propriétés d'écoulement des BAP léger. Les BAP avec 0.5% des fibres de PP présentent une augmentation du temps d'écoulement de V entonnoir à 65%.

1 ont trouvez que les BAP témoins à 1% de PPF, le temps de V-funnel atteint de 21,5 s. Pour le mélange de BAP avec 0.5% de fibre de PP et 50% des granulats recyclés le TV est égal de 28,5 S. (voir la figure 3.2).

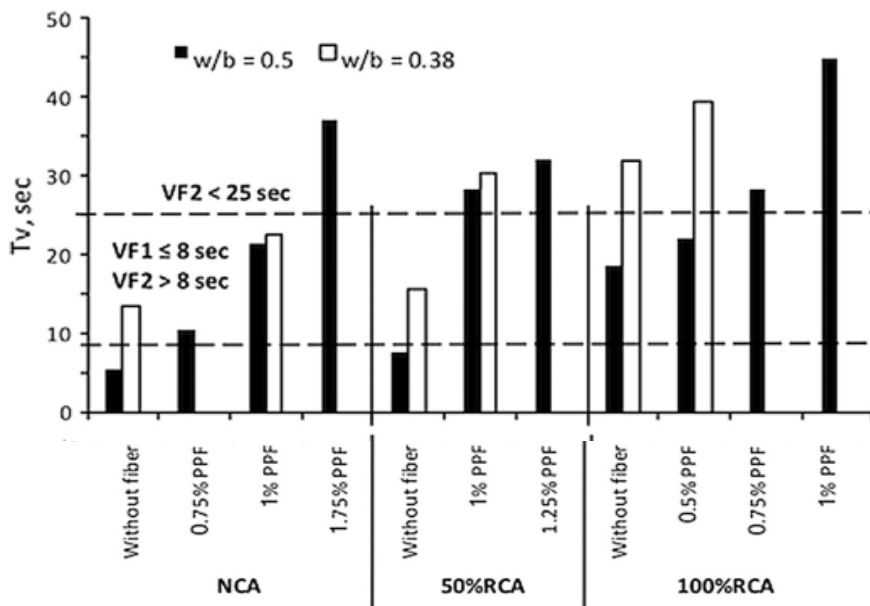


Figure3. 2 Effet des fibres de PP et des GBR sur le temps d'écoulement des BAP(Matar and Assaad, 2019).

2.3 Boite en L

Les valeurs du rapport de blocage des BAP sont diminuées avec l'augmentation du pourcentage des fibre de PP (Matar and Assaad, 2019). Ceci est dû au frottement élevé entre la matrice cimentaire et les fibres empêchant la capacité du passage des BAP. Pour un BAP avec des granulats naturels et de E/L= 0,5 ont présenté un rapport du blocage supérieur à 0.8 tant que les fibres de PP sont inférieures à 1%. La réduction du E/L et / ou l'incorporation des GBR conduisent à des valeurs du rapport de blocage significativement faible.

(Mazaheripour *et al.*, 2011) ont étudié l'effet de la fibre de PP de 12 mm de longueur sur les propriétés d'écoulement des BAP léger ayant une densité entre 1800 à 2000 kg / m3. Les BAP avec 0.5% des fibres de PP présentent une diminution de la capacité de remplissage à 22% dans l'essai de U-box.

Chapitre 3.... Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

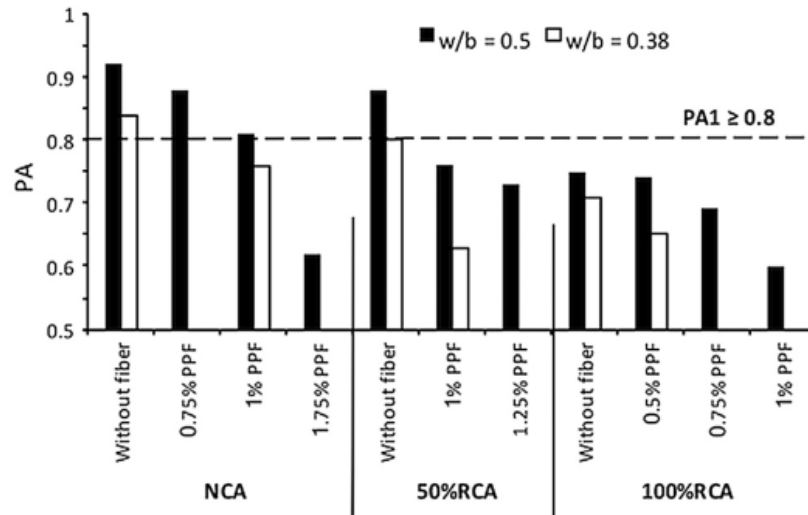


Figure 3. 3 Effet des fibres de PP et des GRB sur le rapport du blocage des BAP (Matar and Assaad, 2019).

2.4 Ségrégation

(Grdic *et al.*, 2010) ont signalé que la ségrégation des BAP contenant 100% de GRB est diminuée deux fois en raison de l'augmentation de la porosité et de l'absorption d'eau du squelette granulaire.

(Matar and Assaad, 2019) Les variations typiques des réponses du pourcentage de ségrégation dues à E/L, GRB et F-PP ont présenté sur la figure 3.4. D'une manière générale, l'effet de l'incorporation des fibres de PP conduit à une diminution de l'indice de ségrégation SR, reflétant une meilleure résistance aux ségrégations des granulats. Par exemple, SR a diminué de 17,6% dans le BAP avec des granulats naturels et 0.5% de F-PP. Cela peut être attribué à des fractions de volume PPF plus élevées qui créent un réseau de contacts directs et de liens inter-particules au sein du BAP. De plus, des mélanges contenant des taux de remplacement élevés des GBR conduisent à une bonne stabilité ; par exemple, la classe de ségrégation pour les BAP avec 100% de GBR est diminuée de 17% à 12%. Ces résultats sont en accord avec les recherches de (Matar and Assaad, 2017).

Chapitre 3.... Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

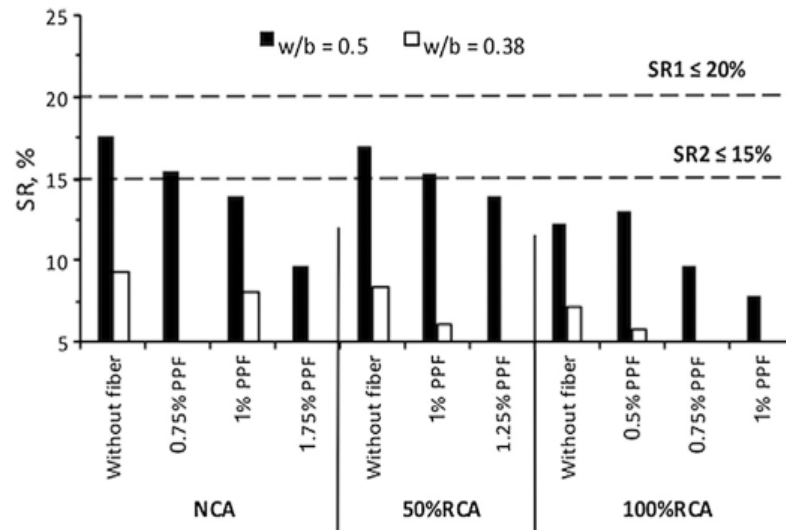


Figure3. 4 Effet des fibres de PP et des GRB sur la ségrégation des BAP(Matar and Assaad, 2019).

2.5 Propriétés rhéologiques

Selon (Matar and Assaad, 2019) les contraintes de cisaillement (S) ont varié suivant le modèle de Bingham modifié. La figure 3.5 regroupe les propriétés rhéologiques des mélanges avec $E/L=0.5$ et contenant divers ajouts des fibres de PP et des granulats recyclés. Ils ont trouvé que l'introduction des F-PP ont modifié le comportement rhéologique du BAP à cause de leur frottement élevé avec la matrice et les granulats. A titre d'exemple, une augmentation claire de la contrainte de cisaillement de 16,87 à 24 Pa a été constatée avec l'introduction de 1,75% de fibre de polypropylène dans les BAP. Parallèlement selon les résultats de (González-Taboada *et al.*, 2017), l'utilisation des taux élevés des granulats recyclés a conduit à une augmentation des propriétés rhéologiques. Ceci, est dû à la surface rugueuse des agrégats qui génèrent un frottement interne plus élevé lors du cisaillement. Par exemple, la contrainte de cisaillement (S) est variée de 16,87 à 18,11Pa lorsque les GBR est variés de 0% à 50%.

Chapitre 3.... Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

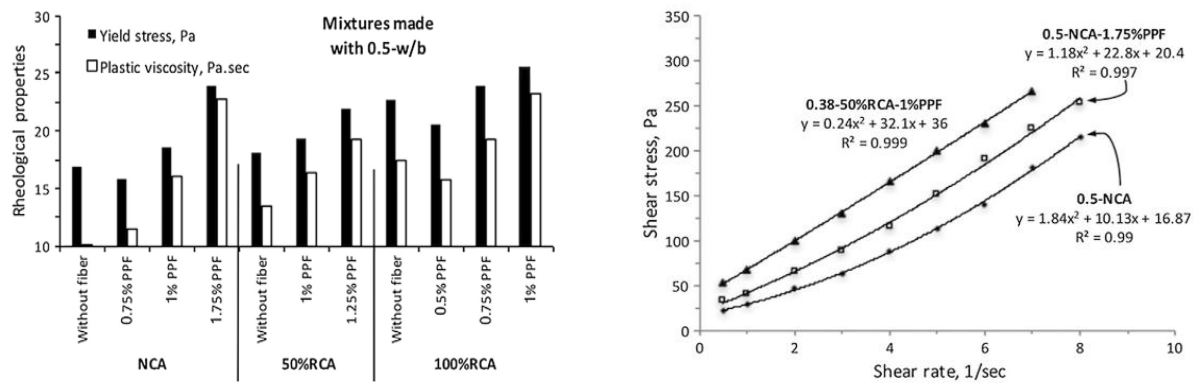


Figure3. 5 Effet des fibres de PP et des GRB sur les propriétés rhéologiques des BAP(Matar and Assaad, 2019).

3 Effet des fibres sur le comportement des BAP-GBR à l'état durci

3.1 Résistance à la compression

(AbdelAleem *et al.*, 2017) ont montré que l'ajout de 1% de fibres synthétiques peuvent compenser la diminution des résistances à la traction et à la flexion des BAP contenant 30% des granulés de caoutchouc. Les mélanges non fibreux présentent un mécanisme de rupture fragile, par contre les mélanges contenant les fibres de PP sont assez ductiles.

En accord avec d'autres références (Zhan *et al.*, 2014) (Assaad and Daou, 2017), l'effet du remplacement des granulats naturels par des GRB présente des valeurs de compression relativement faibles. Ceci est dû à la qualité médiocre des GBR, y compris une densité plus faible.

A titre d'exemple, une diminution de la résistance a été remarquée de 59,3 MPa à 55,4 MPa pour les BAP avec l'ajout de 100% GRB. Par contre aucun changement significatif dans la résistance n'a été remarqué durant l'introduction des fibres de PP dans les BAP. Ces résultats sont en accord avec d'autres études (Ding *et al.*, 2008, Zhang *et al.*, 2016).

Chapitre 3.... Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

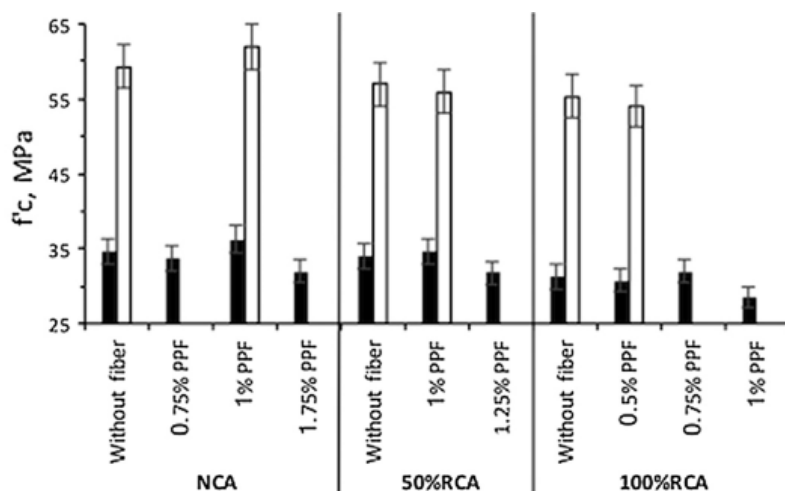


Figure 3. 6 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Matar and Assaad, 2019).

3.2 Résistance à la traction

L'ajout des GRB dans les BAP a conduit des résistances à la traction et à la flexion faibles, pouvant être compensées par la présence des fibres.

La substitution des granulats naturels par des GRB a conduit une résistance à la traction au fendage faible ; cette diminution est de 6,29 MPa à 5,7 MPa avec une substitution totale de 100% par des GRB dans les BAP. Cependant, la résistance à la traction pour les BAP avec des fibres de PP est plus élevés par rapport aux mélanges non fibrés. Cela, peut être attribué à la présence des fibres qui empêche la propagation des fissures entre la pâte et granulats (Cifuentes *et al.*, 2013) (Mazaheripour *et al.*, 2011). Selon (Akça *et al.*, 2015) ont montré le dosage optimum des fibres pour obtenir une bonne résistance est de 3% de la masse du liant.

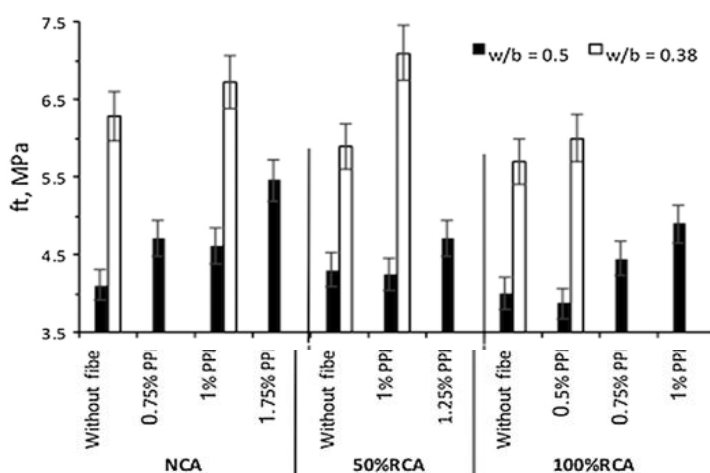


Figure 3. 7 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la traction des BAP(Matar and Assaad, 2019).

4 Conclusion

Ce chapitre évalue les effets simultanés des ajouts de GRB et F-PP sur les BAP à l'état frais et durcis. Les résultats ont montré que l'introduction des F-PP nécessitent un ajustement du superplastifiant et de l'eau pour garantir un étalement fixe, en particulier lorsque les mélanges sont préparés avec des taux de remplacement de GRB élevés. Les mélanges contiennent des ajouts de F-PP et de GRB avec des teneurs élevées montrant une meilleure résistance à la ségrégation.

L'effet de l'incorporation des fibres de PP n'a pas modifié la résistance à la compression des BAP. Par contre la résistance à la traction des BAP fibrés a considérablement augmenté. On conclut que la diminution de la résistance à la traction due aux ajouts de GRB peut être compensée par l'incorporation de fibre de polypropylène.

5 Référence

- AbdelAleem, B.H., Ismail, M.K. and Hassan, A.A. (2017), "Properties of self-consolidating rubberised concrete reinforced with synthetic fibres", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 69 No. 10, pp. 526-40.
- Akça, K.R., Çakır, Ö. and Ipek, M. (2015), "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 620-30.
- Assaad, J. and Daou, Y. (2017), "Behavior of structural polymer-modified concrete containing recycled aggregates", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 31 No. 8, pp. 874-96.
- Cifuentes, H., García, F., Maeso, O. and Medina, F. (2013), "Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC", *Construction and Building Materials*, Vol. 45, pp. 130-37.
- Ding, Y.-n., Liu, S.-g., Zhang, Y.-l. and Thomas, A. (2008), "The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 22 No. 7, pp. 1462-70.
- Fathi, H., Lameie, T., Maleki, M. and Yazdani, R. (2017), "Simultaneous effects of fiber and glass on the mechanical properties of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 133, pp. 443-49.
- González-Taboada, I., González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F. and Seara-Paz, S. (2017), "Analysis of rheological behaviour of self-compacting concrete made with recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 157, pp. 18-25.
- 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.
- Matar, P. and Assaad, J.J. (2017), "Effect of vertical reinforcing bars on formwork pressure of SCC containing recycled aggregates", *Journal of Building Engineering*, Vol. 13, pp. 159-68.
- Matar, P. and Assaad, J.J. (2019), "Concurrent effects of recycled aggregates and polypropylene fibers on workability and key strength properties of self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 199, pp. 492-500.
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. and Hosseinpour, I. (2011), "The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 25 No. 1, pp. 351-58.

Chapitre 3.... Effet des fibres sur le comportement des BAP à base des granulats recyclés

- Zhan, B., Poon, C.S., Liu, Q., Kou, S. and Shi, C. (2014), "Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties", *Construction and Building Materials*, Vol. 67, pp. 3-7.
- Zhang, H., Liu, Y., Sun, H. and Wu, S. (2016), "Transient dynamic behavior of polypropylene fiber reinforced mortar under compressive impact loading", *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 30-42.

CHAPITRE 4

Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci.

Table des matières

1	Introduction	Erreur ! Signet non défini.
2	Plan d expérience	Erreur ! Signet non défini.
2.1	Définition.....	44
2.2	Intérêts des plans d'expériences :	44
2.3	Types de plans d'expériences :	44
2.3.1	Plans factoriels complets :	45
2.3.2	Plans factoriels complets à deux niveaux	45
2.3.3	Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres.....	45
2.3.4	Plans fractionnaires	45
3	Modélisation des résultats expérimentaux de (Matar and Assaad, 2019)	46
3.1	Modélisation T50 de l'étalement.....	46
3.1.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées.....	46
3.1.2	Expression de la prevision.....	48
3.1.3	surface de réponse	48
3.2	Modélisation de la résistance à la compression.....	49
3.2.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées.....	49
3.2.2	Expression de la prévision.....	51
3.2.3	Surface de réponse.....	51
4	Conclusion	52
5	Référence	52

Liste des Figures

Figure 4. 1 Effet des GBR et des fibres de PP sur T500 des BAP (Matar and Assaad, 2019).....	46
Figure 4. 2 Relation entre les valeurs du T50 expérimentales et celles de la simulation	46
Figure 4. 3 Surface de réponse entre T50, GR, PP et E/C.....	48
Figure 4. 4 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Matar and Assaad, 2019).....	49
Figure 4. 5 Relation entre les valeurs de la résistance à la compression expérimentales et celles de la simulation.....	49
Figure 4. 6 Surface de réponse entre E/C, F-PP, GRB et RC.....	51

Liste des Tableaux

Tableau 4. 1 Résumé de l'ajustement	47
Tableau 4. 2 Testes des effets.....	47
Tableau 4. 3 Analyse de la variance.....	47
Tableau 4. 4 Résumé de l'ajustement.....	50
Tableau 4. 5 Tests des effets	50
Tableau 4. 6 Analyse de la variance.....	50

1 Introduction

Dans le chapitre précédent on a montré différentes études d'antérieures sur l'effet des fibres sur le comportement des BAP à l'état frais et durcis contenant des granulats recyclés.

On a conclu qu'il y a plusieurs paramètres qui influent sur le comportement de ce type de composite comme tel que le rapport E/C, le dosage du superplastifiant, la teneur des granulats recyclés ...etc.

Dans ce chapitre on présentera une analyse statique par la méthode du plan factoriel en utilisant le logiciel JMP. Cette démarche théorique facilite la compréhension de l'effet du différent paramètre sur le béton autoplaçant.

2 Plan d'expérience

2.1 Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres (facteurs) tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Elle permet d'extraire le maximum d'informations avec un minimum de résultats. La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais.
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.
- Détection des interactions entre facteurs.
- Modélisation des réponses étudiées.
- Une précision optimum des résultats.

2.2 Intérêts des plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer Industries des matériaux. Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques

2.3 Types de plans d'expériences :

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en trois grandes familles.

2.3.1 Plans factoriels complets :

Un plan factoriel ou plan complet est obtenu lorsqu'au moins un essai pour chaque combinaison de facteur est réalisé.

2.3.2 Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans permettent l'étude de k facteurs à raison de deux niveaux (-1, +1) par facteur. Ils renferment toutes les combinaisons possibles des k facteurs à leurs deux niveaux. Le nombre d'expériences à réaliser se calcule par : le nombre d'expériences = 2^k * nombre de facteur.

2.3.3 Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres

Il est parfois nécessaire d'augmenter le nombre de niveaux d'un facteur afin de mieux maîtriser l'action de ce facteur. Dans ce cas il faut être prudent, car le nombre d'expériences augmente rapidement. Le nombre d'expériences = N^p

2.3.4 Plans fractionnaires

Les plans fractionnaires sont très utiles et mettent en évidence l'intérêt primordial de la méthode des plans d'expériences, qui est de permettre de diminuer considérablement le nombre d'expériences nécessaires à la construction d'un modèle. Mais cependant, il est prudent de garder un certain esprit critique face aux résultats que fournissent les plans fractionnaires, car ils nécessitent une certaine maîtrise de leur construction et de l'interprétation des résultats.

Plans fractionnaires à deux niveaux

Les plans fractionnaires à deux niveaux sont des plans optimaux, permettant de réduire la charge expérimentale, proposée par un plan factoriel complet, en focalisant sur les effets les plus intéressants.

La solution proposée par les plans fractionnaires consiste à utiliser pour l'étude de k facteurs les matrices des effets des plans complets 2^{k-p} . L'avantage de ces plans est évident : la charge expérimentale est divisée par 2^p par rapport aux premiers plans, p est le nombre de facteurs aliasés « confondus » délibérément, c'est-à-dire qui ont des niveaux de même alternance dans la matrice des expériences [34].

Plan fractionnaire à n niveaux et p paramètres

Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences qu'un plan factoriel.

Le nombre d'expériences = n^{p-k}

La matrice d'expériences est donc divisée k fois.

3 Modélisation des résultats expérimentaux de (Matar and Assaad, 2019)

3.1 Modélisation T50 de l'étalement

La figure présente les résultats expérimentaux des chercheurs (Matar and Assaad, 2019) de effet de trois paramètres (E/C, PP et GRB) sur T50 des BAP-PP-GRB (voir chapitre 3).

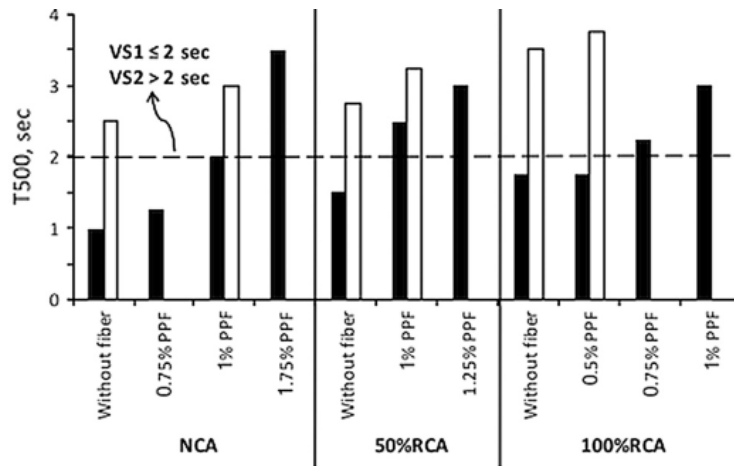


Figure 4. 1 Effet des GRB et des fibres de PP sur T500 des BAP (Matar and Assaad, 2019).

On va modéliser ces résultats par le logiciel JMP pour avoir une loi de comportement des BAP-PP-GRB.

3.1.1 Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées

La figure 4.2 montre des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

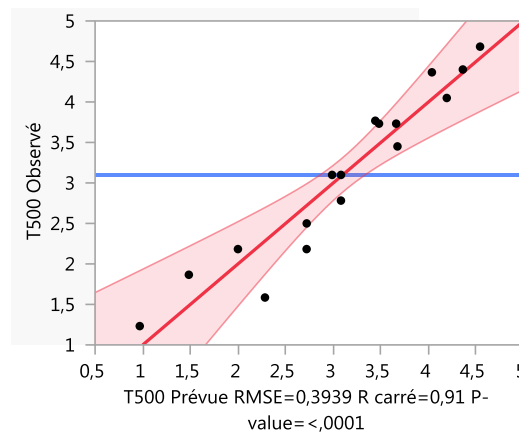


Figure 4. 2 Relation entre les valeurs du T500 expérimentales et celles de la simulation

Chapitre 4 Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci

Selon la figure 4.2 on constate que le nuage des points, est moins dispersé. On conclut qu'il y a une bonne corrélation entre les résultats de l'expérimentation de (Matar and Assaad, 2019). et ceux de la simulation ($R \approx 1$). Le tableau 4.1 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.

Tableau 4. 1 Résumé de l'ajustement

R carré	0,911423
R carré ajusté	0,858277
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,393941
Moyenne de la réponse	3,100647
Observations (ou sommes pondérées)	17

Source	LogWorth		P-value
E/C(0,38,0,5)	3,083		0,00083
FPP(0,1,75)	2,984		0,00104
GR(0,100)	1,849		0,01417
E/C*FPP	1,498		0,03179
E/C*GR	0,276		0,52926
GR*FPP	0,253		0,55811

Tableau 4. 2 Testes des effets

Le tableau 4.2 présente le test des effets qui influence sur la repense étudiée (T500), on peut constater que les facteurs tel que le rapport E/C, le dosage des fibres de polypropylène et des granulats recyclés sont les plus influant sur le comportement des BAP à l'état frais.

Par conséquent, l'ajustement de la teneur en eau peut compenser l'effet désavantageux des fibres et des granulats recyclés sur le comportement des BAP à l'état frais. Ils ne restent que savoir le comportement à l'état durci (paragraphe 3.2).

Tableau 4. 3 Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	6	15,968523	2,66142	17,1494
Erreur	10	1,551899	0,15519	Prob. > F
Total corrigé	16	17,520422		<,0001*

3.1.2 Expression de la prevision

$$\begin{aligned}
 T50 = & 3.50 - 0.62 \left(\frac{\left(\frac{E}{C} - 0.44 \right)}{0.06} \right) + 0.46 \left(\frac{(GR - 0.50)}{50} \right) + 0.92 \left(\frac{(FPP - 0.875)}{0.875} \right) \\
 & + \left(\left(\frac{\left(\frac{E}{C} - 0.44 \right)}{0.06} \right) \cdot \left(\frac{(GR - 0.50)}{50} \right) * (-0.085) \right) \\
 & + \left(\left(\frac{\left(\frac{E}{C} - 0.44 \right)}{0.06} \right) \cdot \left(\frac{(FPP - 0.875)}{0.875} \right) * (0.47) \right) \\
 & + \left(\left(\frac{(GR - 0.50)}{50} \right) \cdot \left(\frac{(FPP - 0.875)}{0.875} \right) * (-0.135) \right)
 \end{aligned}$$

Cette expression nous a permet de prédire T50 des BAP-PP-GR en utilisant les valeurs du rapport E/C et du dosage de F-PP et GRB.

3.1.3 surface de réponse

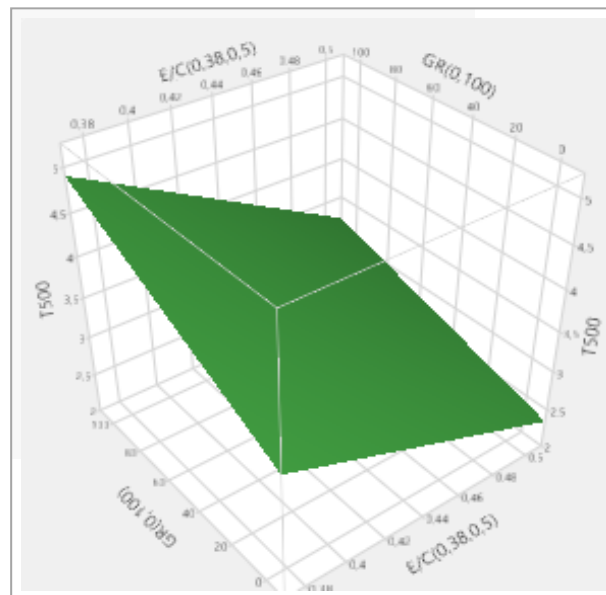


Figure 4. 3 Surface de réponse entre T50, GR, PP et E/C.

D'après la figure 4.3 qui présente la surface de réponse du modèle de T50 en fonction du dosage de FPP et GRB et E/C. On constate que l'augmentation du pourcentage du FPP et GRB provoque une diminution de T50.

3.2 Modélisation de la résistance à la compression

La figure 4.4 présente les résultats expérimentaux des chercheurs (Matar and Assaad, 2019) sur l'effet de trois paramètres (E/C, PP et GRB) sur la résistance à la compression des BAP-PP-GRB (voir chapitre 3).

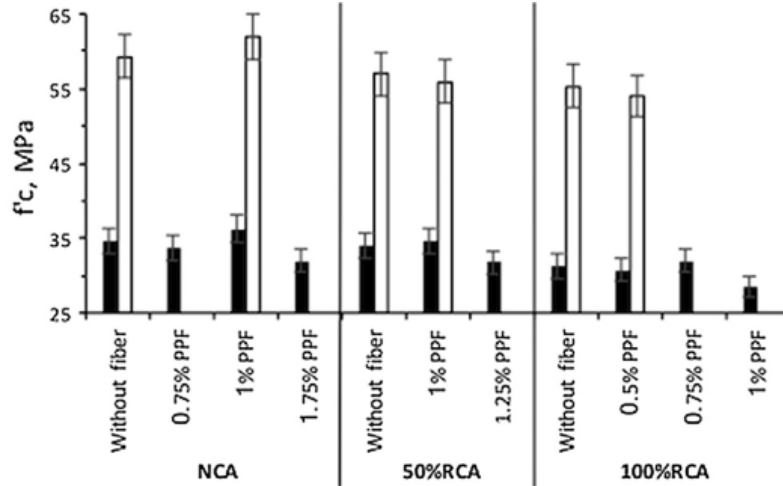


Figure 4. 4 Effet des fibres de PP et des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Matar and Assaad, 2019).

On va modéliser ces résultats par le logiciel JMP pour avoir une loi de comportement des BAP-PP-GRB.

3.2.1 Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées

La figure 4.5 montre des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

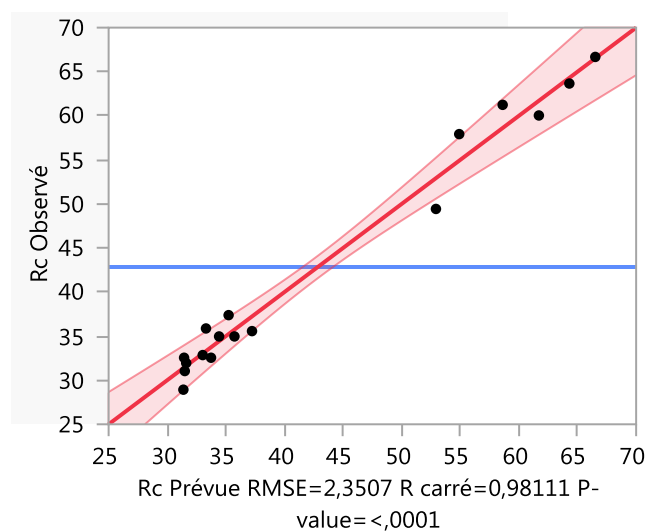


Figure 4. 5 Relation entre les valeurs de la résistance à la compression expérimentales et celles de la simulation.

Chapitre 4 Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci

Selon la figure 4.5 on constate que le nuage des points, est moins dispersé. On conclut qu'il y a une bonne corrélation entre les résultats de l'expérimentation de (Matar and Assaad, 2019). et ceux de la simulation ($R \approx 1$). De plus, on remarque que les résistances à la compression inférieures à 45 MPa présentant la meilleure corrélation. Le tableau 4.4 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.

Tableau 4. 4 Résumé de l'ajustement.

R carré	0,981108
R carré ajusté	0,969772
Racine de l'erreur quadratique moyenne	2,350719
Moyenne de la réponse	42,79894
Observations (ou sommes pondérées)	17

Source	LogWorth		P-value	
E/C(0,38,0,5)	8,146		0,00000	
GR(0,100)	2,400		0,00398	
E/C*GR	1,021		0,09519	
E/C*FPP	0,872		0,13425	
FPP(0,1,75)	0,308		0,49191	^
GR*FPP	0,238		0,57837	

Tableau 4. 5 Tests des effets

Le tableau 4.5 présente le test des effets qui influence sur la réponse étudiée (R_c), on peut constater que les facteurs tels que le rapport E/C est le plus influant sur le comportement des BAP à l'état durci.

Par conséquent, il faut faire un ajustement de la teneur en eau avec soigneusement, car il influe significativement sur la résistance à la compression des BAP-FPP-GRB.

Tableau 4. 6 Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	6	2869,6550	478,276	86,5520
Erreur	10	55,2588	5,526	Prob. > F
Total corrigé	16	2924,9138		<,0001*

3.2.2 Expression de la prévision

$$\begin{aligned}
 RC = & 47.38 - 13.9 \left(\frac{\left(\frac{E}{C} - 0.44 \right)}{0.06} \right) - 3.47 \left(\frac{(GR - 0.50)}{50} \right) + 0.863 \left(\frac{(FPP - 0.875)}{0.875} \right) \\
 & + \left(\left(\frac{\left(\frac{E}{C} - 0.44 \right)}{0.06} \right) \cdot \left(\frac{(GR - 0.50)}{50} \right) * (1.44) \right) \\
 & + \left(\left(\frac{\left(\frac{E}{C} - 0.44 \right)}{0.06} \right) \cdot \left(\frac{(FPP - 0.875)}{0.875} \right) * (-1.84) \right) \\
 & + \left(\left(\frac{(GR - 0.50)}{50} \right) \cdot \left(\frac{(FPP - 0.875)}{0.875} \right) * (0.768) \right)
 \end{aligned}$$

Cette expression nous a permis de prédire la résistance à la compression des BAP-PP-GR en utilisant les valeurs du rapport E/C et du dosage de F-PP et GRB.

3.2.3 Surface de réponse

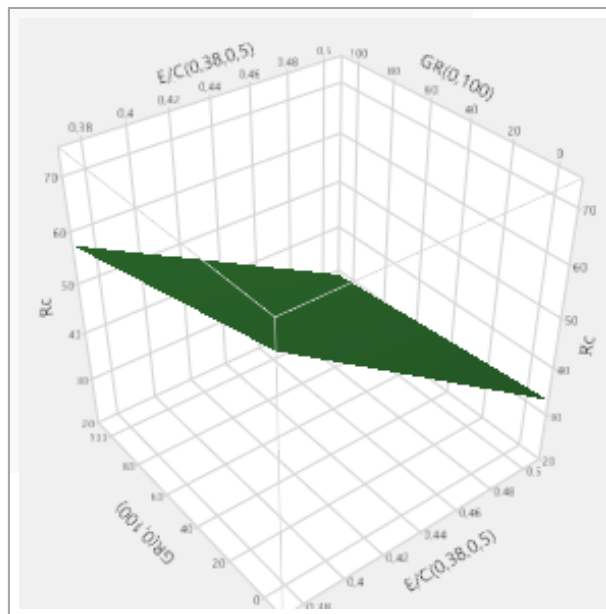


Figure 4. 6 Surface de réponse entre E/C, F-PP, GRB et RC.

D'après la figure 4.6 qui présente la surface de réponse du modèle de RC en fonction du dosage de FPP, GRB et E/C. On constate que l'augmentation du pourcentage du FPP et GRB provoque une légère diminution de RC. Par contre le rapport E/C plus élevée provoque une diminution considérable de la résistance à la compression des BAP-PP-GRB.

Chapitre 4 Modélisation effet des GRB et des PP sur le comportement des BAP à l'état frais et durci

4 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre une étude numérique basée sur la méthode du plan d'expérience.

On a choisi quelques phénomènes importants à l'état frais et durcis des BAP-PP-GRB tel que le T50 de l'étalement et la résistance à la compression.

On a conclu que la modélisation révèle une bonne corrélation et une prévision des résultats expérimentaux. On a trouvé que l'effet du facteur E/C est très pertinents dans le comportement des BAP-PP-GRB.

5 Référence

Matar, P. and Assaad, J.J. (2019), "Concurrent effects of recycled aggregates and polypropylene fibers on workability and key strength properties of self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 199, pp. 492-500.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre étude était de mettre en place des bétons autoplaçants à base des granulats recyclés renforcés par des fibres à faible impact environnemental.

Après un examen exhaustif de la plupart des aspects concernant le recyclage des bétons, il apparaît que cette pratique n'est ni nouvelle, ni techniquement difficile. Avec des granulats de béton recyclé (GBR) appropriés, le recyclage à un taux limité peut être effectué en toute confiance, conformément à l'état actuel de la normalisation. En fait, le principal obstacle est plutôt d'ordre économique. Concasser des morceaux de béton armé déconstruits n'est pas moins cher que concasser des blocs de roche naturelle, de sorte que le coût de production des GBR est au moins aussi élevé que celui des granulats naturels.

On conclut :

Pour mieux comprendre l'effet de ces fibres sur le comportement des BAP-GBR, nous avons décomposé notre travail en trois volets.

- ✚ Le premier volet qui traite des granulats de béton recyclé (GBR) : comment sont-ils produits, quelles sont leurs caractéristiques principales. Les résultats obtenus ont montré que les propriétés de granulats recyclés dépendent essentiellement à l'origine de l'agrégat tel que : béton concassé, brique, verts...etc. Ainsi, les propriétés mécaniques et physiques de ce type de granulats sont plus complexes que celles des granulats naturels. De plus, cette étude nous a permis 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 fibres sur le comportement des béton autoplaçant à l'état frais et durci. Les résultats ont montré que l'introduction des fibres quel que soit leur type influe sur le comportement des BAP à l'état frais, durci et vis-à-vis de la durabilité. A titre d'exemple les fibres métalliques diminuent le retrait à long terme. De plus les fibres polypropylène empêchent le retrait plastique et l'écaillage du béton soumis à l'élévation de la température.
- ✚ Le troisième volet fournit des informations sur l'effet des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants à base des granulats recyclés. Les résultats ont montré que l'introduction des fibres de PP nécessitent un ajustement du superplastifiant et de l'eau

pour garantir un étalement fixe, en particulier lorsque les mélanges sont préparés avec des taux de remplacement de GRB élevés. Les mélanges contiennent des ajouts de F-PP et de GRB avec des teneurs élevées montrant une meilleure résistance à la ségrégation. L'effet de l'incorporation des fibres de PP n'a pas modifié la résistance à la compression des BAP. Par contre la résistance à la traction des BAP fibrés a considérablement augmenté.

- ✚ Une étude numérique est basée sur la méthode du plan d'expérience. On a choisi quelques phénomènes importants à l'état frais et durcis des BAP-PP-GRB tel que le diamètre de l'étalement et la résistance à la compression. On conclut que la modélisation révèle une bonne corrélation et une bonne prévision des résultats expérimentaux.

On conclut que la diminution des performances mécaniques due aux ajouts de GRB peut être compensée par l'incorporation de fibre de polypropylène.