

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 DE TECHNOLOGIE Département de GENIE CIVIL



Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière: Génie Civil – Spécialité: Matériaux

THÈME

**Effet des granulats recyclés sur le comportement et la durabilité des bétons autoplaçants**

Présentée par:

**Benziouche zakaria**

**Bouzidi alaeddine**

Soutenue publiquement le : 30/09 /2020

Devant le jury composé de :

<b>ATIA Abdelkader</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>	<b>Université de BBA</b>
<b>LOGZIT Nacer</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de BBA</b>
<b>NOUI Ammar</b>	<b>MCB</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de BBA</b>
<b>BELKADI Ahmed Abderraouf</b>	<b>MAA</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université de BBA</b>
<b>KESSAL Oussama</b>	<b>MAA</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université de BBA</b>

## Remerciement

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

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

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

Je sais gré à Monsieur **ATIA Abdelkader**, MAA à l'université de BBA de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de l'examinassions.

Je tiens à remercier Monsieur **NOUI Ammar**, docteur à l'université de BBA, d'avoir accepté la lourde tâche d'être examinateur de ce mémoire et pour ses critiques judicieuses.

Je remercie cordialement, Monsieur **LOGZIT Nacer**, MAA de l'université de BBA d'avoir accepté d'examiner ce travail.

## Résumé

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

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets. Les granulats recyclés (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 surface plus rugueuse. Cela a modifié par conséquent la capacité de l'écoulement, la résistance et la déformabilité des BAP...etc.

Ainsi, notre recherche se compose de trois parties. La première partie concerne l'étude de l'influence des GRB sur les caractéristiques à court et à long terme des matériaux cimentaires (béton mortier). La seconde partie est dédiée à une approfondie sur l'effet des granulats recyclés sur le comportement des BAP à l'état frais et durcis. La troisième partie consiste la modélisation des différents phénomènes de plusieurs chercheurs à l'aide de logiciel JMP.

On a conclu qu'on peut affirmer clairement que l'utilisation des GRB dans la production des BAP est possible.

### **Mots clés :**

Béton autoplaçant, granulats recyclés, matériaux cimentaire, écologique, résistance, absorption d'eau, modélisations.

## Abstract

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

The demolition of concrete structures and the building materials industry are always accompanied by secondary products or wastes. The recycled aggregates (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 changed the flow capacity, strength and deformability of BAPs ... etc.

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

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

### **Keywords :**

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

## ملخص

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

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

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

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

### الكلمات الدالة

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

# Table des matières

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

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

## **Chapitre 2 : Chapitre 2 : Effet des GRB sur le comportement des bétons**

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Effet des GRB sur le comportement des bétons .....</b>	<b>19</b>
2.1	Effet des GRB sur le comportement à l'état frais .....	19
2.1.1	La densité et la teneur en air des bétons recyclés .....	20
2.1.2	Ouvrabilité du béton recyclé .....	21
2.1.3	Retrait plastique .....	22
2.2	Effet des GRB sur le comportement à l'état durci.....	22
2.2.1	Performances mécaniques .....	22
2.2.2	Résistance à la fatigue.....	24
2.3	Effet des GRB sur la durabilité des bétons.....	24
2.3.1	Retrait .....	25
2.3.2	Absorption d'eau des bétons .....	26
2.3.3	Carbonatation.....	26
2.3.4	Résistance aux Attaques chimiques .....	27
2.3.5	Résistance aux cycles de gel-dégel .....	27
<b>3</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>Références .....</b>	<b>29</b>

## Chapitre 3 : Effet des granulats recyclés sur le comportement et la durabilité des BAP

---

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>Effet des GRB sur les propriétés des BAP à l'état frais .....</b>	<b>34</b>
2.1	Ouvrabilité et vitesse d'écoulement en l'absence d'obstacles .....	34
2.2	Viscosité et capacité de remplissage .....	36
2.3	Essai L-box .....	37
2.4	Essai de stabilité au tamis (ségrégation).....	38
<b>3</b>	<b>Effet des GRB sur les propriétés des BAP à l'état durcis .....</b>	<b>39</b>
3.1	Densité apparente.....	39
3.2	Résistance à la compression.....	39
3.3	Résistance à la traction par flexion .....	40
3.4	Retrait .....	41
<b>4</b>	<b>Durabilité .....</b>	<b>42</b>
4.1	Diffusion du chlorure.....	42
<b>5</b>	<b>Bilan et conclusion .....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Référence.....</b>	<b>43</b>

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

---

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>41</b>
<b>2</b>	<b>Plan d'expérience.....</b>	<b>41</b>
2.1	Définition.....	41
2.2	Intérêts des plans d'expériences : .....	41
2.3	Types de plans d'expériences : .....	41
2.3.1	Plans factoriels complets :.....	42
2.3.2	Plans factoriels complets à deux niveaux.....	42
2.3.3	Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres.....	42
2.3.4	Plans fractionnaires .....	42
<b>3</b>	<b>Modélisation des résultats expérimentaux de (Santos et al., 2019) .....</b>	<b>43</b>
3.1	Modélisation T.V-funnel.....	43
3.1.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées .....	43
3.1.2	Expression de la prevision .....	45
3.1.3	surface de réponse.....	46
3.2	Modélisation de la résistance à la compression.....	46
3.2.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées .....	47
3.2.2	Expression de la prévision .....	48
3.2.3	Surface de réponse .....	49
<b>4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Référence.....</b>	<b>50</b>

## Liste des figures

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

Figure 1. 1 Schématisation d'un granulat recyclé (Xiao et coll., 2011). .....	4
Figure 1. 2 Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.....	5
Figure 1. 3 Agrégats recyclés mixtes. ....	6
Figure 1. 4 Flottation du type « aquamator » .....	7
Figure 1. 5 Concassage des déchets de démolition. ....	7
Figure 1. 6 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché thomas. ...	9
Figure 1. 7 Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton (Tam et al., 2008]. .....	10
Figure 1. 8 Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité.....	10
Figure 1. 9 Variation de la densité et de l'absorption d'eau des bétons contiennent des GR traités et non traité. ....	12

### Chapitre 2 : Effet des GRB sur le comportement des bétons

Figure 2. 1 Effet des GRB sur la densité des bétons(Pereira, Evangelista and De Brito, 2012). ....	20
Figure 2. 2 Effet des GRB sur la teneur en air des bétons(Tahar et al., 2017). ....	20
Figure 2. 3 Effet de la teneur des GRB et le rapport de E/C sur l'affaissement des bétons(Pereira, Evangelista and De Brito, 2012). ....	21
Figure 2. 4 Effet de la teneur des GRB sur la résistance à la compression et à la traction des bétons (Meddah, 2017). ....	23
Figure 2. 5 Effet de la teneur des GRB sur la capacité des déformations des bétons(Pereira, Evangelista and De Brito, 2012). ....	24
Figure 2. 6 Effet de différent type de granulats sur le retrait de séchage des bétons. ....	25
Figure 2. 7 Effet de la teneur des GRB différent sur le retrait de séchage des bétons. ....	26
Figure 2. 8 Influence du carbonations sur le béton à base des granulats recyclés.....	27

## Chapitre 3 : Effet des granulats recyclés sur le comportement et la durabilité des BAP

Figure3. 1 Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP (Safiuddin et al., 2011).....	35
Figure3. 2 Effet des GRB sur T500 (S) des BAP (Tuyan et al., 2014).....	36
Figure3. 3 Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP de différents travaux de recherches. .....	36
Figure3. 4 Effet des GRB sur le temps d'écoulement de V-funnel des BAP. ....	37
Figure3. 5 Effet des GRB sur le rapport du blocage de la boîte en L des BAP. ....	38
Figure3. 6 Effet des GRB sur l'indice de ségrégation des BAP. ....	39
Figure3. 7 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP. ...	40
Figure3. 8 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP (travaux de la littérature). ....	40
Figure3. 9 Effet des GRB sur la résistance à la traction par flexion des BAP. ....	41
Figure3. 10 Effet des GRB sur le retrait des BAP.....	41
Figure3. 11 Effet des GRB sur la diffusion des chlorures des BAP.....	42

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

Figure 4. 1 Effet des GBR sur V-funnel des BAP(Santos et al., 2019). ....	43
Figure 4. 2 Relation entre les valeurs du temps de V-funnel expérimentales et celles de la simulation. .....	44
Figure 4. 3 Surface de réponse entre V-funnel, GRB et E/C.....	46
Figure 4. 4 Effet des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Santos et al., 2019).....	46
Figure 4. 5 Relation entre les valeurs de la résistance à la compression expérimentales et celles de la simulation. ....	47
Figure 4. 6 Surface de réponse entre E/C, GRB et RC.....	49

## Liste des tableaux

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

Tableau 1. 1 Pourcentage des différents déchets (Vachon et coll., 2009). ....	4
Tableau 1. 2 Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés [Hansen, 1992].....	9

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

Tableau 4. 1 Résumé de l'ajustement.....	44
Tableau 4. 2 Testes des effets .....	44
Tableau 4. 3 Analyse de la variance .....	45
Tableau 4. 4 Résumé de l'ajustement.....	47
Tableau 4. 5 Tests des effets.....	48
Tableau 4. 6 Analyse de la variance .....	48

## INTRODUCTION GENERALE

L'industrie du béton a une énorme empreinte écologique sur la planète. Tout d'abord, l'épuisement progressif des ressources naturelles due aux volumes importants de matière première nécessaire pour produire les milliards de tonnes de béton dans le monde chaque année. Ensuite, les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées lors de la production de ciment Portland. Outre Dans un contexte de développement durable et de gestion optimale des déchets relatifs au domaine de la construction, il est primordial d'étudier les possibilités d'amélioration des procédés actuels de recyclage du béton. En effet, les déchets de construction ne cessent de croître au fil des années, à l'inverse des ressources naturelles telles que les roches sédimentaires. Recycler et valoriser ces déchets en granulats recyclés (GR) afin de créer une économie circulaire incluant la fabrication de bétons prêts à l'emploi ou de blocs préformés de type hourdis devient donc une nécessité. Cette nécessité est non seulement accentuée par le fait que le béton représente le matériau de construction le plus utilisé actuellement à travers le monde mais également par le fait que les granulats représentent une part importante dans la constitution de ce béton, avec un pourcentage volumique s'élevant à 75% du volume total du béton.

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 de béton recyclé (GBR) : comment sont-ils produits, quelles sont leurs caractéristiques principales, quelles sont leurs avantages et leurs inconvénients. De plus on montrera quelques propositions afin d'améliorer ces granulats ;
- Le chapitre II explique l'effet des GBR sur le comportement des bétons à l'état frais et durci. On va regrouper différents travaux de recherche qui s'intéressent aux différents phénomènes au court et à long terme sur l'effet des GBR sur les bétons ordinaires ;
- Le chapitre III fournit des travaux de littératures sur l'effet des GBR sur le comportement et la durabilité des bétons autoplaçants.
- Le chapitre IV : consiste la modélisation des différents phénomènes de plusieurs chercheurs 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

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

## Liste des figures

<b>Figure 1. 1</b>	Schématisation d'un granulats recyclé. ....	<b>4</b>
<b>Figure 1. 2</b>	Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton. ....	<b>5</b>
<b>Figure 1. 3</b>	Agrégats recyclés mixtes.....	<b>6</b>
<b>Figure 1. 4</b>	Flottation du type « aquamator » .....	<b>7</b>
<b>Figure 1. 5</b>	Concassage des déchets de démolition.....	<b>7</b>
<b>Figure 1. 6</b>	Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la quantité de mortier attaché(Fiandaca, 2015).....	<b>9</b>
<b>Figure 1. 7</b>	Interface granulats naturel/pâte de ciment d'un granulats recyclé de béton (Tam et al., 2008). .....	<b>10</b>
<b>Figure 1. 8</b>	Relation entre le coefficient d'absorption d'eau et la densité (Silva et al., 2014). ....	<b>10</b>
<b>Figure 1. 9</b>	Variation de la densité et de l'absorption d'eau des bétons contiennent des GR traités et non traité(Dilbas et al., 2019). ....	<b>12</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1. 1</b>	Pourcentage des différents déchets (Vachon et coll., 2009). ....	<b>4</b>
<b>Tableau 1. 2</b>	Caractéristiques de granulats naturels et de granulats recyclés (Hansen, 1992). ....	<b>Error!</b>

Bookmark not defined.

## 1 Introduction

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

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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.

## 2 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.

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

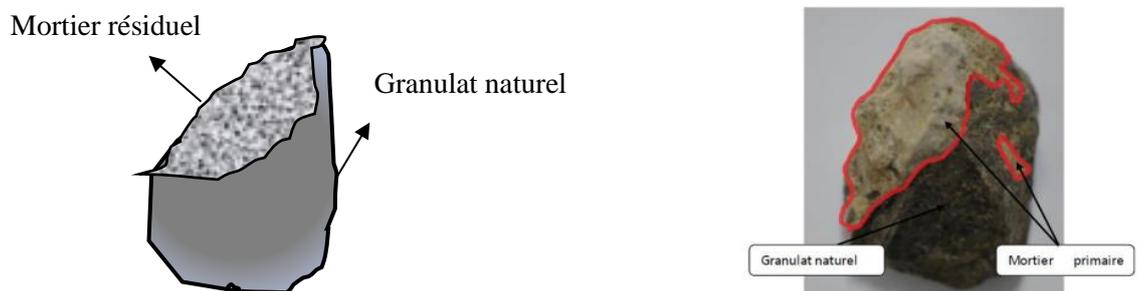
déchets de construction et de démolition. De plus ils sont classés selon la disponibilité et les exigences.

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.

### 3 Historique des granulats recyclés

L'utilisation des granulats recyclés issus de la démolition d'anciens béton 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).

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. (Poon *et al.*, 2002)

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).

#### 4 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).

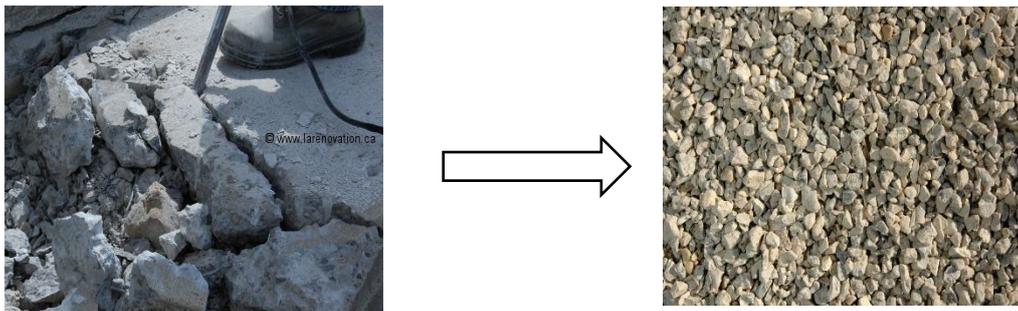


Figure 1. 2 Agrégats recyclés dérivés essentiellement de béton.

##### ✚ 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

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).

## **5 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 :

- 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);
- 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.

### 6 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 recyclés 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)				% volumique de mortier attaché aux particules naturelles
		Masse volumique (kg/m3)	Absorption d'eau (%)	Perte par abrasion Los Angeles (%) (L500)	
Gravillon naturel initial	4-8	2500	3,7	25,9	0
	8-16	2620	1,8	22,7	0
	16-32	2610	0,8	18,8	0
Recyclé 1	4-8	2340	8,5	30,1	58
	8-16	2450	5,0	26,7	38
	16-32	2490	3,8	22,4	35
Recyclé 2	4-8	2350	8,7	32,6	64
	8-16	2440	5,4	29,2	39
	16-32	2480	4,0	25,4	28

\*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).

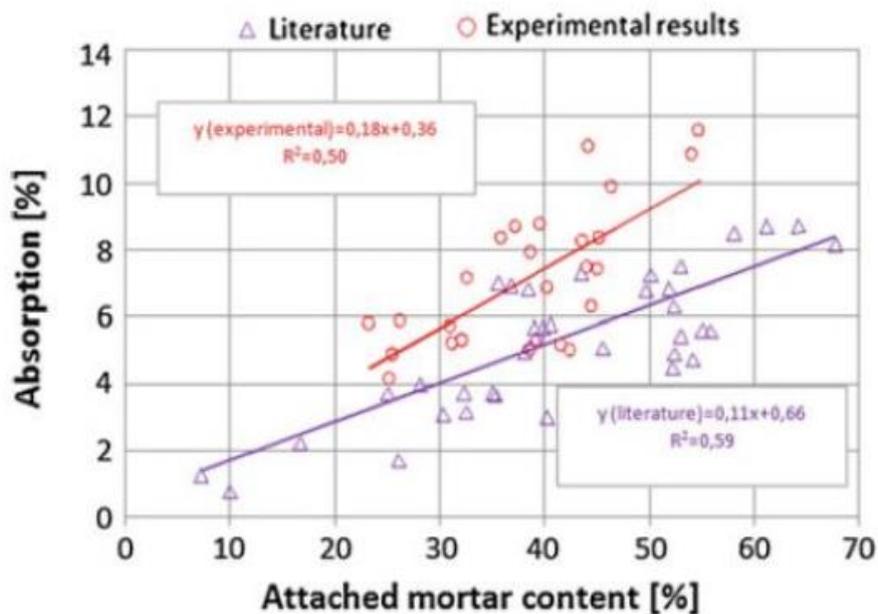
## 6.1 Masse volumique

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 situent généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m<sup>3</sup>) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m<sup>3</sup>).

## 6.2 Absorption d'eau porosité

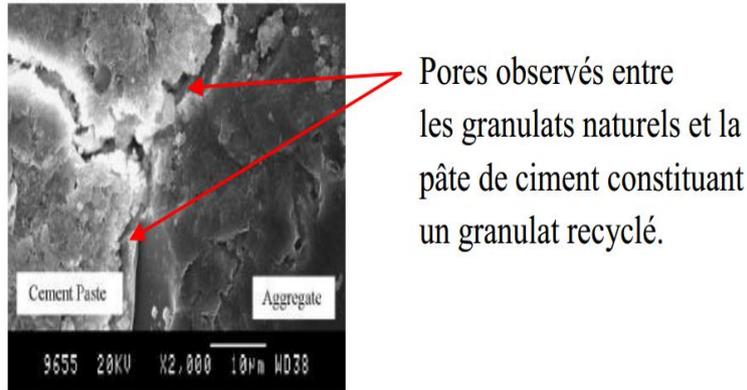
Selon plusieurs chercheurs (Rakshvir and Barai, 2006) l'absorption d'eau des agrégats recyclés est supérieure aux agrégats naturels, et cela doit être compensé pendant la conception des bétons. (Gayarre *et al.*, 2013) ont montré que la présence plus importante du mortier résiduel provoque une augmentation 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).

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 la porosité élevée des GR. Ces substances sont également liées

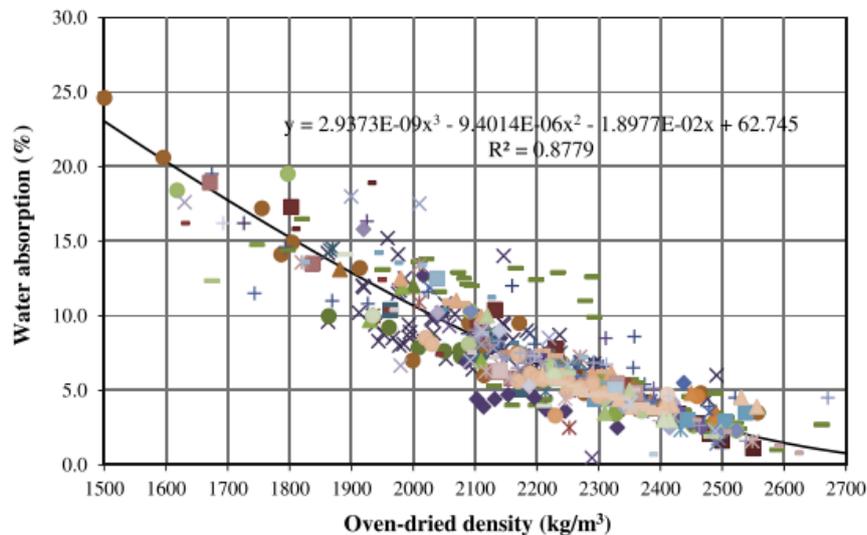
aux valeurs de la densité et affectent le comportement du béton à base de GR à l'état frais et durci.



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

### 6.3 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).

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 agrégats se situe entre 1500 kg / m<sup>3</sup> et 2900 kg / m<sup>3</sup>. Par conséquent, à la lumière de ces résultats, la courbe polynomiale

présentée sur la figure 1.8 peut être considéré comme un modèle général de prévision de la nature de l'agrégat.

#### **6.4 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).

### **7 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.

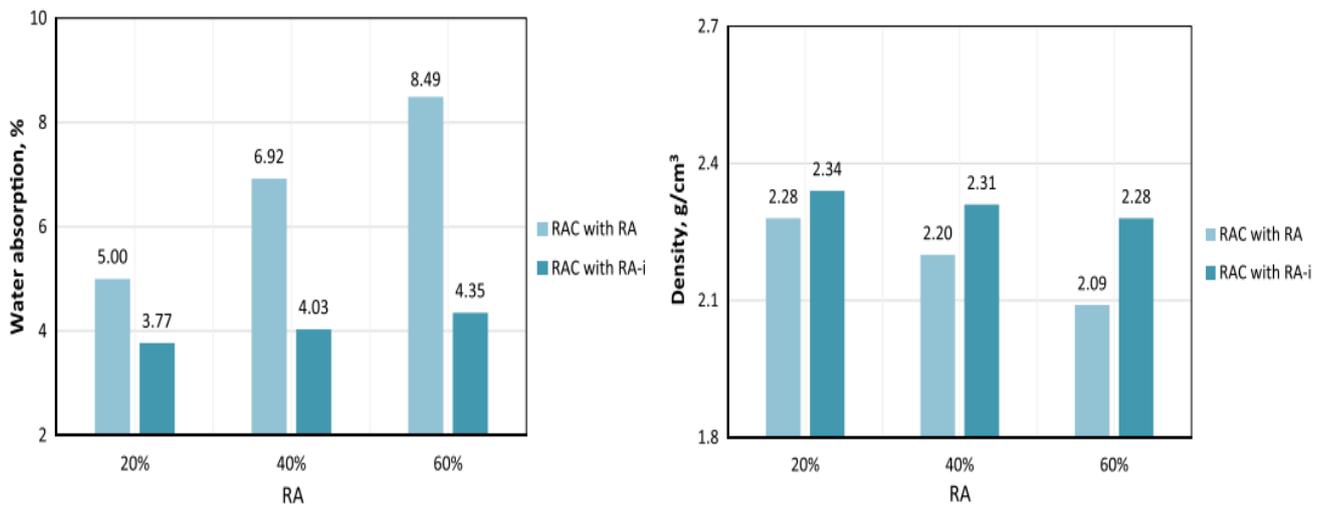
Espérant encourager et promouvoir l'utilisation des GR le gouvernement et les agences du monde entier ont souvent introduit des prélèvements et des lois pour tenter de surmonter les obstacles, avec des degrés divers de succès.

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.

### 8 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).

## 9 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.

## 10 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 Atış, C. (2019), "Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method", *Construction and Building materials*, Vol. 212, pp. 716-26.
- DIN, D. (2002). 4226-100. Aggregates for concrete and mortar—part 100: recycled aggregates. Berlin.
- Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M., Serna, P. and Castaño-Tabares, J.O. (2009), "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete", *Construction and Building materials*, Vol. 23 No. 7, pp. 2545-53.
- Eiad-Ua, A., Shirai, T., Kato, T., Orito, K., Watanabe, H., Fuji, M. et al. (2010), "Novel fabrication route for porous ceramics using waste materials by non-firing process", *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 118 No. 1380, pp. 745-48.
- Evangelista, L. and de Brito, J. (2007), "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and concrete composites*, Vol. 29 No. 5, pp. 397-401.
- Fiandaca, T. (2015), "Prétraitement et fonctionnalisation de la surface des granulats recyclés pour la fabrication de bétons".
- Gabr, A. and Cameron, D. (2012), "Properties of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24 No. 6, pp. 754-64.
- Gayarre, F.L., López-Colina, C., Serrano, M. and López-Martínez, A. (2013), "Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW", *Construction and Building materials*, Vol. 40, pp. 1193-99.
- Guedes, M., Evangelista, L., De Brito, J. and Ferro, A.C. (2013), "Microstructural characterization of concrete prepared with recycled aggregates", *Microscopy and Microanalysis*, Vol. 19 No. 5, p. 1222.

- Hansen, T.C. (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press.
- Kou, S.-C. and Poon, C.-S. (2010), "Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32 No. 8, pp. 649-54.
- Kou, S.-c., Poon, C.-s. and Agrela, F. (2011), "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33 No. 8, pp. 788-95.
- LE CONSEIL, D.L.U.E. (2011), "RÈGLEMENT (UE) No 333/2011 DU CONSEIL du 31 mars 2011 établissant les critères permettant de déterminer à quel moment certains types de débris métalliques cessent d'être des déchets au sens de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil", *Revue du Droit de l'Union Européenne*, p. 317.
- Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S. and Shah, S.P. (2012), "Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1045-55.
- Meddah, M.S. "Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact". MATEC Web of Conferences 2017, EDP Sciences.
- Montero, A., Tojo, Y., Matsuo, T., Matsuto, T., Yamada, M., Asakura, H. et al. (2010), "Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs", *Journal of hazardous materials*, Vol. 175 No. 1-3, pp. 747-53.
- Neto, R.O., Gastineau, P., Cazacliu, B.G., Le Guen, L., Paranhos, R.S. and Petter, C.O. (2017), "An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms", *Waste management*, Vol. 60, pp. 277-89.
- Nixon, P. (1978), "Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review", *Matériaux et Construction*, Vol. 11 No. 5, p. 371.
- Pacheco-Torgal, F. and Labrincha, J. (2013), "Biotech cementitious materials: Some aspects of an innovative approach for concrete with enhanced durability", *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 1136-41.
- Pedro, D., De Brito, J. and Evangelista, L. (2017), "Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: Use of densified silica fume as cement replacement", *Construction and Building Materials*, Vol. 147, pp. 803-14.
- Petavratzi, E. and Wilson, S. (2007), "Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing technologies—Integrated waste management for the production of construction material", *Case Study: Foundry dust in facing bricks*, *Smartwaste website [online]* [http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/Brick\\_foundry\\_sand.pdf](http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/Brick_foundry_sand.pdf) (accessed 12 April 2008).
- Poon, C.-S. and Chan, D. (2007), "The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 50 No. 3, pp. 293-305.
- Poon, C., Kou, S. and Lam, L. (2002), "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks", *Construction and Building Materials*, Vol. 16 No. 5, pp. 281-89.
- Poon, C.S., Shui, Z. and Lam, L. (2004), "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 18 No. 6, pp. 461-68.
- Quattrone, M., Angulo, S.C. and John, V.M. (2014), "Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production", *Resources, conservation and recycling*, Vol. 90, pp. 21-33.
- Rakshvir, M. and Barai, S.V. (2006), "Studies on recycled aggregates-based concrete", *Waste Management & Research*, Vol. 24 No. 3, pp. 225-33.
- Silva, R.V., De Brito, J. and Dhir, R. (2014), "Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production", *Construction and Building materials*, Vol. 65, pp. 201-17.

- Sim, J. and Park, C. (2011), "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate", *Waste management*, Vol. 31 No. 11, pp. 2352-60.
- Soumah, D.M.B.S., Mouloukou (2019), "Etat de l'art sur les bétons à base de recyclât: Perspectives pour l'Algérie".
- Tam, V.W., Gao, X. and Tam, C.M. (2005), "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach", *Cement and concrete research*, Vol. 35 No. 6, pp. 1195-203.
- Tam, V.W., Wang, K. and Tam, C.M. (2008), "Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152 No. 2, pp. 703-14.
- Thomas, C., Sosa, I., Setién, J., Polanco, J.A. and Cimentada, A.I. (2014), "Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete", *Journal of cleaner production*, Vol. 65, pp. 397-405.
- Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A. and Duan, Z. (2018), "Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 188, pp. 720-31.
- Xing, W. and Hendriks, C. (2006), "Decontamination of granular wastes by mining separation techniques", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 14 No. 8, pp. 748-53.

## **CHAPITRE 2**

---

# **EFFET DES GRB SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS**

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Effet des GRB sur le comportement des bétons.....</b>	<b>19</b>
2.1	Effet des GRB sur le comportement à l'état frais.....	19
2.1.1	La densité et la teneur en air des bétons recyclés .....	20
2.1.2	Ouvrabilité du béton recyclé .....	21
2.1.3	Retrait plastique.....	22
2.2	Effet des GRB sur le comportement à l'état durci.....	22
2.2.1	Performances mécaniques .....	22
2.2.2	Résistance à la fatigue .....	24
2.3	Effet des GRB sur la durabilité des bétons.....	24
2.3.1	Retrait .....	25
2.3.2	Absorption d'eau des bétons .....	26
2.3.3	Carbonatation .....	26
2.3.4	Résistance aux Attaques chimiques.....	27
2.3.5	Résistance aux cycles de gel-dégel.....	27
<b>3</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>Références .....</b>	<b>29</b>

## Liste des Figures

<b>Figure 2. 1</b> Effet des GRB sur la densité des bétons(Pereira, Evangelista and De Brito, 2012). ....	20
<b>Figure 2. 2</b> Effet des GRB sur la teneur en aire des bétons(Tahar et al., 2017). ....	20
<b>Figure 2. 3</b> Effet de la teneur des GRB et le rapport de E/C sur l'affaissement des bétons(Pereira, Evangelista and De Brito, 2012). ....	21
<b>Figure 2. 4</b> Effet de la teneur des GRB sur la résistance à la compression et à la traction des bétons (Meddah, 2017). ....	23
<b>Figure 2. 5</b> Effet de la teneur des GRB sur la capacité des déformations des bétons(Pereira, Evangelista and De Brito, 2012). ....	24
<b>Figure 2. 6</b> Effet de différent type de granulats sur le retrait de séchage des bétons.....	25
<b>Figure 2. 7</b> Effet de la teneur des GRB différent sur le retrait de séchage des bétons.....	26
<b>Figure 2. 8</b> Influence du carbonations sur le béton à base des granulats recyclés.....	27

## 1 Introduction

Dans le monde, avec trois tonnes par personne et par an, le béton est le matériau manufacturé le plus consommé. Cette position trouve sa justification dans le faible coût énergétique et donc économique lié à sa fabrication ainsi que dans la disponibilité de ses composants partout à la surface de notre planète. Cependant, dans un objectif de développement durable, une telle position en termes de fabrication et de consommation fait de la relation avec l'environnement de ce matériau une question majeure assez visqueux.

La majorité des applications de granulats recyclés (GRB) issus de produits de démolition trouvent essentiellement des débouchés dans le domaine routier, mais une meilleure connaissance du comportement des bétons incluant de tels granulats peut contribuer au développement de cette application. Et, ceci ne peut se faire que par la maîtrise des propriétés rhéologiques du béton frais. Dans ce contexte, le travail présenté apporte une contribution à la valorisation des déchets de la déconstruction comme source de granulats pour le béton hydraulique. Il permet de proposer un matériau gardant une morphologie correcte lors de sa mise en place. Des solutions sont proposées pour le caractère absorbant des granulats recyclés et qui peut être une entrave pour le comportement rhéologique si le béton subi une attente avant sa mise en œuvre.

## 2 Effet des GRB sur le comportement des bétons

### 2.1 Effet des GRB sur le comportement à l'état frais

Propriétés du béton à l'état frais par rapport à des bétons de granulats naturels, les bétons de recyclés présentent des particularités de formulation :

- La granularité des granulats peut faire apparaître des teneurs en fines importantes, en particulier lorsque le sable recyclé est utilisé ;
- La masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels, du fait de leur teneur en mortier (voir le chapitre 1);
- Les granulats recyclés étant obtenus par concassage, leur rugosité de surface est importante, et leur compacité relativement faible. Ceci est un autre facteur tendant à augmenter la demande en eau efficace ;
- La demande en eau totale du béton est encore accrue par l'absorption d'eau importante des granulats recyclés.

### 2.1.1 La densité et la teneur en aire des bétons recyclés

La masse volumique est généralement plus faible que celle des bétons classiques, du fait de la quantité du mortier ancien jouant le rôle de granulat. Les valeurs reportées sont en général comprises entre 2000 et 2200 kg/m<sup>3</sup> (Pereira *et al.*, 2012) (Tahar *et al.*, 2017).

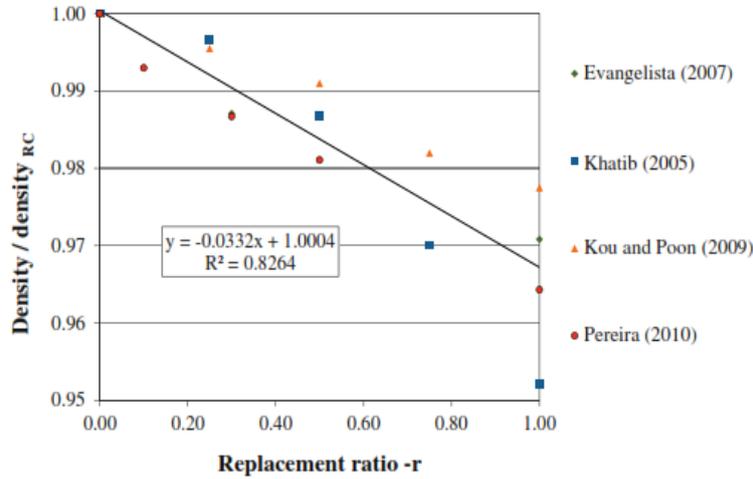


Figure 2. 1 Effet des GRB sur la densité des bétons(Pereira *et al.*, 2012).

La forme et la rugosité des granulats peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration. C'est ainsi qu'un moyenne, certains auteurs trouvent des teneurs en air occlus légèrement plus importantes dans les bétons de granulats recyclés, l'écart étant de l'ordre de 0,6% (Pereira *et al.*, 2012, Khatib, 2005).

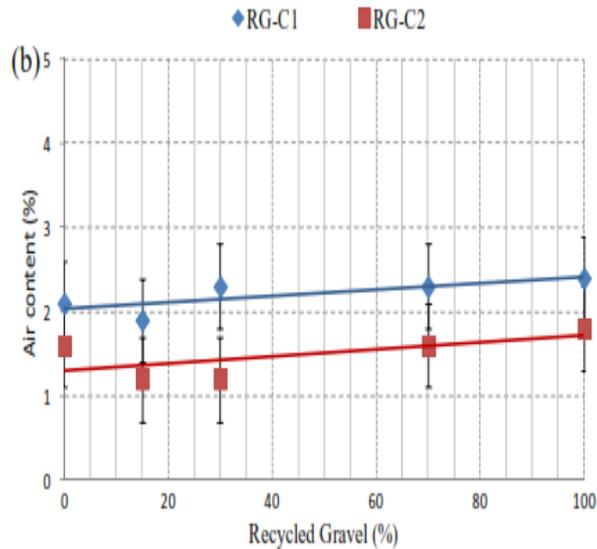
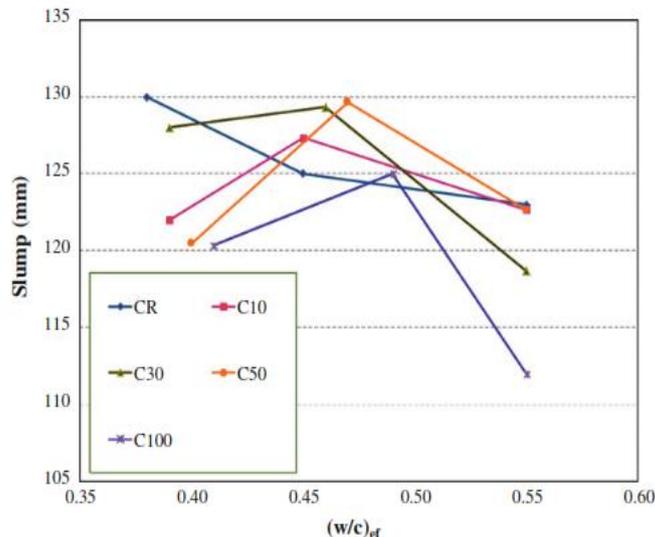


Figure 2. 2 Effet des GRB sur la teneur en aire des bétons(Tahar *et al.*, 2017).

### 2.1.2 Ouvrabilité du béton recyclé

La conséquence la plus importante de l'utilisation de GR sur les bétons frais est l'influence de leur ouvrabilité. En effet, pour un rapport eau/ciment identique, l'ouvrabilité d'un béton réalisé à base de GR sera inférieure à l'ouvrabilité d'un béton réalisé exclusivement à base de GN. (Mukai *et al.*, 1978) a montré que pour atteindre le même affaissement qu'un béton de référence réalisé à base de granulats grossiers et sable naturels, un béton réalisé à base de granulats grossiers recyclés et de sable naturel requiert 5% d'eau supplémentaire lors du mélange. (Topcu, 1997) a étudié des échantillons de béton avec différents pourcentages de GR. L'auteur a constaté que les particules de GR ont une densité de  $2450 \text{ kg/m}^3$ , et une absorption d'eau en 30 min de 7%. Il a été signalé que les valeurs de l'affaissement ont diminué en fonction de l'augmentation du pourcentage des GR. Certains auteurs préconisent d'ailleurs de pré-saturer par immersion dans l'eau les granulats recyclés avant utilisation prêt-à-emploi (Coutinho and Gonçalves, 1988). (Günçan, 1995) ont montré que l'ouvrabilité des bétons à base de GR était faible, en raison de la l'absorption d'eau élevée des déchets de granulats. (Tahar *et al.*, 2017) ont limité les inconvénients associés avec les performances du béton contenant des granulats de béton recyclés fins grâce à l'utilisation de superplastifiants.



**Figure 2. 3** Effet de la teneur des GRB et le rapport de E/C sur l'affaissement des bétons(Pereira *et al.*, 2012).

La réduction du rapport eau efficace/ciment, et la présence d'alcalins libérés par les granulats recyclés est un facteur de diminution du temps de prise (Hansen, 1992), mais l'usage de superplastifiant agit dans le sens inverse.

### 2.1.3 Retrait plastique

Ce phénomène est lié aux conditions atmosphériques, au ressuage et à la cure dont le matériau fait l'objet dès sa mise en œuvre. La présence de fine en quantité importante et l'absorption différée d'eau par les granulats réduit le ressuage (Hansen, 1992) et augmente donc le risque de retrait plastique en cas de cure insuffisante.

## 2.2 Effet des GRB sur le comportement à l'état durci

(Rakshvir and Barai, 2006) ont rapporté que les propriétés d'ancien béton influencent sur les propriétés mécaniques des nouveaux bétons à base de granulats recyclés. Ainsi, il est possible d'obtenir d'un béton recyclé avec une résistance à la compression plus élevée que le béton d'origine.

De plus, la procédure de la conception du mélange de béton recyclé est similaire au celle du béton avec granulats naturels. La correction de la teneur en eau est nécessaire pour obtenir une bonne ouvrabilité, mais les changements dans le rapport eau / ciment (E / C) peuvent être relativement petit.

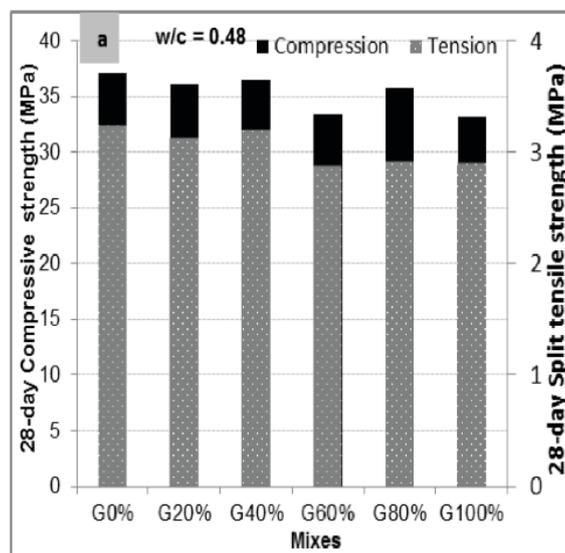
On s'intéresse dans cette partie tout particulièrement à l'étude du comportement et des caractéristiques mécaniques des bétons recyclés. Souvent, il s'agit de remplacer une partie ou la totalité des gravillons naturels par des gravillons recyclés (Etxeberria *et al.*, 2007). Quelques travaux traitent, également, des bétons formulés avec du sable recyclé (Evangelista and De Brito, 2010). Très peu d'études concernent des bétons formulés avec l'ensemble des granulats (sable+gravier) recyclés (Lo *et al.*, 2008). Une synthèse bibliographique des corrélations entre les différentes caractéristiques mécaniques a été publiée par Li(Li, 2008).

### 2.2.1 Performances mécaniques

Résistance à la traction et surtout à la compression du béton sont les deux principales performances mécaniques requises pour la conception structurelle en béton.

(Poon *et al.*, 2002), dans leur étude, ont utilisé des agrégats recyclés des déchets de construction et de démolition provenant de deux zones de remplissages publiques. Différents mélanges ont été utilisés en variant le taux de substitutions des granulats fins et grossier naturels par les granulats recyclés jusqu'à 100%. Les résultats ont montré que le remplacement d'agrégats naturels grossiers et fins par des agrégats recyclés aux niveaux de 25 et 50% ont eu peu d'effet sur la résistance à la compression des briques et des blocs. Par contre des niveaux de remplacement plus élevés ont réduit la résistance à la compression.(Sri Ravindrarajah *et al.*,

1987) ont montré que la présence des granulats recyclés dans le béton provoque une réduction de la résistance et le module d'élasticité avec de 10% et 35% respectivement. Ceci est dû au mortier résiduel qui reste attaché aux particules d'agrégats naturels dans les agrégats recyclés étant moins résistants aux actions mécaniques.



**Figure 2. 4** Effet de la teneur des GRB sur la résistance à la compression et à la traction des bétons (Meddah, 2017).

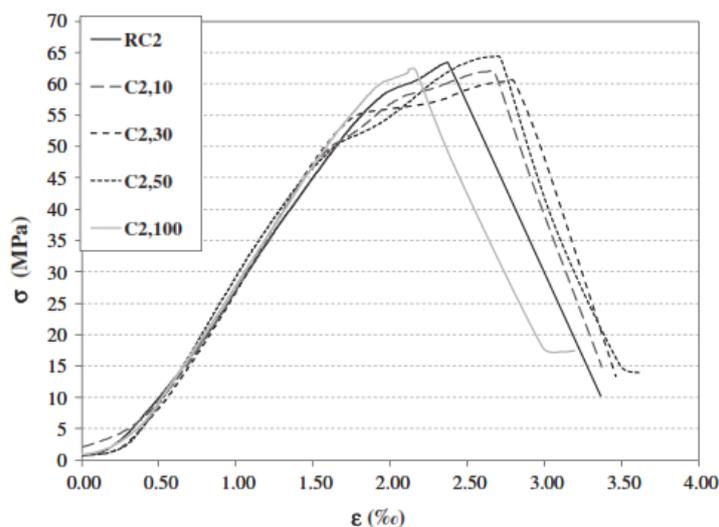
Les résistances à la compression et à la traction des bétons à base de granulats recyclés à 28 jours sont données sur la figure. Le remplacement total des granulats naturels grossiers ou fins par des granulats recyclés conduit à une réduction de la résistance mécanique. Cette réduction de résistance est fortement affectée par les propriétés des granulats recyclés, leur processus de production et la matière première à partir de laquelle ils ont été recyclés.

Certains chercheurs ont trouvé une faible diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement des graviers est inférieur ou égal à 25% et le sable inférieur à 30% (Casuccio *et al.*, 2008). Généralement, cette diminution est attribuée à une porosité plus importante dans les bétons de granulats recyclés et une mauvaise interface granulats/liant.

Les résultats issus des essais de traction uni-axiale, de fendage et de flexion ont montré que la résistance à la traction diminue également en augmentant le taux de substitution en granulats recyclés (Evangelista and de Brito, 2007). Les relations empiriques établies entre la résistance à la flexion et compression des bétons naturels selon les codes ACI, CEB ou chinois ne peuvent pas être appliquées aux bétons à granulats recyclés (Xiao *et al.*, 2006).

Les essais de flexion conduits par (Casuccio *et al.*, 2008) montrent que l'énergie de rupture des bétons à granulats recyclés est inférieure à celle des bétons à granulats naturels (27–45%). Les

mécanismes de rupture semblent dépendre de la nature du béton de démolition (Evangelista and de Brito, 2007). Une étude de (Corinaldesi and Moriconi, 2009) montrent que la résistance à 28 jours est la même pour le béton avec des granulats recyclés que des bétons avec des granulats naturels pour un rapport E/C élevé (0,7). D'autres études réalisées avec des rapports E/C inférieurs à 0,7 ont trouvé une baisse des résistances de 10% des béton à base de GR par rapport aux béton avec des GN (Rahal, 2007).



**Figure 2. 5** Effet de la teneur des GRB sur la capacité des déformations des bétons (Pereira *et al.*, 2012).

Selon (Pereira *et al.*, 2012) la loi de comportement contrainte / déformation de différents mélanges étudiés n'ont pas révélé une grande différence après l'incorporation des GR.

### 2.2.2 Résistance à la fatigue

Très peu de travaux traitent de la résistance à la fatigue des bétons recyclés. Il semble, d'après Kawamura et col, que la résistance à la fatigue en flexion des bétons fabriqués avec du sable naturel et des graviers recyclés est supérieure à celle d'un béton normal, du fait de la liaison forte qui existe entre la matrice cimentaire (où se produit la rupture) et les granulats recyclés (Etxeberria *et al.*, 2007).

### 2.3 Effet des GRB sur la durabilité des bétons

La durabilité du béton peut être évaluée par différents de tests et d'essais. Les tests les plus courants utilisés pour évaluer la durabilité sont la résistance aux attaques chimiques comme le chlorure, le sulfate ou les acides. En outre, le retrait (endogène et séchage) est l'un des problèmes graves liés à la durabilité des structures en béton car un retrait excessif peut entraîner

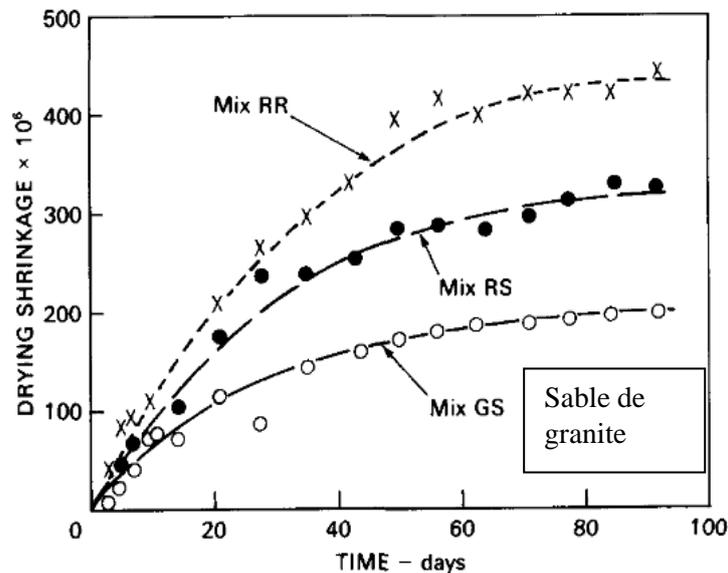
une fissuration du béton (Meddah, 2017). Les fissures dans le béton peuvent réduire la capacité de la structure. De plus, elles sont également le principal facteur qui permet de la pénétration des matières nocives telles que le sulfate, les ions de chlorure, le dioxyde de carbone et les acides.

De nombreuses études ont été réalisées pour étudier la durabilité du béton contenant des granulats recyclés.

### 2.3.1 Retrait

Le retrait au séchage est augmenté fois deux lorsque des agrégats recyclés sont utilisés à la place des agrégats naturels dans des mélange en béton (Sri Ravindrarajah *et al.*, 1987) (voir la figure 2.6)

Du fait de la forte présence mortier résiduel à la surface des granulats et la forte porosité de ceux-ci, les déformations de fluage et de retrait de séchage sont nettement supérieures à celles des bétons à granulats naturels (Domingo-Cabo *et al.*, 2009). Le modèle établi dans le cadre du CEB-FIB semble le mieux adapté pour la description des déformations différées des bétons, avec des taux de substitution en granulats recyclés supérieurs à 20 %.



**Figure 2. 6** Effet de différent type de granulats sur le retrait de séchage des bétons (Sri Ravindrarajah *et al.*, 1987).

D'une manière générale, et al ont été constaté que le remplacement des granulats naturels par le GRB pourrait augmenter le retrait de séchage du béton (Meddah, 2017). Cependant, le remplacement total du NA par du GRB peut avoir une augmentation double du retrait (voir la Fig.2.7). Cette augmentation significative des déformations de retrait dans le béton conçu avec GRB est entièrement attribuée au mortier résiduel collé sur le GRB. Une des solutions qu'ont

été proposées pour surmonter cette déformation excessive est de réduire le volume de ce mortier et d'augmenter la portion des granulats solides dans la fabrication des GRB.

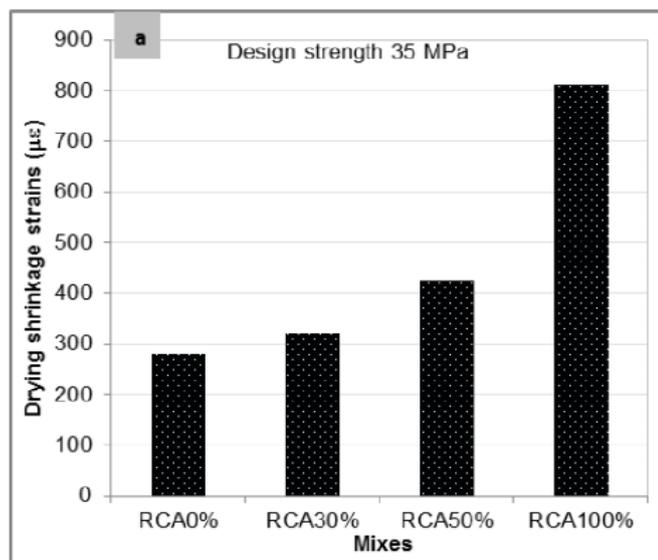


Figure 2. 7 Effet de la teneur des GRB différent sur le retrait de séchage des bétons(Meddah, 2017).

### 2.3.2 Absorption d'eau des bétons

La porosité totale et la distribution de la taille des pores est l'un des principaux facteurs affectant la durabilité des bétons. La porosité est fortement affectée par de nombreux paramètres liés à la fois à la matrice du ciment et le squelette granulaire. Avec la même matrice du ciment, en utilisant des agrégats recyclés avec un remplacement partiel / total tend à augmenter la porosité du béton. La plupart des GRB augmentent le volume total des pores en raison de la grande porosité du mortier collé sur GRB.

Les absorptions par immersion ou par capillarité sont nettement augmentées dans le cas des bétons de granulats recyclés. Ceci s'applique en particulier à l'absorption par capillarité, du fait d'une plus grande quantité de pores capillaires (de Brito and Alves, 2010).

### 2.3.3 Carbonatation

La carbonatation est particulièrement affectée par l'incorporation de granulats recyclés. La cinétique de carbonatation est plus rapide pour les bétons incorporant du sable issu de béton concassé(Kohno *et al.*, 1999). Les travaux de (Katz, 2003) confirment aussi l'évolution de la carbonatation.

(Pereira *et al.*, 2009) ont montré que le potentiel de corrosion dans les bétons fabriqués avec des granulats recyclés est légèrement supérieur à celui d'un béton conventionnel.



**Figure 2. 8** Influence du carbonations sur le béton à base des granulats recyclés (Pereira et al., 2009).

### **2.3.4 Résistance aux Attaques chimiques**

(Olorunsogo and Padayachee, 2002) ont étudié l'indice de la durabilité tels que la conductivité des chlorures, la perméabilité à l'oxygène et l'absorptivité de l'eau ; de trois mélanges différents de béton contenant 0, 50 et 100% de GRB surveillés à 3, 7, 28 et 56 jours. Ils ont rapporté que, la durabilité du béton a diminué avec l'augmentation des quantités d'agrégats recyclés. Ils ont expliqué ce phénomène par le fait que les fissures créées dans les agrégats recyclés au cours du traitement rendent l'agrégat susceptible à la perméation, la diffusion et l'absorption des fluides. Quelques auteurs (Rasheeduzzafar and Khan, 1984) montrent que le remplacement des gravillons naturels par les gravillons recyclés favorise la pénétration des chlorures. L'imprégnation de ces granulats par une solution de polyvinyle alcool réduit cette migration des chlorures.

Concernant la résistance aux sulfates, l'équipe de (Abbas *et al.*, 2009) ont montré que la résistance aux attaques sulfatiques d'un béton à base de granulats recyclés est similaire (ou légèrement inférieure) à celle d'un béton composé de granulats traditionnels.

### **2.3.5 Résistance aux cycles de gel-dégel**

La majorité des études rapportent que la résistance au gel-dégel d'un béton recyclé est inférieure à celle des bétons conventionnels et qu'elle dépend notamment du degré de saturation en eau du matériau (Malhotra *et al.*, 1989).

D'autres chercheurs (Zaharieva *et al.*, 2003) montrent qu'en utilisant un agent entraîneur d'air, les bétons à base de granulats recyclés peuvent s'avérer une bonne résistance aux cycles gel-dégel que les bétons composés de granulats naturels.

### **3 Conclusion**

D'après cette étude on conclut que les caractéristiques spécifiques des granulats recyclés peuvent entraîner une réduction de la quantité d'eau efficace pour le processus d'hydratation et, ainsi, créer une zone de transition interfaciale plus faible entre les granulats recyclés et la pâte de ciment.

Le contrôle de la qualité du béton à base de GRB peut être effectué en différentes manières : la quantité d'eau et de ciment ; la condition de durcissement ; l'utilisation des additions et des adjuvants. La teneur en eau et le processus du broyage des GRB sont également un aspect considérable. De plus, les GRB utilisée dans le béton peuvent être traités, afin d'améliorer leurs propriétés.

## 4 Références

- Abbas, A., Fathifazl, G., Fournier, B., Isgor, O.B., Zavadil, R., Razaqpur, A.G. et al. (2009), "Quantification of the residual mortar content in recycled concrete aggregates by image analysis", *Materials characterization*, Vol. 60 No. 7, pp. 716-28.
- Casuccio, M., Torrijos, M., Giaccio, G. and Zerbino, R. (2008), "Failure mechanism of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 22 No. 7, pp. 1500-06.
- Corinaldesi, V. and Moriconi, G. (2009), "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 23 No. 8, pp. 2869-76.
- Coutinho, A. and Gonçalves, A. (1988), "Production and properties of concrete", *National laboratory of Civil Engineering, Lisbon*.
- de Brito, J. and Alves, F. (2010), "Concrete with recycled aggregates: the Portuguese experimental research", *Materials and Structures*, Vol. 43 No. 1, pp. 35-51.
- 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.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A. and Barra, M. (2007), "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cement and concrete research*, Vol. 37 No. 5, pp. 735-42.
- 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.
- Evangelista, L. and De Brito, J. (2010), "Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 32 No. 1, pp. 9-14.
- Günçan, N.F. (1995), "Using waste concrete as aggregate", *Cement and concrete research*, Vol. 25 No. 7, pp. 1385-90.
- Hansen, T.C. (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press.
- Katz, A. (2003), "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and concrete research*, Vol. 33 No. 5, pp. 703-11.
- Khatib, J.M. (2005), "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and concrete research*, Vol. 35 No. 4, pp. 763-69.
- Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T. and Mori, H. (1999), "Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete", *Cement and concrete research*, Vol. 29 No. 4, pp. 611-14.
- Li, X. (2008), "Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53 No. 1-2, pp. 36-44.
- Lo, T.Y., Cui, H., Tang, W. and Leung, W.M. (2008), "The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 22 No. 4, pp. 623-28.
- Malhotra, V., Wilson, H. and Painter, K. (1989), "Performance of gravelstone concrete incorporating silica fume at elevated temperatures", *Special Publication*, Vol. 114, pp. 1051-76.
- Meddah, M.S. "Recycled aggregates in concrete production: engineering properties and environmental impact". MATEC Web of Conferences2017, EDP Sciences.
- Mukai, T., Kikuchi, M. and Koizumi, H. (1978), "Fundamental study on bond properties between recycled aggregate concrete and steel bars", *Cement Association of Japan*, Vol. 32.
- Olorunsogo, F. and Padayachee, N. (2002), "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes", *Cement and concrete research*, Vol. 32 No. 2, pp. 179-85.

- Pereira, C.G., Castro-Gomes, J. and de Oliveira, L.P. (2009), "Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete", *Construction and building materials*, Vol. 23 No. 2, pp. 602-08.
- Pereira, P., Evangelista, L. and De Brito, J. (2012), "The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 28 No. 1, pp. 722-29.
- Poon, C., Kou, S. and Lam, L. (2002), "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks", *Construction and Building Materials*, Vol. 16 No. 5, pp. 281-89.
- Rahal, K. (2007), "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", *Building and environment*, Vol. 42 No. 1, pp. 407-15.
- Rakshvir, M. and Barai, S.V. (2006), "Studies on recycled aggregates-based concrete", *Waste Management & Research*, Vol. 24 No. 3, pp. 225-33.
- Rasheeduzzafar, A.K. and Khan, A. (1984), "Recycled concrete-a source of new aggregate", *Journal of the American Society of Testing Materials, Cement, Concrete, and Aggregate*, Vol. 6 No. 1.
- Sri Ravindrarajah, R., Loo, Y. and Tam, C. (1987), "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete", *Magazine of concrete research*, Vol. 39 No. 141, pp. 214-20.
- Tahar, Z.-e.-a., Ngo, T.-T., Bouvet, A., Debieb, F. and Aggoun, S. (2017), "Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 149, pp. 91-102.
- Topcu, I.B. (1997), "Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete", *Cement and concrete research*, Vol. 27 No. 12, pp. 1817-23.
- Xiao, J.-Z., Li, J.-B. and Zhang, C. (2006), "On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview", *Materials and structures*, Vol. 39 No. 6, pp. 655-64.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F. and Wirquin, E. (2003), "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25 No. 2, pp. 223-32.

## **CHAPITRE 3**

---

# **EFFET DES GRANULATS RECYCLES SUR LE COMPORTEMENT ET LA DURABILITE DES BAP**

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>Effet des GRB sur les propriétés des BAP à l'état frais .....</b>	<b>34</b>
2.1	Ouvrabilité et vitesse d'écoulement en l'absence d'obstacles .....	34
2.2	Viscosité et capacité de remplissage .....	36
2.3	Essai L-box.....	37
2.4	Essai de stabilité au tamis (ségrégation).....	38
<b>3</b>	<b>Effet des GRB sur les propriétés des BAP à l'état durcis .....</b>	<b>39</b>
3.1	Densité apparente .....	39
3.2	Résistance à la compression .....	39
3.3	Résistance à la traction par flexion.....	40
3.4	Retrait .....	41
<b>4</b>	<b>Durabilité .....</b>	<b>42</b>
4.1	Diffusion du chlorure .....	42
<b>5</b>	<b>Bilan et conclusion.....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Référence.....</b>	<b>43</b>

## Liste des Figures

<b>Figure3. 1</b> Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP (Safiuddin et al., 2011).....	35
<b>Figure3. 2</b> Effet des GRB sur T500 (S) des BAP (Tuyan et al., 2014). ....	36
<b>Figure3. 3</b> Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP de différents travaux de recherches. .....	36
<b>Figure3. 4</b> Effet des GRB sur le temps d'écoulement de V-funnel des BAP.....	37
<b>Figure3. 5</b> Effet des GRB sur le rapport du blocage de la boîte en L des BAP.....	38
<b>Figure3. 6</b> Effet des GRB sur l'indice de ségrégation des BAP.....	39
<b>Figure3. 7</b> Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP. ...	40
<b>Figure3. 8</b> Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP (travaux de la littérature). ....	40
<b>Figure3. 9</b> Effet des GRB sur la résistance à la traction par flexion des BAP. ....	41
<b>Figure3. 10</b> Effet des GRB sur le retrait des BAP.....	41
<b>Figure3. 11</b> Effet des GRB sur la diffusion des chlorures des BAP.....	42

## 1 Introduction

La différence la plus significative entre un BAP (avec granulats naturel ou avec granulats recyclés) et un béton ordinaire (BO) est liée à leur comportement à l'état frais. Parmi les caractéristiques spécifiques un BAP sont le remplissage des coffrages (même trop ferrailés), sans vibration et sans ségrégation, uniquement sous leur propre poids. Afin de se conformer aux exigences d'ouvrabilité des BAP, les caractéristiques suivantes doivent être analysées : la capacité d'écoulement (remplissage), la capacité de passage, la viscosité et la stabilité. De plus, l'utilisation des granulats recyclés nécessite une attention particulière sur le type, la forme et la distribution de ces granulats, car ils affectent de façon significative les performances mécaniques et la durabilité du béton. Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les propriétés des BAP à base des granulats recyclés fins et grossiers.

## 2 Effet des GRB sur les propriétés des BAP à l'état frais

Dans les recherches consultées, l'essai de l'étalement (qui évalue la fluidité et la vitesse d'écoulement en l'absence d'obstacle), l'essai V-funnel (qui évalue la viscosité et la capacité de remplissage) et l'essai L-box pour obtenir le rapport de blocage (qui évalue la capacité de passage à travers les espaces confinés) sont les plus utilisés à l'état frais des BAP.

L'essai de stabilité au tamis (qui évalue la résistance à la ségrégation) et l'essai d'étalement avec le J-ring (qui évalue la capacité de passage à travers des espaces confinés de manière analogue à la L-box) sont pas trouvés dans la plupart des études, parce qu'ils sont plus récents.

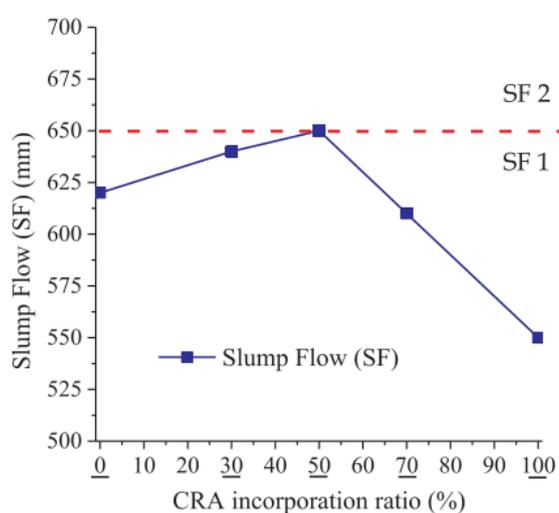
### 2.1 Ouvrabilité et vitesse d'écoulement en l'absence d'obstacles

L'essai d'étalement des BAP est effectué conformément à la norme EN 12350-8 (EN12350-8, 2009). Les paramètres permettent d'évaluer la fluidité et la vitesse d'écoulement dans l'absence d'obstructions sont le temps T 500 qui prend le BAP pour former un cercle de 500 mm et le diamètre de l'étalement (D).

Le diamètre D diminue et le T500 augmente avec l'incorporation des GRB dans les BAP(Santos *et al.*, 2019). Ceci est dû principalement à l'absorption d'eau plus élevée du GRB par rapport au granulat naturel. Lors de l'analyse de ces paramètres, les aspects suivants sont pris en compte : le rapport E / C des mélanges, l'influence de la teneur en Sp et l'influence du rapport de remplacement des granulats.

(Grdic *et al.*, 2010) ont constaté que la diminution de l'étalement augmente avec l'augmentation du taux de l'incorporation des granulats recyclés dans les BAP. Ceci est dû à l'absorption plus élevé des GRB.

(Safiuddin *et al.*, 2011) ont montré que l'étalement des BAP augment en introduisant des GRB avec des taux de 30% et 40%. Les auteurs affirment que cette augmentation peut être attribuée à la réduction de la teneur des agrégats grossiers de ces mélanges. Pour des rapports plus élevés (70% et 100%), l'étalement diminue, car la teneur en granulat fins a augmenté en raison de la détérioration des GRB pendant le malaxage.



**Figure3. 1** Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP (Safiuddin *et al.*, 2011).

(Tuyan *et al.*, 2014) ont montré que l'étalement augmente pour les BAP contenant de 20% des GRB. Par contre, pour des taux plus élevés (40% et 60%), l'affaissement diminue. Ces deux tendances sont les mêmes aux travaux de (Safiuddin *et al.*, 2011). De plus, (Tuyan *et al.*, 2014) ont constaté que T500 augmente avec l'augmentation du taux de substitution des GN par des GRB à cause de la surface plus rugueuse des GRB par rapport aux GN.

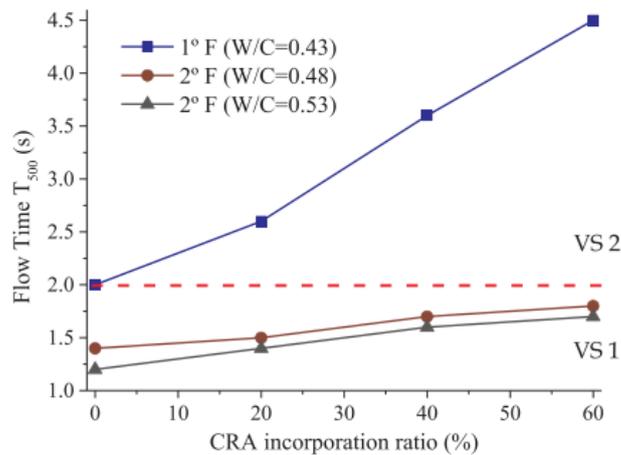


Figure3. 2 Effet des GRB sur T500 (S) des BAP (Tuyan *et al.*, 2014).

(Modani and Mohitkar, 2014) ont obtenu des valeurs de l'étalement des BAP à base des GRB dans la marge 620–770 mm. Les auteurs ont déclaré que les valeurs de cette propriété augmentent avec l'incorporation des GRB jusqu'à 60%, après elles diminuent. La figure 3.3 regroupe les différents résultats de la littérature obtenus.

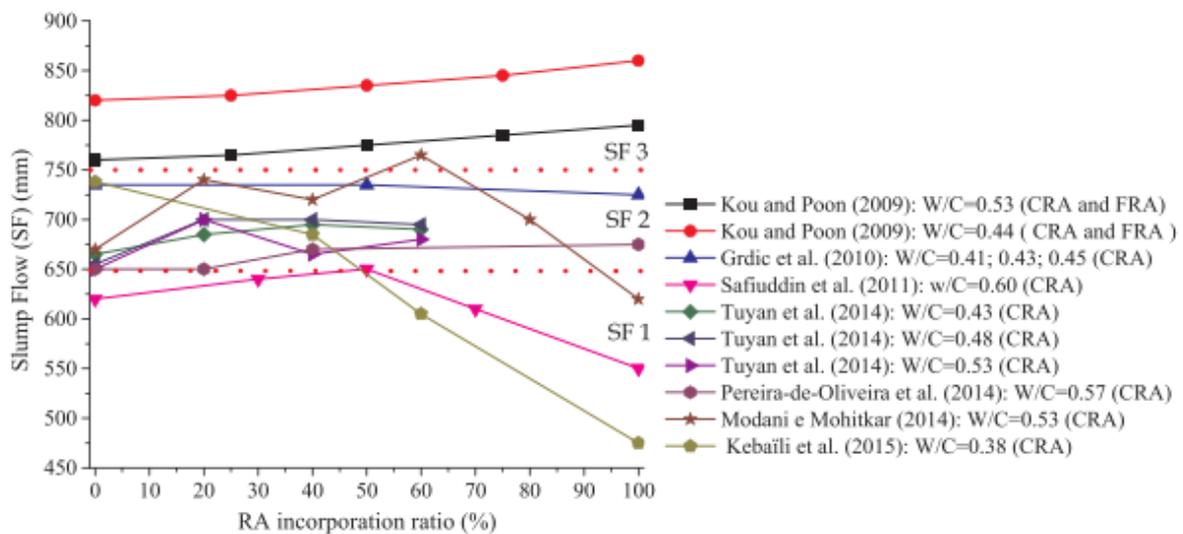


Figure3. 3 Effet des GRB sur le diamètre de l'étalement des BAP de différents travaux de recherches.

## 2.2 Viscosité et capacité de remplissage

L'essai de V-funnel est réalisé conformément à la norme EN 12350-9 (EN12350-9, 2009). Le paramètre qui permet d'évaluer la viscosité, la capacité de remplissage et la capacité de passer à travers des petites ouvertures est le temps d'écoulement de V-funnel ( $t$ , en s).

Selon (Santos *et al.*, 2019) ont constaté que le temps d'écoulement de V funnel augmente avec l'incorporation de GRB. Ceci est dû à l'absorption d'eau élevée des GRB par rapport aux GN.

Lors de l'analyse de ces paramètres, les aspects suivants sont pris en compte : le rapport E / C des mélanges, l'influence de la teneur en Sp et l'influence du rapport de remplacement des granulats. (Safiuddin *et al.*, 2011) ont constaté que le temps d'écoulement de V funnel des BAP diminue pour des taux d'incorporation de GRB de 30% et 40%. Par contre pour des rapports plus élevés (70% et 100%), le Tv a augmenté en raison de la rugosité et de l'angularité des GRB.

(Pereira-de-Oliveira *et al.*, 2014) ont constaté que Tv a augmenté pour les taux d'incorporation de GRB de 20% et 40%. De plus, les auteurs indiquent que Tv est fortement influencé par le rapport W / C. la figure 3.4 regroupe les différents résultats de la littérature obtenus.

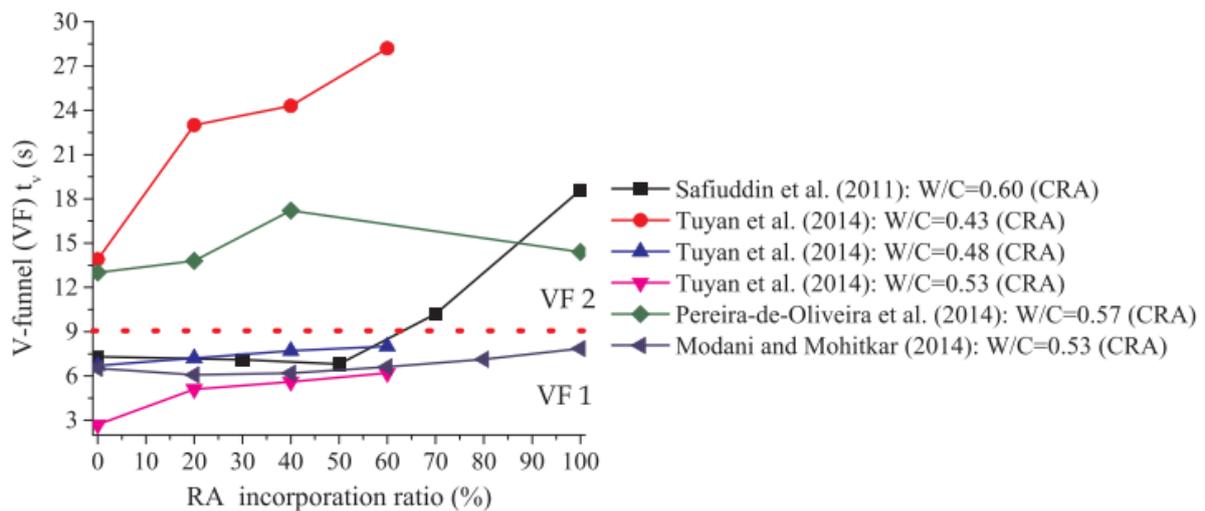


Figure 3.4 Effet des GRB sur le temps d'écoulement de V-funnel des BAP(Santos *et al.*, 2019).

### 2.3 Essai L-box

L'essai de L-box est réalisé conformément à la norme EN 12350-10 (EN12350-10, 2009).

Le paramètre qui permet d'évaluer la capacité de passage des BAP à travers des espaces confinés, sans ségrégation et sans blocage, est l'indice de blocage de la boîte L. Selon (Santos *et al.*, 2019) ont constaté que l'indice de blocage de la boîte L diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation de GBR dans les BAP. Cela est dû à l'absorption d'eau élevée des GRB par rapport aux GN. Lors de l'analyse de ces paramètres, les aspects suivants sont pris en compte : le rapport E / C des mélanges, l'influence de la teneur en Sp et l'influence du rapport de remplacement des granulats. Tous les mélanges testés par (Kou and Poon, 2009) ont montré une bonne capacité de passage dans des espaces confinés. Les valeurs du rapport de blocage RB ont dépassé toujours 0,80. De plus, la valeur de l'indice de blocage a augmenté avec le taux

d'incorporation GRB en raison de la faible absorption d'eau des GRB au début. La figure 3.5 regroupe les différents résultats de la littérature obtenus.

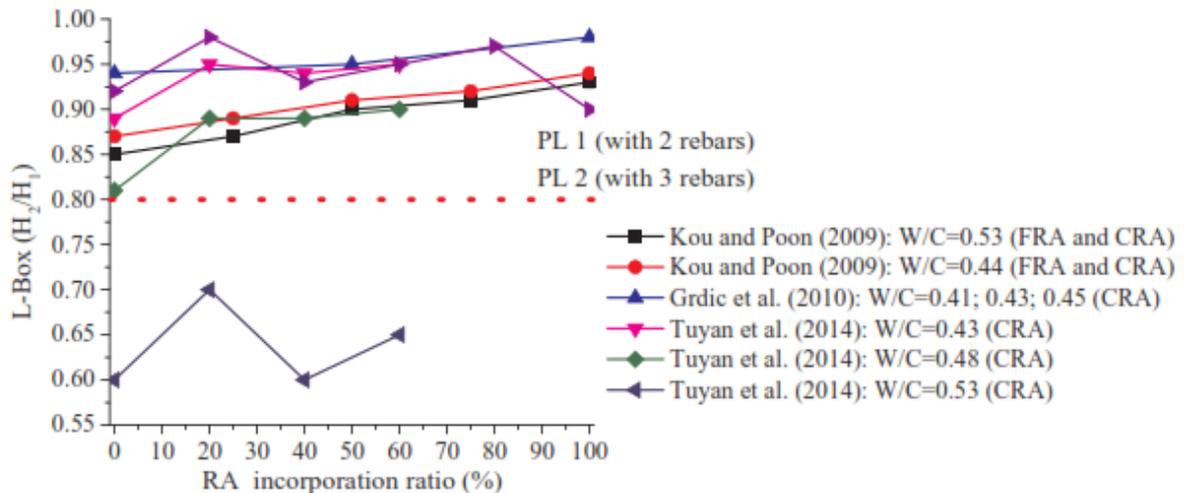


Figure 3.5 Effet des GRB sur le rapport du blocage de la boîte en L des BAP (Santos et al., 2019).

## 2.4 Essai de stabilité au tamis (ségrégation)

Le test de ségrégation du tamis est réalisé conformément à la norme EN 12350-11 (EN12350-11, 2009). Le paramètre qui permet d'évaluer la résistance du BAP à la ségrégation est le pourcentage de ségrégation (SR en%), c'est-à-dire le rapport entre la masse de matériau passé au-dessous du tamis et la masse initiale de béton placé sur le tamis.

La ségrégation a tendance à diminuer avec l'augmentation de l'incorporation de GRB dans les BAP. Cela est dû à l'absorption d'eau élevée des GRB par rapport aux GN (Santos *et al.*, 2019). (Safiuddin *et al.*, 2011) ont constaté que la valeur de SR augmente pour des taux de substitution de 30% et 40% des GRB dans les BAP. Pour des rapports plus élevés (70% et 100%), la valeur SR diminue en raison de l'augmentation de la fraction des fines résultant de la détérioration du GRB lors du malaxage. Par conséquent, les agrégats deviennent plus anguleux et leur surface devient plus rugueuse, conférant une plus grande cohésion des BAP. La figure 3.6 regroupe les différents résultats de la littérature obtenus.

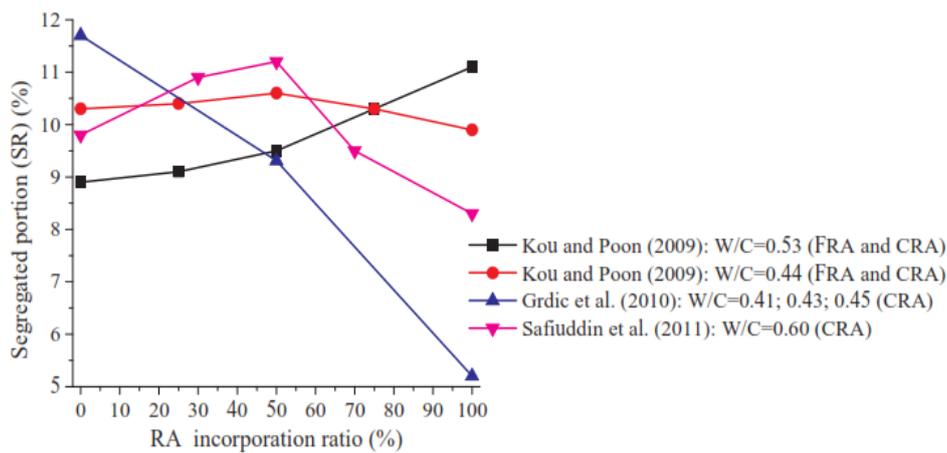


Figure 3.6 Effet des GRB sur l'indice de ségrégation des BAP (Santos et al., 2019).

### 3 Effet des GRB sur les propriétés des BAP à l'état durcis

#### 3.1 Densité apparente

Selon ont constaté que la densité apparente des BAP diminue que l'incorporation de GBR augmente. Ceci est dû à la densité faible de GBR que les GN. (Pereira-de-Oliveira *et al.*, 2014) ont conclu que la densité apparente diminue 1% et 3% pour des taux de 20% et 100% respectivement.

#### 3.2 Résistance à la compression

L'incorporation de GBR dans le béton est responsable d'une diminution de la performance en termes de résistance à la compression. Cela est dû à l'augmentation du rapport E / C, à cause de la forte absorption du matériau recyclé et sa forme plate et angulaire.

Les résultats de résistance à la compression de (Kou and Poon, 2009) sont présentés à la figure 3.7. La résistance à la compression diminue avec le taux de remplacement des GBR. La figure 20 montre une légère diminution à mesure que le taux de remplacement des GRB augmente. Ce phénomène se varie en fonction de l'âge, ce qui peut être dû à l'activation du ciment non hydraté dans les GBR (Kou and Poon, 2009).

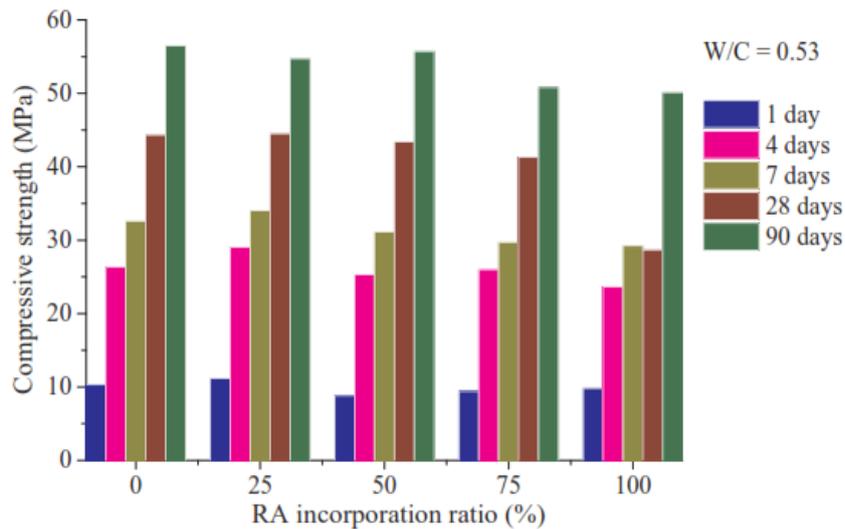


Figure3. 7 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP(Kou and Poon, 2009).

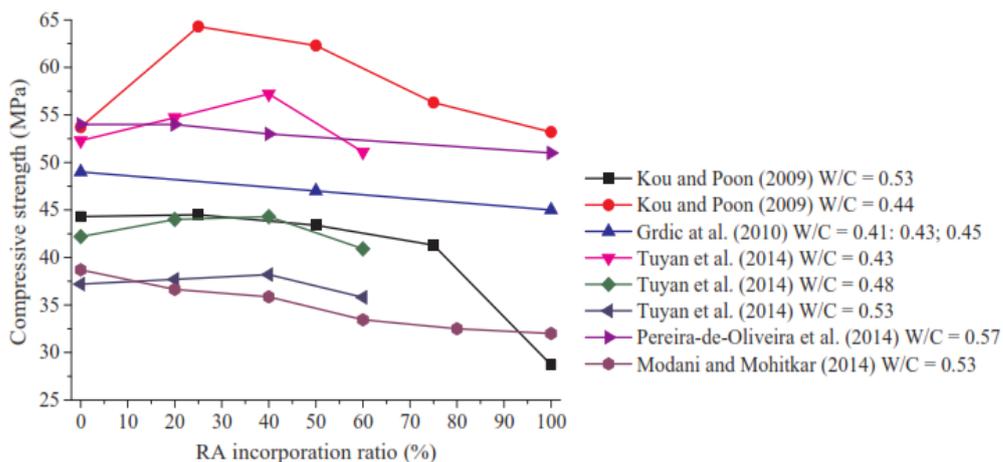


Figure3. 8 Effet des GRB sur la résistance l'évolution de la résistance à la compression des BAP (travaux de la littérature) (Tuyan *et al.*, 2014) (Kou and Poon, 2009).

Cependant, selon (Kou and Poon, 2009) et (Tuyan *et al.*, 2014) ont constaté que la résistance à la compression la plus élevée est obtenue pour des taux de GRB de 25% et 40%. Ceci est justifié par la présence de fumé de silice dans les deux cas.

### 3.3 Résistance à la traction par flexion

En termes de résistance à la traction par flexion, sa valeur diminue avec l'augmentation du taux de substitution des GN par des GBR dans les mélanges de BAP.

Les résultats de résistance à la traction par flexion obtenus par (Grdic *et al.*, 2010) sont présentés sur la figure. Ils ont confirmé que la résistance diminue en fonction de l'augmentation du taux de GBR. Ceci est dû à la mauvaise adhérence entre le mortier résiduel et le granulat naturel

dans les granulats recyclés. Ils ont trouvé que la résistance diminue avec 2,49% et 13,95% pour 50% et 100% de GRB respectivement.

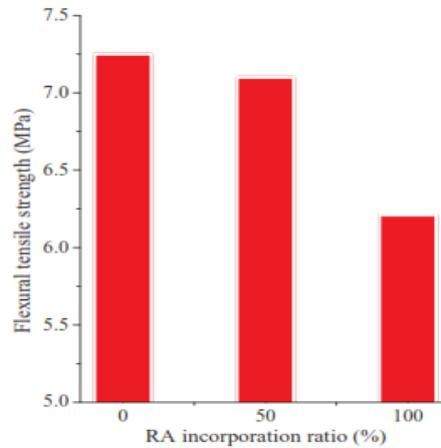


Figure3. 9 Effet des GRB sur la résistance à la traction par flexion des BAP (Grdic *et al.*, 2010).

### 3.4 Retrait

L'incorporation de GRB dans le béton entraîne une réduction des valeurs de retrait totales. Lors de l'analyse de ces paramètres, les aspects suivants sont pris en compte : le rapport E / C des mélanges, l'influence de l'âge et l'influence du rapport de remplacement des granulats. (Kou and Poon, 2009) ont déterminé le retrait total des éprouvettes prismatiques. Les résultats sont présentés sur la Figure 3.10. Ces auteurs ont constaté que le retrait total augmente avec le temps et avec le taux d'incorporation des GBR. L'augmentation du retrait total était de 182% (1<sup>er</sup> famille) et de 100% (2<sup>ème</sup> famille) pour une incorporation à 100% FRA. Ceci s'explique par la porosité élevée du GRB en raison du mortier attaché aux ces granulats, réduisant la rigidité et la capacité de la déformation des GRB. Ils ont également conclu que l'augmentation du retrait total dû à l'incorporation de GRB peut être contrôlée en réduisant le rapport E / C (Fig3.10).

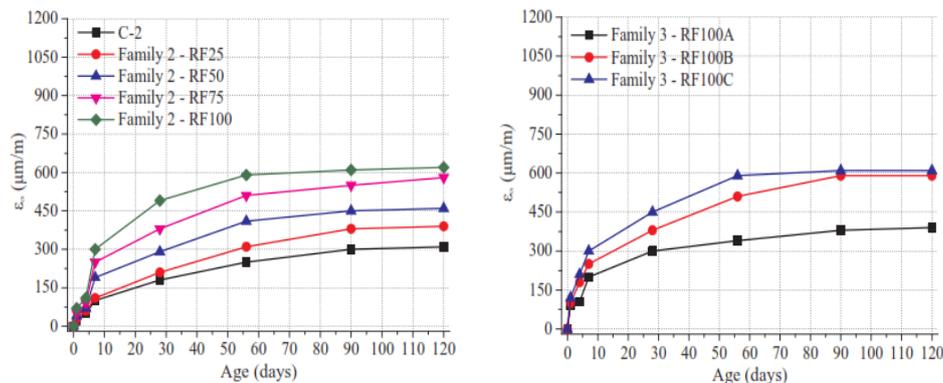


Figure3. 10 Effet des GRB sur le retrait des BAP (Kou and Poon, 2009).

## 4 Durabilité

### 4.1 Diffusion du chlorure

On constate que l'incorporation de GRB dans le béton est responsable de la diminution de la résistance à la migration des chlorures. Selon (Kou and Poon, 2009), la résistance à la migration des chlorures a été analysée en déterminant la charge électrique passant dans les échantillons pendant 6 h. Les résultats sont présentés sur la figure 3.11. La résistance à la migration des chlorures augmente avec la teneur en GRB, ce qui s'explique par l'effet de remplissage des pores plus important provoqué par le GRB. Ce dernier contient un pourcentage élevé des petites particules par rapport au sable de rivière.

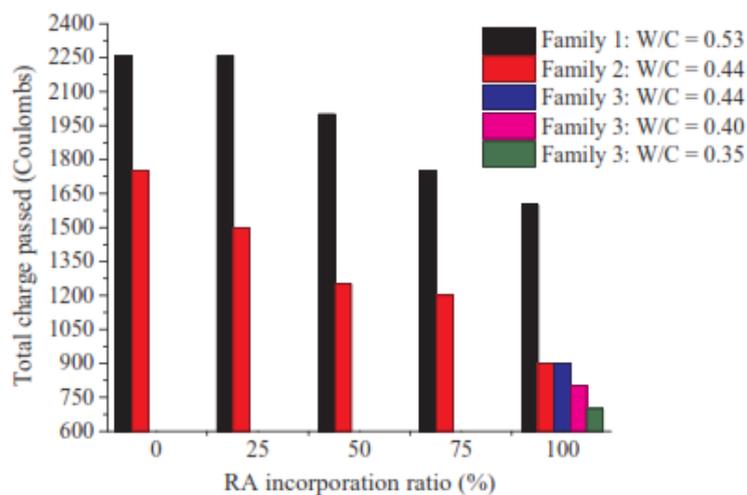


Figure 3. 11 Effet des GRB sur la diffusion des chlorures des BAP (Kou and Poon, 2009).

## 5 Bilan et conclusion

Cette étude bibliographique permet d'affirmer clairement que l'utilisation des GRB dans la production des BAP est viable. En général, on a constaté que les propriétés de GRB sont inférieures à celles de GN, principalement en raison de la présence de mortier adhérent dans le GRB. On en conclut donc que c'est l'une des principales raisons de la perte de qualité du GRB. Par conséquent, les granulats recyclés ont eu une absorption d'eau élevée, une densité faible et une résistance mécanique inférieure aux granulats naturels. Ces propriétés sont celles qui influent plus sur les performances du BAP-GRB. De plus, en raison des nouveaux processus de recyclages (concassage...etc) rendent le GRB plus similaire au GN avec des performances acceptables. Cependant, (Tuyan *et al.*, 2014) ont conclu que la pâte entourant les granulats recyclés représente environ 25 à 60% des granulats (en volume). Les propriétés BAP-GRB à l'état frais sont très importantes, car le béton doit avoir des caractéristiques spécifiques à l'état frais pour être considéré comme un autoplaçant. Il est généralement constaté que, même s'il y

a une perte de performance à l'état frais, des BAP avec GBR montrent un comportement satisfaisant sans ségrégation. Dans ces conditions, on peut affirmer que les baisses de performance à l'état frais peuvent être facilement corrigées en changeant le dosage de Sp...etc. Selon les travaux d'antérieurs (Manzi *et al.*, 2013) (Nanthagopalan and Santhanam, 2011) (Kou and Poon, 2009) (Topcu and Şengel, 2004), une quantité élevée de la pâte conduit à une faible zone d'interface et une faible densité générant une diminution de la résistance à la compression. À l'état durci, ils ont constaté que la densité apparente du BAP diminue d'environ 3% pour une incorporation de 100% de GRB. La réduction de cette propriété (densité apparente) est justifiée par la densité plus faible des GRB par rapport aux GN. On conclut que les performances mécaniques du BAP avec GRB sont généralement inférieures à celles du mélange de référence. Une diminution maximale de 22% pour une incorporation de 100% de GRB. Par contre, Pour des taux autour de 50%, les performances mécaniques de ces mélanges sont parfaitement comparables à celles du BAP avec que GN. Cependant, il est souligné qu'une attention particulière doit être portée à l'effet du retrait dans ces mélanges de béton autoplaçant, en particulier lorsqu'ils introduisent les GRB.

## 6 Référence

- EN12350-8 (2009), "Testing fresh concrete. Part 8: self-compacting concrete, slump-flow. CEN, European Committee for Standardization Brussels, , 12 p."
- EN12350-9 (2009), "Testing fresh concrete. Part 9: self-compacting concrete, V-funnel test. CEN, European Committee for Standardization Brussels, 11 p."
- EN12350-10 (2009), "Testing fresh concrete. Part 10: self-compacting concrete, L-box test, CEN, European Committee for Standardization Brussels., 2 p."
- EN12350-11 (2009), "Testing fresh concrete. Part 11: self-compacting concrete, Sieve segregation test, CEN, European Committee for Standardization Brussels,12 p."
- Grdic, Z.J., Toplicic-Curcic, G.A., Despotovic, I.M. and Ristic, N.S. (2010), "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 24 No. 7, pp. 1129-33.
- Kou, S. and Poon, C. (2009), "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete composites*, Vol. 31 No. 9, pp. 622-27.
- Manzi, S., Mazzotti, C. and Bigozzi, M. (2013), "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 312-18.
- Modani, P.O. and Mohitkar, V.M. (2014), "Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainable development", *International Journal of Civil & Structural Engineering*, Vol. 4 No. 3, pp. 430-40.
- Nanthagopalan, P. and Santhanam, M. (2011), "Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33 No. 3, pp. 353-58.
- Pereira-de-Oliveira, L., Nepomuceno, M., Castro-Gomes, J. and Vila, M.d.F.C. (2014), "Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 51, pp. 113-20.

- Safiuddin, M., Salam, M. and Jumaat, M.Z. (2011), "Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11 No. 4, pp. 1023-41.
- Santos, S., Da Silva, P. and De Brito, J. (2019), "Self-compacting concrete with recycled aggregates—a literature review", *Journal of Building Engineering*, Vol. 22, pp. 349-71.
- Topcu, I.B. and Şengel, S. (2004), "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate", *Cement and concrete research*, Vol. 34 No. 8, pp. 1307-12.
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A. and Ramyar, K. (2014), "Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate", *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 983-91.

## **CHAPITRE 4**

---

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

## Table des matières

---

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>2</b>	<b>Plan d'expérience .....</b>	<b>48</b>
2.1	Définition.....	48
2.2	Intérêts des plans d'expériences :.....	48
2.3	Types de plans d'expériences : .....	48
2.3.1	Plans factoriels complets : .....	49
2.3.2	Plans factoriels complets à deux niveaux .....	49
2.3.3	Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres.....	49
2.3.4	Plans fractionnaires .....	49
<b>3</b>	<b>Modélisation des résultats expérimentaux de (Santos et al., 2019) .....</b>	<b>50</b>
3.1	Modélisation T.V-funnel .....	50
3.1.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées.....	50
3.1.2	Expression de la prevision.....	52
3.1.3	surface de réponse .....	53
3.2	Modélisation de la résistance à la compression.....	53
3.2.1	Relation entre les valeurs expérimentales et celles modélisées.....	54
3.2.2	Expression de la prévision.....	55
3.2.3	Surface de réponse.....	56
<b>4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>Référence.....</b>	<b>57</b>

## Liste des Figures

<b>Figure 4. 1</b> Effet des GRB sur V-funnel des BAP(Santos et al., 2019).....	50
<b>Figure 4. 2</b> Relation entre les valeurs du temps de V-funnel expérimentales et celles de la simulation. .....	51
<b>Figure 4. 3</b> Surface de réponse entre V-funnel, GRB et E/C.....	53
<b>Figure 4. 4</b> Effet des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Santos et al., 2019).....	53
<b>Figure 4. 5</b> Relation entre les valeurs de la résistance à la compression expérimentales et celles de la simulation. ....	54
<b>Figure 4. 6</b> Surface de réponse entre E/C, GRB et RC.....	56

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 4. 1</b> Résumé de l'ajustement. ....	51
<b>Tableau 4. 2</b> Testes des effets.....	51
<b>Tableau 4. 3</b> Analyse de la variance.....	52
<b>Tableau 4. 4</b> Résumé de l'ajustement. ....	54
<b>Tableau 4. 5</b> Tests des effets .....	55
<b>Tableau 4. 6</b> Analyse de la variance.....	55

## 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 aliés « confondus » délibérément, c'est-à-dire qui ont des niveaux de même alternance dans la matrice des expériences.

**✚ Plan fractionnaire à n niveaux et p paramètres**

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

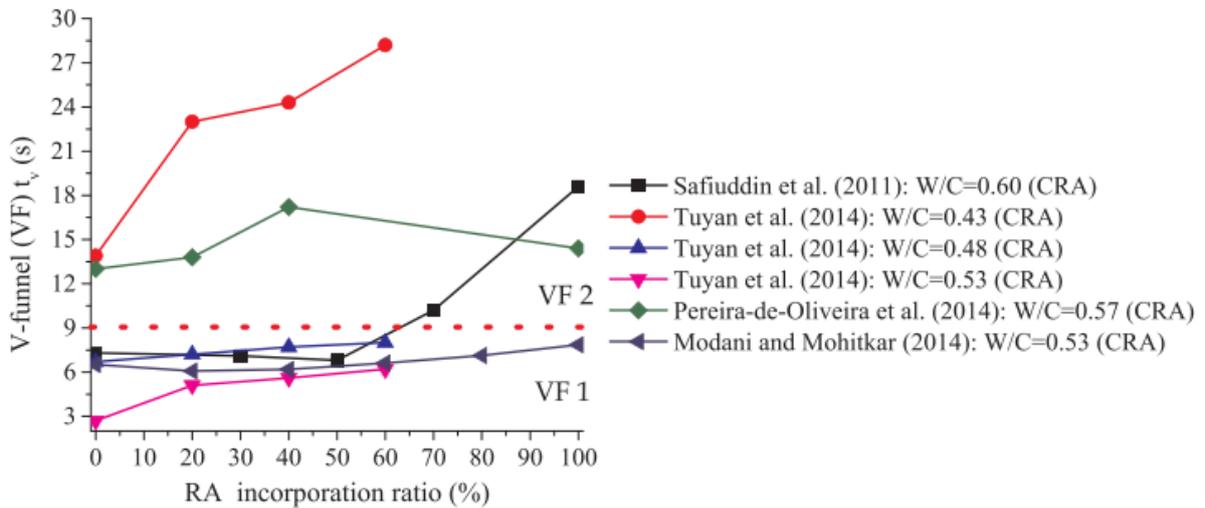
Le nombre d'expériences= $n^{P-K}$

La matrice d'expériences est donc divisée k fois.

**3 Modélisation des résultats expérimentaux de (Santos et al., 2019)**

**3.1 Modélisation T.V-funnel**

La figure 4.1 présente les résultats expérimentaux des chercheurs (Santos et al., 2019) effet du taux d'incorporation des GRB sur le temps du V funnel des BAP. (Voir chapitre 3).

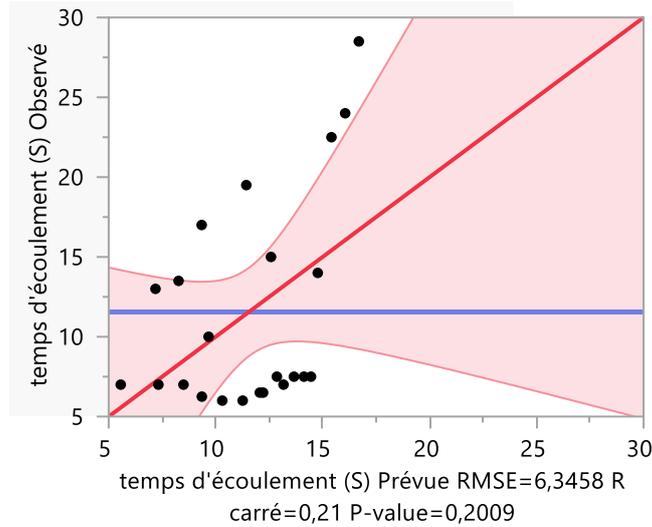


**Figure 4. 1** Effet des GRB sur V-funnel des BAP(Santos et al., 2019).

On va modéliser ces résultats par le logiciel JMP pour avoir une loi de comportement des BAP-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 temps de V-funnel expérimentales et celles de la simulation. Les modèles adaptés ont montré des coefficients de corrélation relativement faibles. Mais malgré cela, la validité doit être vérifiée. Les résultats du temps d'écoulement inclus dans le plan expérimental ont été analysés afin d'estimer l'erreur expérimentale. La valeur moyenne, le coefficient de variation et l'erreur attendue (intervalle de confiance à 95%) est présentée dans le tableau 4.1. Les covariances des réponses sont largement satisfaisant. La validation des modèles établis est à nouveau estimée en comparant les prévisions valeurs avec les valeurs du T-V funnel obtenues par plusieurs chercheurs. Ces résultats indiquent que les modèles du T-V funnel représentent pas bien les résultats expérimentaux.

**Tableau 4. 1** Résumé de l'ajustement.

R carré	0,211566
R carré ajusté	0,087077
Racine de l'erreur quadratique moyenne	6,34582
Moyenne de la réponse	11,57609
Observations (ou sommes pondérées)	23

Source	LogWorth		P-value
E/C (0,43,0,6)	1,058		0,08743
%GR (0,100)	0,450		0,35512
E/C*%GR	0,071		0,84911

**Tableau 4. 2** Testes des effets

Le tableau 4.2 présente le test des effets qui influence sur la repense étudiée (T-v.funnel), on peut constater que les facteurs tel que le rapport E/C et le dosage 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 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	3	205,31	68,43	1,6995
Erreur	19	765,11	40,26	<b>Prob. &gt; F</b>
Total corrigé	22	970,42		0,2009

### 3.1.2 Expression de la prevision

Les modèles développés utilisent l'approche de conception factorielle. Elles sont valables pour une large gamme de rapport de mélange à un dosage variable de GBR.

Les modèles fournissent un moyen efficace de calculer les réponses moyennes, d'évaluer les effets des facteurs et interactions entre les facteurs clés du mélange proportionnel et fournir une bonne prédiction des valeurs mesurées.

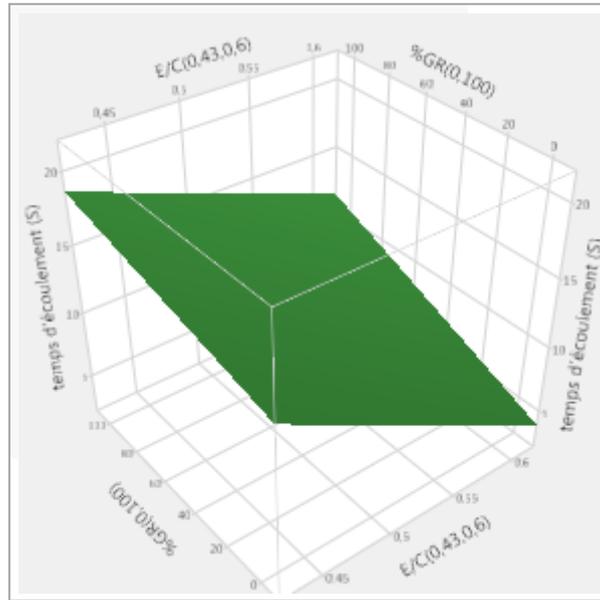
Bien que les modèles développés soient basés sur un ensemble donné de matériaux, ils peuvent être utilisé comme moyen efficace pour comprendre l'influence de chaque paramètre sur le comportement de notre matériel.

Les modèles proposés pour la prédiction des réponses étudiées V-t funnel peuvent être écrit, comme indiqué dans l'équation (1). Leurs formes simplifiées sont les suivantes :

$$T.Vfunnel = 12.43 - 3.93 \left( \frac{\left( \frac{E}{C} - 0.51 \right)}{0.085} \right) + 2.26 \left( \frac{(GR - 0.50)}{50} \right) + \left( \left( \frac{\left( \frac{E}{C} - 0.515 \right)}{0.085} \right) \cdot \left( \frac{(GR - 50)}{50} \right) * (0.66) \right)$$

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

### 3.1.3 surface de réponse

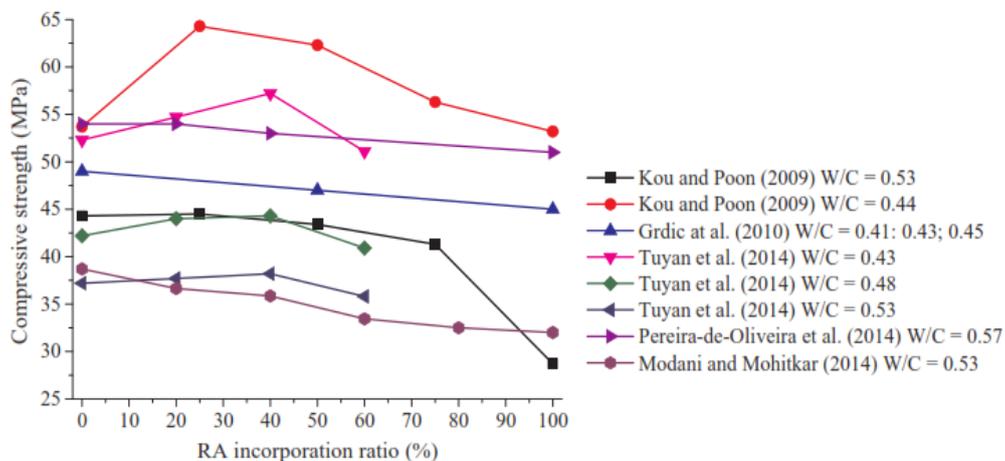


**Figure 4. 3** Surface de réponse entre V-funnel, GRB et E/C.

D'après la figure 4.3 qui présente la surface de réponse du modèle de  $V_t$  en fonction du dosage de GRB et de E/C. On constate que l'augmentation du pourcentage du GRB provoque une augmentation de T.V-funnel.

### 3.2 Modélisation de la résistance à la compression

La figure 4.4 présente les résultats expérimentaux des chercheurs (Santos et al., 2019) sur l'effet du dosage de GRB sur la résistance à la compression des BAP-GRB (voir chapitre 3).

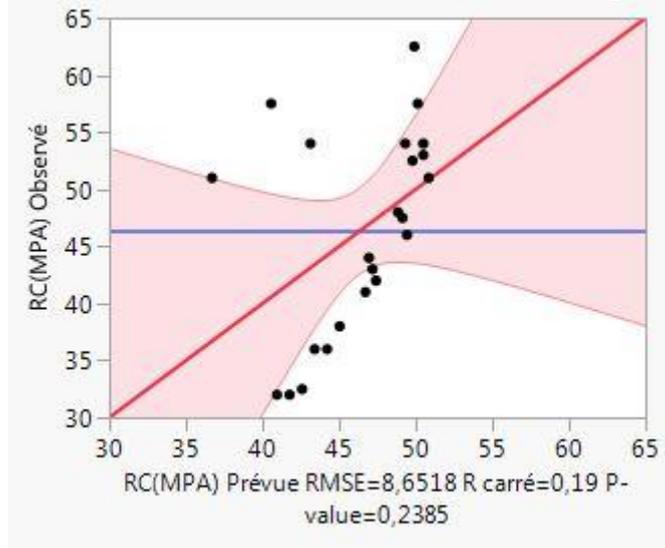


**Figure 4. 4** Effet des GRB sur la résistance à la compression des BAP(Santos et al., 2019).

On va modéliser ces résultats par le logiciel JMP pour avoir une loi de comportement de la résistance des BAP-GRB en fonction du taux de 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.

Selon la figure 4.5 on constate que le nuage des points, est dispersé. On conclut qu'il y a une mauvaise corrélation entre les résultats de l'expérimentation des différents chercheurs et ceux de la simulation ( $R \approx 0.2$ ). Le tableau 4.4 présente le coefficient de la corrélation R et son ajustement.

**Tableau 4. 4** Résumé de l'ajustement.

R carré	0,194842
R carré ajusté	0,067712
Racine de l'erreur quadratique moyenne	8,651762
Moyenne de la réponse	46,30435
Observations (ou sommes pondérées)	23

Source	LogWorth		P-value
E/C (0,43,0,57)	1,276		0,05300
E/C*%GR	0,247		0,56659
%GR (0,100)	0,180		0,66144

Tableau 4. 5 Tests des effets

Le tableau 4.5 présente le test des effets qui influence sur la repense étudiée (Rc), on peut constater que les facteurs tel que le rapport E/C et le dosage des granulats recyclés sont les plus influant sur le comportement des BAP à l'état durci.

Tableau 4. 6 Analyse de la variance

Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Modèle	3	344,1629	114,721	1,5326
Erreur	19	1422,2067	74,853	<b>Prob. &gt; F</b>
Total corrigé	22	1766,3696		0,2385

### 3.2.2 Expression de la prévision

$$\begin{aligned}
 RC = & 45.29 - 5.37 \left( \frac{\left( \frac{E}{C} - 0.5 \right)}{0.07} \right) - 1.16 \left( \frac{(GR - 0.50)}{50} \right) \\
 & + \left( \left( \frac{\left( \frac{E}{C} - 0.5 \right)}{0.07} \right) \cdot \left( \frac{(GR - 50)}{50} \right) * (1.44) \right) \\
 & + \left( \left( \frac{\left( \frac{E}{C} - 0.5 \right)}{0.07} \right) \cdot \left( \frac{(GR - 50)}{50} \right) * (-2.04) \right)
 \end{aligned}$$

Cette expression nous a permet 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

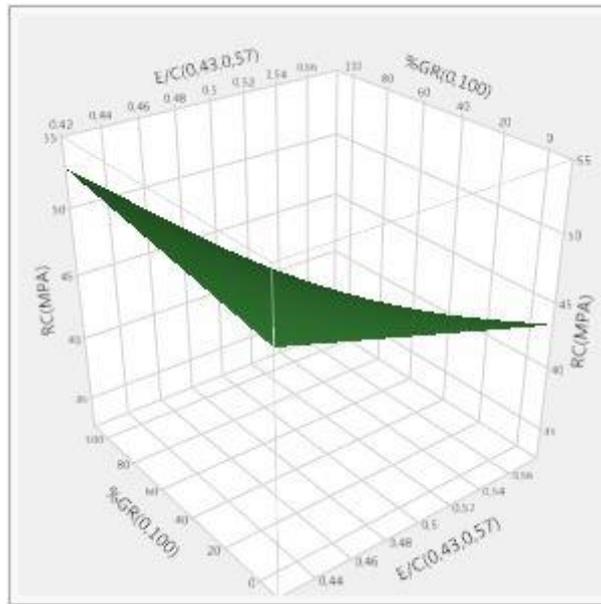


Figure 4. 6 Surface de réponse entre E/C, GRB et RC.

D'après la figure 4.6 qui présente la surface de réponse du modèle de RC en fonction du dosage de GRB et E/C. On constate que l'augmentation du pourcentage du 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- GRB.

## 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-GRB tel que le V-funnel et la résistance à la compression.

On a conclu que la modélisation révèle une mauvaise 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-GRB.

## 5 Référence

Santos, S., Da Silva, P. and De Brito, J. (2019), "Self-compacting concrete with recycled aggregates—a literature review", *Journal of Building Engineering*, Vol. 22, pp. 349-71.

## CONCLUSION GENERALE

En résumé, l'extraction incontrôlée des granulats naturels pour la production de béton met à rude épreuve l'environnement, compromettant le développement durable de l'industrie de la construction. Simultanément, le volume de matériaux dans les décharges suite à la démolition des ouvrages en fin de vie pose un problème qui nécessite une solution urgente. Ces déchets peuvent et doivent être recyclés / réutilisés dans la production granulats recyclés à intégrer dans la production des bétons.

D'autre part, le BAP représente actuellement une technologie de production et de mise en place du béton qui tend à remplacer le béton conventionnel avec divers avantages. Il est donc essentiel de démontrer la viabilité de la production de BAP avec un remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés.

La propriété la plus pertinente des GBR est leur forte absorption d'eau qui implique une compensation du contenu de l'eau efficace de gâchage, lors de l'utilisation des méthodologies actuelles de conception du béton. La performance des BAP avec GBR dépendra du taux de remplacement du GN et de la qualité des GBR.

On conclut :

Pour mieux comprendre l'effet de GBR sur le comportement des BAP, nous avons conclu :

- ✚ 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 GRB sur le comportement des bétons. L'introduction des GRB peut entraîner une réduction de la quantité d'eau efficace pour le processus d'hydratation et, ainsi, créer une zone de transition interfaciale plus faible entre les granulats recyclés et la pâte de ciment. Le contrôle de la qualité du béton à base de GRB peut être effectué en différentes manières : la quantité d'eau et de ciment ; la condition de durcissement ; l'utilisation des additions et des adjuvants. La teneur en

eau et le processus du broyage des GRB sont également un aspect considérable. De plus, les GRB utilisée dans le béton peuvent être traités, afin d'améliorer leurs propriétés.

- ✚ 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-GRB tel que le V-funnel et la résistance à la compression. On conclut que la modélisation révèle une mauvaise corrélation et une prévision des résultats expérimentaux.

Il est généralement conclu que l'utilisation de GR dans la production de BAP est techniquement viable, mais il est nécessaire de prendre précautions pour adapter les caractéristiques de performances de ce type de béton.

Néanmoins, d'autres développements sont encore nécessaires pour la mise en œuvre de ce nouveau matériau d'une manière plus générale et acceptée par l'industrie, à savoir :

- Élaboration de normes pour déterminer l'absorption d'eau des granulats recyclés ;
- Etude plus approfondie de l'effet des granulats recyclés sur la durabilité du béton autoplaçant.