

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR UNIVERSITY- ANNABA
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL
THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat 3^{ème} cycle

Année : 2025

**EFFET DES GRAVILLONS RECYCLÉS CARBONATÉS, OU NON
SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS**

Option : Durabilité des Matériaux de Construction

Par :

HAMZA Fadhila

Devant le Jury

Président :	ACHOURA Djamel	Pr.	U-Badji Mokhtar- Annaba
Rapporteur :	BEHIM Mourad	Pr.	U-Badji Mokhtar- Annaba
Co-rapporteur :	ALI BOUCETTA Tahar	Dr.	U-Badji Mokhtar- Annaba
Examineur :	ARABI Nourredine	Pr.	U-Badji Mokhtar- Annaba
Examineur :	NAFAA Zaherddine	Pr.	U- 8 Mai 1945- Guelma
Examineur :	BELACHIA Mouloud	Pr.	U- 8 Mai 1945- Guelma

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Allah, qui m'a accordé la volonté d'arriver à ce jour.

Aucun mot ne saurait exprimer l'estime et la profonde gratitude que je porte au Pr. **BEHIM Mourad**, qui m'a fait l'honneur de m'accompagner depuis le début de mon parcours scientifique, du master jusqu'à ma thèse de doctorat. Je vous remercie sincèrement pour la confiance que vous m'avez accordée, pour vos précieux conseils, vos encouragements constants de mes efforts, ainsi que pour la liberté et l'autonomie que vous m'avez offertes, lesquelles m'ont permis de développer et d'épanouir mes idées et mes aspirations scientifiques. Mon estime profonde va au Dr. **ALI BOUCETTA Tahar**, pour l'aide qu'il m'a accordée dès le début de mon projet, ainsi que pour toutes les informations et conseils enrichissants qu'il m'a transmis. Je tiens à souligner que grâce à son encadrement, j'ai pu développer des compétences et une rigueur scientifique qui me seront d'un grand apport dans ma future carrière. *Ce travail est le reflet de mon estime et de mon admiration pour vous*

Je tiens à remercier profondément Pr. **ACHOURA Djamel**, directeur du laboratoire de recherche LMGE, Annaba, non seulement pour la faveur dont j'ai bénéficié grâce à sa présidence de mon jury, mais pareillement pour l'appui et l'aide qu'il m'a offerts au cours de ces années de recherche. Je remercie Pr **ARABI Nourredine** pour son accord à examiner mon travail et pour toutes les informations qu'il m'a fournies lorsque j'en avais besoin. À Messieurs Pr **NAFAA Zahreddine** et Pr **BELACHIA Mouloud**, je souhaite exprimer ma profonde gratitude pour leur participation à l'évaluation de mon manuscrit.

Je remercie sincèrement Dr. **MELAIS Fatma Zohra**, pour ses conseils scientifiques, pour l'aide qu'elle m'a apportée, ainsi que pour son soutien humain et sa grande gentillesse.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr. **MAHERZI Walid**, enseignant-chercheur à l'IMT Nord-Europe, pour son aide inestimable, son accueil au sein de l'institut, la liberté qu'il m'a accordée, ainsi que pour sa motivation et l'énergie qu'il a investie dans les discussions liées à mon travail. *Avec toute ma reconnaissance*

Ce travail représente pour moi une occasion afin d'exprimer ma reconnaissance à Dr. **BELLARA Selma**, sur qui j'ai pu toujours compter durant mes périodes de stage à l'IMT. Je vous remercie pour la motivation que vous avez su m'insuffler, pour l'aide précieuse que vous m'avez accordée, mais surtout, pour les précieux instants passés avec vous. *Que ce travail garde aussi le souvenir de cette belle collaboration*

Au Dr. **BELMOKRETAR Karim**, je souhaite exprimer ma reconnaissance pour sa contribution lors de la réalisation des essais à l'ENPO.

Je remercie vivement Messieurs **KHOUALDI Khair-Eddine** et **AKROUM Kamel**, ingénieurs au laboratoire de génie civil d'Annaba, pour leur aide technique.

À ceux qui ont partagé cette belle aventure avec moi, mes chers amis et collègues doctorants : **DORBANI Kamar, KIRANE Sacia, DRAGHMIA Dallel** et **DERROUCHE Yakoub**, avec qui j'ai pu surmonter mes moments les plus difficiles et qui ont toujours transformé mes larmes de stress en larmes de rire. Merci pour tous les moments passés ensemble. ***Je vous souhaite tout le bonheur du monde et une soutenance dans un avenir très proche***

À Dr. **AYAT Amira**, merci pour votre encouragement et les moments si appréciés partagés ensemble. Je n'oublie pas Dr. **DERDOUR Dounia**, qui a rendu ce parcours plus agréable et enrichissant.

Enfin et surtout, je voudrais témoigner ma sincère gratitude à ma très chère famille :

À mes chers parents HAMZA Kamel et CHERCHAR Nacera, aucun mot ne pourrait suffire pour exprimer toute ma gratitude envers vous, pour votre présence constante, votre amour inconditionnel, qui m'ont toujours donné la force de poursuivre mes rêves. À mes yeux, vous êtes les meilleurs parents du monde, et quoi que je fasse, je ne pourrai jamais montrer l'amour que je vous porte. À travers ce manuscrit, je souhaite vous offrir un peu du fruit de vos sacrifices pour mon éducation et mon épanouissement.

À ma petite famille, mon cher conjoint Larbi et mon adorable fils Ghaith, tant de pages ont suffi pour achever ce travail, mais aucun mot ne pourra exprimer ma reconnaissance envers mon mari, qui m'a soutenue, encouragée, aidée sur le plan pratique surtout dans les moments difficiles. Tu es mon confident, celui sur qui je peux toujours compter. Ce travail n'aurait pas été aussi motivant sans la présence de mon petit ange **Ghaith**, qui m'a donné chaque jour l'énergie de donner le meilleur de moi-même. ***Vous êtes tous les deux ma plus grande source de bonheur.***

À mes chers frères Khalil et Saber et leurs merveilleuses épouses, vous avez toujours été mes piliers et mes soutiens depuis mon enfance. Votre amour, vos conseils et votre protection m'ont donné l'énergie et le courage pour avancer dans la vie. Vous êtes plus que frères : des alliés et des repères qui guident chacun de mes pas. **Nassima** et **Latifa**, merci pour la joie que vous apportez à notre famille, et surtout merci d'être de vraies sœurs de cœur pour moi. À mes adorables neveux, **Sajed, Sanad et Ishak**, dont leur présence remplit ma vie d'innocence et d'amour.

Je réserve ces lignes pour exprimer toute ma reconnaissance envers mes beaux-parents, qui m'ont soutenue et encouragée. À mes adorables belles-sœurs, **Ahlem, Zahra et Sara**, merci pour vos encouragements et votre soutien moral. Sans oublier les petits **Haya et Nazim**.

Je ne pourrai clore ces mots sans adresser mes plus vifs remerciements à tonton **Mekki AZZAG** et à son épouse Tata **Salih**, qui ont été pour moi une véritable deuxième famille lors de mes séjours en France. Mille mercis pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mes chers oncles et tantes, paternels et maternels, à mes cousins et cousines. À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

À mes grandes familles

HAMZA

CHERCHAR

ET

BAHLOUL

RÉSUMÉ

AUTEUR	HAMZA Fadhila
TITRE	EFFET DES GRAVILLONS RECYCLÉS CARBONATÉS, OU NON SUR LE COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS
DIRECTEUR DE THESE	M. BEHIM Mourad, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
CO-DIRECTEUR DE THESE	M. ALI BOUCETTA Tahar, Maître de conférences « A », à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

Dans les pays industrialisés, chaque habitant consomme annuellement en moyenne plus de 1 m³ de béton, faisant de ce matériau le plus employé dans le secteur de la construction. De ce fait, la démolition des vieilles constructions et celles détruites par les séismes génèrent de grosses quantités de décombres de béton. Ces décombres sont souvent abandonnés en décharges sauvages. Mais transformés par concassage constituent une ressource abondante de granulats de béton 'recyclés' (GBR). L'emploi des GBR dans les bétons en vue de remplacer les granulats naturels (GN) constitue une approche très intéressante. En effet, la valorisation de ces déchets peut s'intégrer dans le contexte du développement durable, en contribuant au maintien durable de ressources limitées non renouvelables. Toutefois, les GBR présentent des propriétés de moindre qualité que celles des granulats naturels (GN), telles qu'un pouvoir d'absorption d'eau élevé, une porosité accrue et des propriétés mécaniques plus faibles. Ces caractéristiques influencent négativement les propriétés des bétons dans lesquels ils sont incorporés et limitent également leur utilisation à des taux d'incorporation faibles. Ces limitations deviennent plus prononcées lorsque ces granulats recyclés sont destinés à la confection de bétons autoplaçants (BAP), qui sont des bétons connus pour leurs exigences particulières en termes de fluidité.

Afin de surmonter ces limitations, le traitement des granulats de béton recyclés par carbonatation naturelle constitue le but principal de cette recherche. Cette approche vise à améliorer les propriétés du vieux mortier adhérent aux granulats de béton recyclés, principalement par le remplissage de leur porosité grâce à la précipitation du carbonate de calcium formé durant la carbonatation.

Les résultats obtenus sont encourageants et ouvrent la voie à la technique de carbonatation. En effet, le traitement a favorisé l'amélioration, d'une part, des caractéristiques intrinsèques des gravillons, notamment par une augmentation de masse, une réduction de leur porosité et de leur capacité d'absorption d'eau, ainsi qu'une augmentation de leurs résistances au choc et à l'usure. D'autre part, l'utilisation des GBR à l'état carbonaté a permis d'améliorer l'écoulement des BAP à l'état frais même dans le cas de remplacement total des GN, contrairement à leur

utilisation à l'état frais (non traités). Par ailleurs, les BAP contenant des GBR carbonatés ont donné des résistances en compression et des performances de durabilité satisfaisantes, proches de celles des BAP avec GN.

Il convient également de rappeler que la composition des BAP exige un volume en pâte accrue afin d'assurer une bonne fluidité et déformabilité à l'état frais. Dans cette étude, ce volume a été garanti par l'utilisation du filler calcaire ou de la poudre de verre ou du laitier granulé. À l'état frais, le FC favorise l'écoulement des BAP. Tandis qu'à l'état durci, ce sont la PV et le LG qui procurent les meilleures performances mécaniques et de durabilité.

Mots clés : Déchets, démolition, Gravillons recyclés, Carbonatation, Béton autoplaçant (BAP), Ajouts minéraux, État frais, Durabilité.

ABSTRACT

AUTHOR	HAMZA Fadhila
TITLE	EFFECT OF CARBONATED OR NON-CARBONATED COARSE RECYCLED AGGREGATES ON THE BEHAVIOR OF SELF-COMPACTING CONCRETE
DIRECTOR OF THESIS	M. BEHIM Mourad, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
CO-DIRECTOR OF THESIS	M. ALI BOUCETTA Tahar, Maître de conférences « A », à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

In industrialized countries, each inhabitant consumes on average more than 1m^3 of concrete per year, making this material the most widely used in the construction sector. As a result, the demolition of old buildings and those destroyed by earthquakes generates significant amounts of concrete rubble. This rubble is often abandoned in illegal landfills. However, when crushed, it becomes an inexhaustible source of recycled aggregates (RA). The use of RCA in concrete as a replacement for natural aggregates (NA) represents a very interesting approach. Indeed, the recovery of this waste can be part of sustainable development, contributing to the preservation of non-renewable natural resources. However, the RCA exhibit inferior properties compared to natural aggregates, such as high-water absorption, high porosity, and lower mechanical properties. These characteristics negatively affect the properties of the concrete in which they are incorporated and also limit their use to low incorporation rates. These limitations become more pronounced when these recycled aggregates are used to make self-compacting concrete (SCC), which is known for its specific requirements in terms of flowability.

To overcome these limitations, the treatment of recycled concrete aggregates by natural carbonation is the principal aim of this study. This approach aims to improve the quality of old mortar adhering to recycled aggregates, mainly by filling their porosity through the precipitation of calcium carbonate formed during the carbonation reaction.

The results obtained are encouraging and pave the way for the carbonation technique. Indeed, the treatment has improved the intrinsic characteristics of the aggregates, in particular by increasing their mass, reducing their porosity and water absorption, and improving their mechanical characteristics (impact and wear resistance). Furthermore, the use of carbonated RCA has improved the fresh properties of SCC even when NA was completely replaced, unlike their use in the fresh (untreated) state. In addition, SCC containing carbonated RCA showed satisfactory compression resistance and durability performance, comparable to that of SCC made with NA.

It should also be noted that the mix design of SCC requires a high paste volume to ensure good flowability and deformability in the fresh state. In this study, this volume was guaranteed by the use of limestone filler, glass powder, or granulated slag. In the fresh phase, LF enhances the flowability of SCC, whereas in the hardened state, GP and GS provide the best mechanical and durability performance.

Keywords: Waste, demolition, recycled aggregates, carbonation, self-compacting concrete (SCC), mineral additions, fresh state, durability.

AUTEUR	HAMZA Fadhila
TITRE	تأثير الحصى المعاد تدويره، المُكربن أو غير المُكربن، على سلوك الخرسانة ذاتية القوية
DIRECTEUR DE THESE	M. BEHIM Mourad, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
CO-DIRECTEUR DE THESE	M. ALI BOUCETTA Tahar, Maître de conférences « A », à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

الخرسانة هي مادة البناء الأكثر استخداما في العالم، حيث يزيد استهلاكها عن 1 متر مكعب لكل فرد سنويا في البلدان الصناعية. من ثم فإن هدم المباني القديمة وتلك المهتمة بفعل الزلازل ينتج انقاصا خرسانية يتم التخلص منها غالبا في مفاغ عشوائية. ولكن بعد تحويلها عن طريق التكسير تشكل مورداً لا ينضب من الحصى المعاد تدويره (GR). ويشكل استخدام الحصى المعاد تدويره في الخرسانة بديلاً عن الحصى الطبيعي (GN) نهجاً مثيراً للاهتمام.

في الواقع، يمكن أن تندرج إعادة تدوير هذه النفايات ضمن إطار التنمية المستدامة، من خلال المساهمة في الحفاظ على الموارد الطبيعية غير المتجددة. غير ان الركام المعاد تدويره من الخرسانة يتميز بخواص اقل من تلك التي يتمتع بها الركام الطبيعي (GN)، مثل ارتفاع معدل امتصاص الماء، زيادة المسامية، وضعف الخصائص الميكانيكية. حيث تؤثر هذه الخصائص سلبا على خواص الخرسانة التي يدمج فيها هذا الركام، كما تحد من استخداماتها إلى معدلات دمج منخفضة. وتزداد هذه القيود وضوحا عندما يخصص هذا الركام المعاد تدويره لإنتاج الخرسانة ذاتية القوية (BAP)، وهي خرسانة معروفة بمتطلباتها الخاصة من حيث السيولة.

من أجل التغلب على هذه القيود، فإن معالجة الركام الخرساني المعاد تدويره عن طريق الكربنة الطبيعية هو الهدف الرئيسي لهذه الدراسة. يهدف هذا النهج إلى تحسين جودة الملاط القديم الملصق بالركام المعاد تدويره، وذلك بشكل أساسي عن طريق ملء مساماته بفضل ترسيب كربونات الكالسيوم المتكونة أثناء تفاعل الكربنة.

النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة وتفتح الطريق أمام تقنية الكربنة. فقد سمحت المعالجة، من ناحية، بتحسين الخصائص الجوهرية للركام، لا سيما من خلال زيادة كتلته وخفض مساميته وقدرته على امتصاص الماء، فضلاً عن تحسين خصائصه الميكانيكية (مقاومة الصدمات والتآكل). من ناحية أخرى، أدى استخدام الركام المعاد تدويره في حالته المكربنة من تحسين خصائص الخرسانة ذاتية القوية (BAP) في حالتها السائلة، حتى في حالة الاستبدال الكلي للركام الطبيعي (GN)، على عكس استعمالها في حالتها غير المعالجة. علاوة على ذلك، فقد اظهرت الخرسانة ذاتية القوية المحتوية على الركام المكربن مقاومات ضغط وأداءً مرضياً من حيث المتانة، قريبة من تلك الخاصة بالخرسانة ذاتية القوية المصنوعة بالركام الطبيعي.

يجدر التذكير ايضا بان صناعة الخرسانة ذاتية القوية (BAP) تتطلب حجما مرتفعا من العجينة لضمان سيولة جيدة وقابلية للتشكيل في الحالة السائلة. ضمان سيولة جيدة وقابلية للتشكيل في الحالة السائلة. وفي هذه الدراسة، تم تحقيق هذا الحجم من خلال استخدام الحصى الجيرية الناعمة (FC) أو مسحوق الزجاج (PV) أو خبث الأفران المحبب (LG) في الحالة الطازجة، يساهم الحصى الجيري الناعم في تحسين انسيابية الخرسانة ذاتية القوية. بينما في الحالة المتصلبة، فإن مسحوق الزجاج وخبث المحبب هما اللذان يوفّران أفضل الأداءات الميكانيكية ومتانة أعلى.

الكلمات المفتاحية: النفايات، الهدم، الحصى المعاد تدويره، الكربنة، الخرسانة ذاتية القوية، الاضافات المعدنية، الحالة السائلة، ديمومة.

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	IV
Abstract.....	VI
ملخص.....	VIII
Table des matières	X
Table des figures.....	XVII
Liste des tableaux.....	XXII
Liste des abréviations.....	XXIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	2
CHAPITRE I	
ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
1. INTRODUCTION AUX DÉCHETS.....	10
1.1. QU'EST-CE QU'UN DÉCHETS.....	10
1.2. DÉFIS DE LA GESTION DES DÉCHETS.....	10
1.3. CLASSIFICATION DES DÉCHETS.....	10
1.3.1. Déchets ménagers.....	10
1.3.2. Déchets industriels	10
1.3.3. Déchets agricoles	10
1.3.4. Déchets de construction et de démolition.....	11
2. DÉCHETS DE BÉTON DE DÉMOLITION.....	11
2.1. INTRODUCTION.....	11
2.2. QUANTITÉS GÉNÉRÉS ET GESTION ACTUELLE À L'ÉCHELLE MONDIALE ET LOCALE.....	12
2.3. GRANULATS DE BÉTON DE DÉMOLITION.....	13
2.3.1. Définition	13
2.3.2. Procédure de production des granulats de béton recyclés	13
2.3.3. Composition chimique et minéralogique des granulats de béton recyclés.....	14

2.3.4. Propriétés physiques des granulats de béton recyclés	15
2.3.4.1. Morphologie et granulométrie	15
2.3.4.2. Masse volumique	15
2.3.4.3. Absorption d'eau	15
2.3.4.4. Cinétique d'Absorption d'eau	16
2.3.5. Propriétés mécaniques des granulats de béton recyclés	17
2.3.5.1. Résistance l'usure (Micro Deval)	17
2.3.5.2. Résistance à la fragmentation (Los Angeles)	17
2.3.6. Règlementation, normes et domaine d'emploi des bétons recyclés	18
3. TRAITEMENTS PROPOSES POUR L'AMELIORATION DE LA QUALITE DES GRANULATS DE BETON RECYCLÉS.....	20
3.1. TRAITEMENT MÉCANIQUE	20
3.2. TRAITEMENT THERMIQUE	20
3.3. TRAITEMENT THERMIQUE PAR MICRO-ONDE	20
3.4. TRAITEMENT PAR UNE SOLUTION D'ACIDE	21
3.5. TRAITEMENT PAR CARBONATATION	21
3.5.1. Définition du phénomène	21
3.5.2. Transformation physico-chimique induite par la carbonatation...	22
3.5.2.1. Comportement du CO ₂ : diffusion et solubilisation	22
3.5.2.2. Le carbonate de calcium CaCO ₃	24
3.5.3. Paramètres influençant la carbonatation	26
3.5.3.1. Paramètres liés à l'environnement	26
3.5.3.2. Paramètres liés aux propriétés du matériau	27
3.5.4. Techniques de caractérisation de la carbonatation	27
3.5.5. Carbonatation des granulats de béton de démolition	28
4. LES BETONS AUTOPLACANTS (BAP).....	31
4.1. INTRODUCTION AUX BAP	31
4.2. PARTICULARITÉ DE LA FORMULATION DES BAP	31
4.3. APPROCHE DE FORMULATION DES BAP	32
4.4. CARTERISATION DES BAP À L'ÉTAT FRAIS	34
4.5. LES ADDITIONS DANS LES BAP	35
4.5.1. Type et nature des additions minérales.....	35
4.5.2. Rôle des additions minérales dans la performance des matériaux cimentaires.....	36
4.5.2.1. Effet de remplissage	36
4.5.2.2. Effet physique ou de surface (germination hétérogène)...	36
4.5.2.3. Effet chimique (pouzzolanique ou hydraulique)	36
4.5.3. Additions sélectionnées dans cette étude et leur contribution aux BAP.....	37
4.5.3.1. Filler de calcaire.....	37
4.5.3.2. Laitier granulé de haut fourneau.....	39
4.5.3.3. Poudre de verre à bouteilles	40

5. LES BAP À BASE DE GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ.....	41
5.1. EFFET DES GRANULATS RECYCLES CARBONATES OU NON SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS (BAP EN PARTICULIER) À L'ÉTAT FRAIS.....	42
5.2. EFFET DES GRANULATS RECYCLÉS CARBONATÉS OU NON SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS (BAP EN PARTICULIER) À L'ÉTAT DURCI.....	44
5.2.1. <i>Sur les propriétés mécaniques</i>	44
5.2.2. <i>Sur la durabilité</i>	47
6. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

CHAPITRE II

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

1. INTRODUCTION.....	64
2. PRÉSENTATION ET CARACTERISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS.....	64
2.1. CIMENT.....	64
2.2. ADDITIONS MINÉRALES.....	65
2.2.1. <i>Filler calcaire (FC)</i>	65
2.2.2. <i>Laitier granulé de haut fourneau (LG)</i>	66
2.2.3. <i>Poudre de verre à bouteille (PV)</i>	67
2.3. GRANULATS.....	69
2.3.1. <i>Sables</i>	69
2.3.2. <i>Gravillons</i>	69
2.3.3. <i>Cinétique d'absorption des gravillons recyclés</i>	72
2.4. SUPERPLASTIFIANT	72
2.5. EAU DE GÂCHAGE	73
3. PROCÉDURES EXPERIMENTALES.....	73
3.1. PRÉPARATION ET TRAITEMENT DES GRAVILLONS RECYCLES	73
3.2. ANALYSES MICROSTRUCTURALES EFFECTUÉES SUR LES GRAVILLONS RECYCLES.....	74
3.2.1. <i>Analyse thermogravimétrique (ATG)</i>	74
3.2.2. <i>Observation au MEB</i>	75
3.2.3. <i>Porosimétrie par intrusion de mercure (MIP)</i>	76
3.3. PRÉPARATION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES	76
3.4. CARACTERISATION DES BAP À L'ÉTAT FRAIS	77
3.4.1. <i>Étalement au cône d'Abrams</i>	77
3.4.2. <i>Mesure du temps d'écoulement</i>	78
3.4.3. <i>Taux de remplissage à la boîte en L</i>	79

3.4.4. Stabilité au tamis	80
3.4.5. Mesure de la masse volumique	80
3.4.6. Mesure de la teneur en air occlus	81
3.5. CARACTERISATION DES BAP À L'ÉTAT DURCI	81
3.5.1. ÉSSAIS MECANQUES	81
3.5.1.1. Essai de compression	81
3.5.1.2. Module de déformation dynamique	82
3.5.2. INDICATEURS DE DURABILITÉ	83
3.5.2.1. Essai d'absorption d'eau par capillarité	83
3.5.2.2. Mesure de la porosité accessible à l'eau	84
3.5.2.3. Essai de perméabilité à l'air	85
3.5.2.4. Essai de carbonatation accélérée	87
4. SYNTHÈSE	89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES FORMULATIONS DES BAP A BASE DES GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS

1. INTRODUCTION	97
2. MÉTHODE DE FORMULATION UTILISÉE.....	97
2.1. Approche de formulation	97
2.2. Ajustement apporté au niveau des BAP contenant 100% GRF	98
3. TESTS EFFÉTUÉS ET DÉROULEMENTS CHRONOLOGIQUES DES ESSAIS.....	99
3.1. Essais effectués à l'état frais et leur déroulement chronologique.....	99
3.2. Essais effectués à l'état durci	100
4. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS.....	100
4.1.Étalement au cône d'Abrams et temps d'écoulement (T500).....	100
4.2.Taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX).....	104
4.3.Stabilité au tamis	106
4.4.Masse volumique du béton frais et teneur en air occlus	108

5. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT DURCI.....	111
5.1. <i>Resistance en compression.....</i>	111
5.2. <i>Absorption d'eau par capillarité</i>	113
6. SYNTHESE.....	115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	117

CHAPITRE IV

RÉSULTATS OBTENUS SUR LES BAP A BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS CARBONATÉS À L'ÉTAT FRAIS

1. INTRODUCTION.....	124
PARTIE I: CARBONATATION ET CARACTERISATION DES GRANULATS RECYCLES CARBONATES.....	124
2.1. <i>ÉTAT DE CARBONATATION</i>	124
2.2. <i>ANALYSES MICROSTRUCTURALES (ATG ET MEB)</i>	125
2.3. <i>PROPRIÉTÉS PHYSIQUES</i>	128
2.3.1 <i>Masses volumiques.....</i>	128
2.3.2. <i>Absorption d'eau.....</i>	130
2.3.3. <i>Porosimétrie par intrusion de mercure (MIP).....</i>	131
2.4. <i>PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES</i>	133
2.4.1. <i>Résistances aux chocs et à l'usure</i>	133
3. PARTIE II : RÉSULTATS OBTENUS SUR LES BAP À L'ÉTAT FRAIS.	135
3.1. <i>COMPOSITION DES BAP</i>	135
3.2. <i>RÉSULTATS À L'ÉTAT FRAIS</i>	136
3.2.1. <i>Étalement au cône d'Abrams.....</i>	136
3.2.2. <i>Temps d'écoulement (T500).....</i>	137
3.3.4. <i>Taux de remplissage à la boîte en L</i>	138

3.3.5. <i>Stabilité au tamis</i>	140
3.3.6. <i>Masse volumique et teneur en air occlus</i>	142
4. SYNTHÈSE	144
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145

CHAPITRE V

COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET DURABILITÉ DES BAP : EFFET DES GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS ET CARBONATÉS ET DES ADDITIONS MINÉRALES

1. INTRODUCTION	150
2. CARACTERISATION MÉCANIQUE DES BAP	150
2.1. <i>Resistance en compression</i>	150
2.2. <i>Module de déformation dynamique</i>	153
3. DURABILITÉ DES BAP	155
3.1. <i>Absorption d'eau capillaire</i>	155
3.2. <i>Porosité accessible à l'eau</i>	159
3.3. <i>Perméabilité à l'air</i>	160
3.4. <i>Carbonatation accélérée</i>	163
3.4.1. <i>Profondeur de carbonatation</i>	163
3.4.2. <i>Suivi de masse</i>	165
4. SYNTHESE	166
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	168
CONCLUSION GÉNÉRALE	171
PERSPECTIVES	175
ANNEXES	177
ANNEXE A : Fiche technique du ciment	178

ANNEXE B : Fiche technique du filler calcaire.....	180
ANNEXE C : Fiche technique du superplastifiant	181

Table des figures

0	Contexte et plan d'action du travail de thèse	05
1.1	Granulat recyclé constitué d'une phase inerte (granulat naturel) et d'un mortier résiduel adhérent (Deodonne, 2015)	13
1.2	Comparaison morphologique d'un granulat naturel et un granulat recyclé (Bai et al, 2020)	13
1.3	Principales étapes suivies dans la production des granulats recyclés (DRIEE, IAU îdF, et Unicem., 2017)	14
1.4	Relation entre l'absorption d'eau et la quantité de mortier collé (De Juan et al., 2008)	16
1.5	Relation entre le pourcentage de mortier attaché et le coefficient (LA) pour les granulats recyclés (De Juan et al, 2008)	18
1.6	Processus de carbonatation de l'hydroxyde de calcium $Ca(OH_2)$ selon Thiery (Thiery, 2007).....	23
1.7	Transformation chimique induite lors de la carbonatation des granulats recyclés (Zhan et al, 2020).....	29
1.8	Diagramme de Keil : relation entre la composition de laitier et du clinker (Bellara, 2022)	39
1.9	Évolution de la résistance mécanique des bétons contenant des GBR frais et carbonatés (Xuan et al, 2016).....	46
2.1	Image MEB du filler calcaire (agrandissement de 3000).....	66
2.2	Diffractogramme RX du filler calcaire.....	66
2.3	Image MEB du laitier granulé (agrandissement de 3000).....	67
2.4	Diffractogramme RX du laitier granulé.....	67
2.5	Image MEB de la poudre de verre (agrandissement de 3000).....	68
2.6	Diffractogramme RX de la poudre de verre.....	68
2.7	Granulomètre laser Coulter LS 230 (IMT Nord-Europe, Lille).....	69
2.8	Courbe granulométrique du ciment et des ajouts utilisés.....	69

2.9	Déchets de déconstruction.....	70
2.10.	Différents types de gravillons utilisés : a. gravillon naturel, b. gravillon recyclé non traité (frais), c. gravillon recyclé carbonaté.....	70
2.11	Courbe granulométrique des granulats.....	71
2.12	Cinétique d'absorption des gravillons recyclés.....	72
2.13	Exposition et traitement des gravillons recyclés.....	73
2.14	Évolution de l'état de carbonatation des gravillons recyclés : a. Gravillons recyclés non carbonatés, b. Gravillons recyclés partiellement carbonatés, c. Gravillons recyclés totalement carbonatés.....	74
2.15	Appareil d'analyse thermogravimétrique (ATG) Netzsch STA 449F3 (IMT Nord-Europe, Lille).....	75
2.16	MEB JEOL utilisé pour les observations microstructurales (IMT Nord-Europe, Lille).....	75
2.17	Prosimètre à mercure (IMT Nord-Europe, Lille).....	76
2.18	Essais d'étalement au cône d'Abrams.....	77
2.19	Différents étalements de BAP (LMGE, Annaba) : (a). Étalement d'un BAP homogène et stable, (b). Étalement d'un BAP hétérogène présentant des signes de ségrégation et de ressuage.....	78
2.20	Essai de la boîte en L.....	79
2.21	Essai de stabilité au tamis	80
2.22	Béton en repos pour le calcul du pourcentage de laitance traversant le tamis, (LMGE, Annaba)	80
2.23	Mesure de la masse volumique du béton frais et la teneur en air occlus à l'aide de l'aéromètre (LMGE, Annaba) : a. Mesure de la masse volumique du béton frais dans la cuve de l'aéromètre, b. Mesure de la teneur en air occlus « Méthode de compressibilité »	81
2.24	Mesure de la résistance en compression (LMGE, Annaba)	82
2.25	Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (LMGE, Annaba)	82
2.26	Dispositif de mesure de l'absorption d'eau par capillarité.....	84
2.27	Mesure de l'absorption d'eau par capillarité (LMGE, Annaba)	84
2.28	Dispositif de mesure de la porosité accessible à l'eau	85

2.29	Mesure de la porosité accessible à l'eau (IMT Nord-Europe, Lille)	85
2.30	Essai de la perméabilité à l'air (IMT Nord-Europe)	86
2.31	Détermination de la perméabilité intrinsèque en fonction de l'inverse de la pression moyenne, selon le modèle empirique de Klinkeberg	87
2.32	Eprouvettes destinées pour la détermination de la profondeur de la carbonatation (IMT Nord-Europe)	88
3.33	Mesure de la profondeur de carbonatation des éprouvettes	88
3.1	Séquence expérimentale de la réalisation des essais de caractérisation à l'état frais.....	100
3.2	Effet du remplacement partiel et total des GN par des GBR frais sur l'étalement et le T500 des BAP.....	101
3.3	Influence du remplacement des GN par des GBRF (a) . BAP contenant 100% GN, (b) . BAP contenant 100 % GBRF	102
3.4	Effet du remplacement partiel et total des GN par des GBR frais sur le taux de remplissage à la boîte en L des BAP.....	104
3.5	Capacité de remplissage à la boîte en L (a) . BAP avec 100% GN, (b) . BAP avec 100% GBRF.....	105
3.6	Effet du remplacement partiel et total des GN par des GBR frais sur la résistance à la ségrégation des BAP.....	107
3.7	Effet de l'incorporation des GBR frais sur la masse volumique et la teneur en air occlus des BAP	109
3.8	Relation entre l'augmentation de l'air occlus et la diminution de la masse volumique	110
3.9	Effet de l'incorporation des GBR frais sur la résistance à la compression des BAP	111
3.10	Effet de la substitution partielle et totale des GN par les GBRF, et des additions minérales sur l'absorption d'eau capillaire des BAP	114
4.1	Évolution de l'état de carbonatation des gravillons recyclés.....	125
4.2	Évolution thermique et microstructurales des gravillons recyclés	126
4.3	Évolution des masses volumiques des granulats recyclés après carbonatation : (a) . Masse volumique apparente, (b) . Masse volumique réelle.....	129

4.4	Évolution des coefficients d'absorption d'eau à 24 h des granulats recyclés après carbonatation.....	130
4.5	Microstructure poreuse des gravillons recyclés avant et après carbonatation....	131
4.6	Distribution de la porosité avant et après carbonatation.....	132
4.7	Évolution des résistances mécaniques des granulats recyclés après carbonatation : (a) . Résistance aux chocs (Los Angeles), (b) . Résistance à l'usure (Micro Deval).....	133
4.8	Relation entre l'augmentation de la masse volumique apparente des GBRC et les indices de Los Angeles et de micro-Deval.....	135
4.9	Variation de l'étalement en fonction du type de gravillon et d'addition minérale.....	136
4.10	Effet des gravillons recyclés et des additions minérales sur le temps d'écoulement des BAP.....	138
4.11	Variation du taux de remplissage à la boîte en L en fonction du type de gravillons et d'addition minérale.....	139
4.12	Masse volumique des BAP à l'état frais selon le type de gravillon et d'addition minérale.....	141
4.13	Teneur en air occlus des bétons frais en fonction du type de gravillon et des ajouts utilisés.....	142
4.14	Teneur en air occlus des bétons frais en fonction du type de gravillon et des ajouts utilisés.....	143
5.1	Évolution des résistances mécaniques en compression : effet du gravillon et des additions utilisées	151
5.2	Évolution des modules d'élasticité dynamique en fonction du type de gravillons et des additions utilisées	154
5.3	Absorption d'eau par capillarité des BAP optimisés.....	156
5.4	Évolution de la sportivité en fonction du type de gravillons, des additions utilisées et des échéances de mesure	158
5.5	Évolution de la porosité ouverte en fonction du type de gravillons et des additions.....	159
5.6	Influence du type de gravillons et d'additions sur la perméabilité apparente à l'air des BAP	161
5.7	Évolution de la perméabilité intrinsèque (K_{int}) des BAP d'études	162

5.8	Mesure de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps.....	163
5.9	Suivi de la variation de masse durant le processus de carbonatation accélérée des BAP étudiés	165

Liste des tableaux

1.1	Taux de remplacement des GN par les GBR et domaine d'utilisation selon les réglementations internationales (Shaban et al, 2019).	19
1.2	Principales propriétés des polymorphes (calcite, aragonite et vaterite) du carbonate de calcium	25
1.3	Principales approches de formulation des BAP.....	32
1.4	Essais d'évaluation des propriétés des BAP à l'état frais.....	34
2.1	Propriétés physiques, composition chimique et minéralogique du ciment (CEMI 42,5 R).....	65
2.2	Composition chimique et propriétés physiques du filler calcaire	65
2.3	Composition chimique et propriétés physiques du laitier granulé.....	66
2.4	Composition chimique et propriétés physiques de la poudre de verre.....	68
2.5	Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats.....	71
2.6	Caractéristiques techniques du Superplastifiant POLYFLOW LSR 8800.....	72
2.7	Séquence de malaxage du BAP	76
3.1	Proportions des mélanges de BAP utilisés	99
4.1	Compositions des BAP optimisées.....	135
4.2	Description des mélanges de BAP étudiés.....	136

Liste des abréviations

MATÉRIAUX ET CONSTITUANTS

GN	Granulats Naturels
GR	Granulats recyclés
GBR	Granulats de béton recyclés
GBR-F	Granulats de béton recyclés frais (non-traités)
GBR-C	Granulats de béton recyclés carbonatés
C	Ciment
FC	Filler de calcaire
LG	Laitier granulé de haut fourneau
PV	Poudre de verre à bouteilles
SP	Superplastifiant
E	Eau

COMPOSÉS CHIMIQUES

CO₂	Dioxyde de carbone
CaOH₂	Hydroxyde de Calcium hydraté (portlandite)
CSH	Silicate de Calcium hydraté
CaCO₃	Carbonate de Calcium

BÉTONS

BAP	Béton autoplaçant
BAP0	BAP contenant 100% de gravillons naturels
BAP25	BAP contenant 25% de gravillons recyclés et 75% de gravillons naturels
BAP50	BAP contenant 50% de gravillons recyclés et 50% de gravillons naturels
BAP75	BAP contenant 75% de gravillons recyclés et 25% de gravillons naturels
BAP 100	BAP contenant 100% de gravillons recyclés

**BAP
100C** BAP contenant 100% de gravillons recyclés corrigé par ajustement du dosage de l'eau d'apport

**BAP
GBRC** BAP contenant 100% de gravillons recyclés carbonatés

RAPPORTS ET PROPORIONS

E/C Rapport massique de la teneur en Eau / Ciment

E/L Rapport massique du dosage en Eau / le Liant (ciment + addition)

G/S Graviers/Sables

D₅₀ Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 50%

MDE Indice d'usure à l'abrasion

LA Indice de fragmentation par chocs

MÉTHODES D'ANALYSES ET CARACTERISATIONS

DRX Diffraction aux rayons X

ATG Analyse thermogravimétrique

MEB Microscope électronique à balayage

MIP Porosimétrie par intrusion de mercure

T500 Temps d'écoulement au cône d'Abrams (mm)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour produire du béton structural, environ 70 % de son volume est constitué de granulats issus des ressources naturelles. Or, comme toutes les ressources naturelles, les carrières de granulats ne sont pas inépuisables et finiront par s'épuiser, notamment avec l'usage massif du béton à travers le monde. De plus, le béton en fin de vie est souvent démolé. Cela peut être dû à l'apparition de pathologies qui dégradent l'ouvrage, ou encore à des catastrophes naturelles comme les séismes ou les incendies.

Ainsi, deux grands défis se posent aujourd'hui, en particulier dans des pays comme l'Algérie : l'épuisement des ressources non renouvelables essentielles à la production du béton et la gestion des déchets solides. Répondre à ces enjeux est primordial afin de préserver l'environnement et de s'intégrer dans une approche d'économie circulaire.

La véritable solution à ces deux défis réside principalement dans la valorisation et le réemploi des déchets de béton de démolition sous forme granulaire, afin de les utiliser comme une alternative aux granulats naturels. Cet axe de recherche a été largement exploré dans les précédentes recherches scientifiques, et les conclusions s'accordent sur le fait que leur utilisation, notamment à des taux d'incorporation élevés, dans la fabrication du béton structural reste limitée. En effet, les GBR sont des matériaux hétérogènes, constitués d'une fraction naturelle inerte provenant du granulat, et d'une partie réactive, constituée de l'ancien mortier. Or, cette phase de mortier présente des propriétés médiocres : faible densité, forte absorption d'eau, porosité accrue et performances mécaniques faibles. Ces faiblesses sont d'autant plus marquées lorsque le béton d'origine lui-même est de faible résistance mécanique.

Ainsi, la question de départ de ce projet a été la suivante :

- Comment relever les défis de la gestion durable des ressources naturelles et de la sauvegarde de l'environnement en travaillant avec un matériau de qualité médiocre ?

Plusieurs solutions et traitements ont été préalablement étudiés, tels que les traitements mécaniques, thermiques, le traitement par des solutions acides, etc. Ces traitements se sont révélés plus ou moins efficaces pour améliorer ou éliminer le vieux mortier, mais ils présentent deux inconvénients majeurs : un coût élevé et un effet néfaste sur l'environnement.

Le phénomène de la carbonatation, généralement considéré comme une pathologie nuisible pour le béton armé en raison des dommages qu'il provoque sur les armatures en acier, peut en revanche apporter des avantages pour les bétons non armés. En effet, la carbonatation contribue à augmenter la masse du matériau et à combler une partie de sa porosité grâce à la formation de carbonate de calcium. C'est dans cette logique que l'idée d'utiliser la carbonatation comme traitement innovant pour améliorer les propriétés des granulats de bétons recyclés est apparue.

Ainsi, ce travail est organisé en deux sections principales

La première est basée principalement sur l'évaluation de la faisabilité et l'efficacité d'un traitement par carbonatation naturelle des granulats de béton recyclés, réalisée à l'air libre dans

un garage de réparation mécanique, afin de répondre aux deux questions principales posées initialement :

- Est-il possible de traiter efficacement à l'air libre les granulats issus du recyclage du béton ?
- Quelle durée nécessite ce traitement lorsqu'il est effectué dans une zone considérée comme un environnement industriel?

parmi les bétons innovants développés depuis les années 1980 figure le béton autoplaçant (BAP). Par définition, le BAP se distingue par une grande fluidité et une forte déformabilité, ce qui lui permet de s'écouler et de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans recours à aucun moyen de vibration, même dans les zones fortement ferraillées.

Cette déformabilité accrue, associée à la réduction des risques de ségrégation, est assurée principalement par un volume de pâte élevé. Ce volume est obtenu généralement grâce à l'utilisation du ciment combiné à une addition minérale. Le filler calcaire est l'ajout minéral le plus couramment employé. Toutefois, il est issu de ressources naturelles non renouvelables et sa production est énergivore.

D'autres ajouts fins, tels que le laitier granulé de haut fourneau et la poudre de verre, peuvent remplacer le filler calcaire. Leur valorisation présente un effet écologique et s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire. Contrairement au filler calcaire, qui est une addition inerte et n'améliore les performances des BAP qu'au jeune âge par un simple effet de remplissage et de germination hétérogène, la poudre de verre et le laitier granulé sont des ajouts réactifs. La poudre de verre possède une réactivité pouzzolanique, tandis que le laitier granulé possède un pouvoir hydraulique latent. Ces caractéristiques permettent d'améliorer non seulement les propriétés du béton à jeune âge, mais aussi les performances mécaniques et de durabilité.

Dans cette deuxième section de ce travail, les réponses aux questions suivantes seront étudiées :

- Est-il possible de remplacer le filler calcaire par la poudre de verre ou le laitier granulé ?
- Quels sont les impacts de ces deux ajouts sur les propriétés des BAP à l'état frais, et peut-on conserver les mêmes propriétés d'autoplaçantes obtenues par l'emploi du filler calcaire ?
- L'utilisation des additions réactives permet-elle d'améliorer le comportement mécanique et la durabilité des BAP contenant des granulats de béton démolé ?

Afin d'apporter des réponses aux hypothèses soulevées, il a été nécessaire de suivre une démarche expérimentale constituée de plusieurs étapes successives et complémentaires, cette orientation méthodologique a conduit à organiser ce manuscrit de thèse en cinq chapitres:

➤ **Chapitre I**

La partie initiale du manuscrit s'attache à présenter une synthèse des travaux récents relatifs au recyclage des bétons issus de la démolition, à leur traitement par carbonatation et aux effets des granulats recyclés sur les propriétés des bétons, aussi bien à l'état frais qu'après durcissement. Elle traite également de l'influence des additions minérales, notamment le FC, la PV et le LG, sur le comportement des BAP.

➤ **Chapitre II**

Le deuxième chapitre décrit la démarche expérimentale adoptée. La première section est dédiée à la présentation de tous les matériaux de base utilisés, ainsi qu'à leur caractérisation physique et mécanique. La seconde partie détaille le protocole de malaxage, la confection des éprouvettes et les procédures expérimentales effectuées pour caractériser les BAP, à l'état frais et durci.

➤ **Chapitre III**

Cette phase initiale du travail examine l'effet de l'incorporation (25 %, 50%, 75% et 100 %) des gravillons de béton recyclés frais (non traités) incorporés en remplacement des gravillons naturels. L'impact des ajouts minéraux, le filler calcaire, la poudre de verre et le laitier granulé sur l'attitude des BAP à l'état frais et durci a été également étudié.

➤ **Chapitre IV**

Ce chapitre porte sur l'optimisation et la sélection des formulations, en vue d'analyser l'effet de l'incorporation totale des gravillons issus du béton démoli, soumis à un traitement de carbonatation, sur les propriétés à l'état frais des BAP.

➤ **Chapitre V**

Le cinquième et dernier chapitre de cette thèse évalue l'impact du remplacement total des gravillons naturels par les GBR-F et les GBR-C sur les propriétés à l'état durci des BAP (caractéristiques mécaniques et durabilité).

Finalement, ce travail de recherche expérimentale sera achevé par une conclusion générale qui présentera les principaux résultats obtenus. Cette conclusion sera également accompagnée de perspectives, ouvrant des pistes d'investigation pour la suite de l'étude.

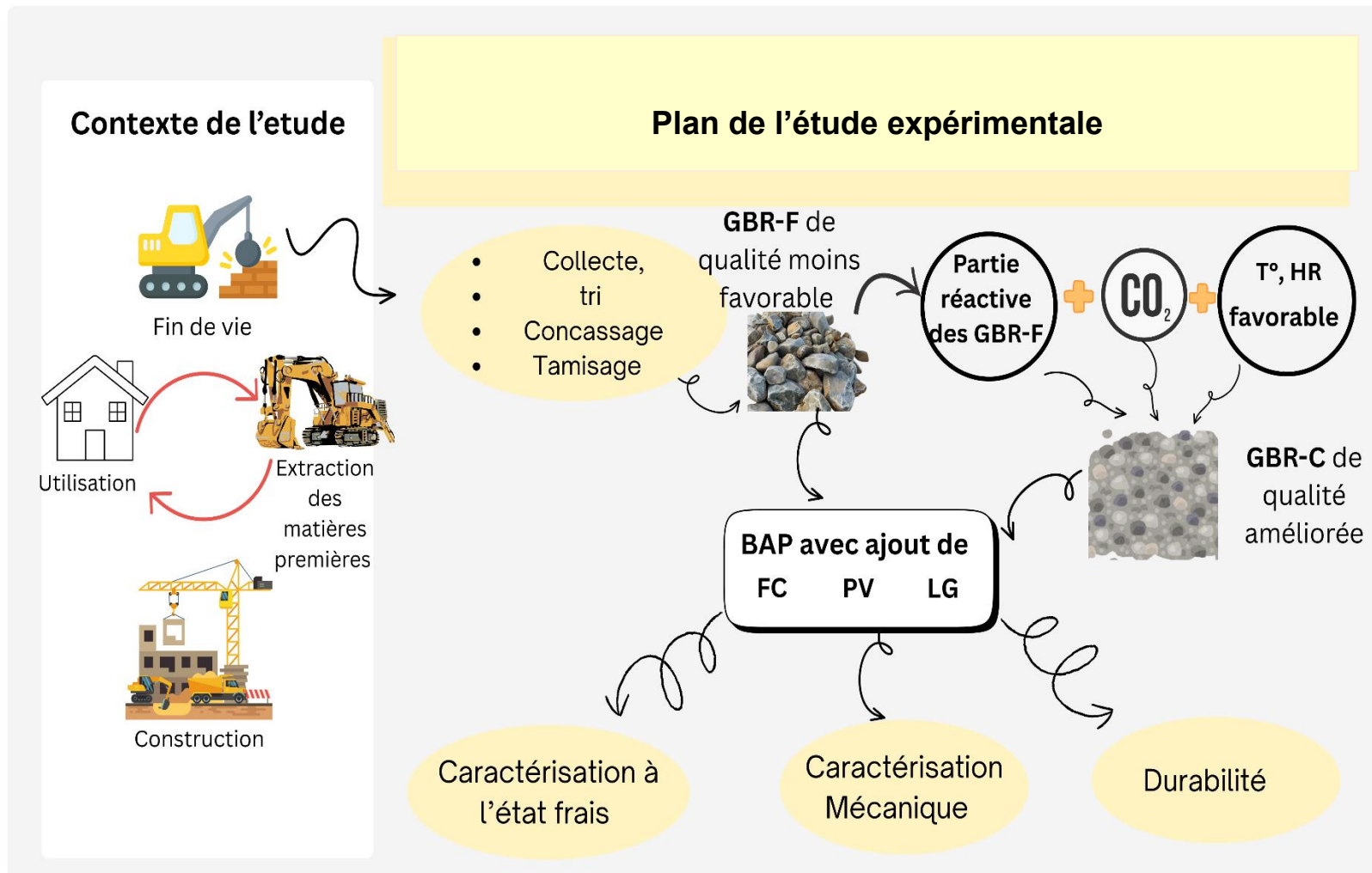


Figure 0 – Contexte et plan d'action du travail de thèse

CHAPITRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCES

CHAPITRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Cette partie rassemble les connaissances issues des études antérieures et met en évidence les propriétés des granulats dérivés de bétons de déconstruction à travers une synthèse bibliographique. Il aborde également les traitements proposés pour améliorer la qualité de ces granulats, notamment le traitement par carbonatation. La présentation se poursuit par une description des propriétés essentielles des bétons autoplaçants (BAP) ainsi que de l'influence des ajouts minéraux, issus de déchets ou de sous-produits, sur leur comportement à l'état frais et après durcissement. Par ailleurs, le chapitre s'intéresse à l'effet de la substitution des granulats naturels par ceux provenant de bétons de démolition, utilisés soit bruts soit après carbonatation, sur les caractéristiques d'écoulement, les résistances mécaniques et la durabilité des bétons (BAP en particulier).

Sommaire

1. INTRODUCTION AUX DÉCHETS	10
1.1 QU'EST CE QU'UN DECHET	10
1.2 DEFIS DE LA GESTION DES DECHETS.....	10
1.3 CLASSIFICATION DES DECHETS	10
1.3.1 Déchets ménagers	10
1.3.2 Déchets industriels.....	10
1.3.3 Déchets agricoles.....	10
2.2.4 Déchets de construction et de démolition	11
2. DECHETS DE BETON DE DEMOLITION.....	11
2.1 INTRODUCTION.....	11
2.2 QUANTITES GENEREES A L'ECHELLE MONDIALE ET LOCALE	12
2.3 GRANULATS DE BETON DE DEMOLITION	13
2.3.1 Définition	13
2.3.2 Procédure de production des granulats de béton recyclés.....	13
2.3.3 Composition chimique et minéralogique des granulats de béton recyclé	14
2.3.4 Propriétés physiques des granulats de béton recyclé	15
2.3.4.1 Morphologie et granulométrie	15
2.3.4.2 Masse volumique.....	15
2.3.4.3 Absorption d'eau.....	15
2.3.4.4 Cinétique d'absorption d'eau	16
2.3.5 Propriétés mécaniques des granulats de béton recyclé	17

2.3.5.1	<i>Résistance à l'usure (Micro Deval)</i>	17
2.3.5.2	<i>Résistance à la fragmentation (Los Angeles)</i>	17
2.3.6	<i>Réglementation, normes et domaine d'emploi des granulats de béton recyclé</i>	18
3. TRAITEMENTS PROPOSÉS POUR L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DES GRANULATS DE BETON RECYCLÉ		20
3.1	TRAITEMENT MECANIQUE	20
3.2	TRAITEMENT THERMIQUE.....	20
3.3	TRAITEMENT THERMIQUE PAR MICRO ONDE	20
3.4	TRAITEMENT PAR UNE SOLUTION D'ACIDE.....	21
3.5	TRAITEMENT PAR CARBONATATION	21
3.5.1	<i>Définition du phénomène</i>	21
3.5.2	<i>Transformation physico-chimique induite par la carbonatation</i>	22
3.5.2.1	<i>Comportement du CO₂ : Diffusion et solubilisation</i>	22
3.5.2.2	<i>Le carbonate de calcium (CaCO₃)</i>	24
3.5.3	<i>Paramètres influençant la carbonatation</i>	26
3.5.3.1	<i>Paramètres liés à l'environnement</i>	26
3.5.3.2	<i>Paramètres liés au matériau</i>	27
3.5.4	<i>Techniques de caractérisation de la carbonatation</i>	27
3.5.5	<i>Carbonatation des granulats de béton de démolition</i>	28
4. LES BÉTONS AUTOPLAÇANTS		31
4.1	INTRODUCTION AUX BAP	31
4.2	PARTICULARITE DE LA FORMULATION DES BAP.....	31
4.3	APPROCHE DE FORMULATION DES BAP	32
4.4	CARATERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS.....	34
4.5	LES ADDITIONS DANS LES BAP	35
4.5.1	<i>Type et nature des additions minérales</i>	35
4.5.2	<i>Rôle des additions minérales dans la performance des matériaux cimentaires</i>	36
4.5.2.1	<i>Effet de remplissage</i>	36
4.5.2.1	<i>Effet physique ou de surface (germination hétérogène)</i>	36
4.5.2	<i>Effet chimique (pouzzolanique ou hydraulique)</i>	36
4.5.3	<i>Additions sélectionnées dans cette étude et leur contribution aux BAP</i>	37
4.5.3.1	<i>Filler de calcaire</i>	37
4.5.3.2	<i>Laitier granulé de haut fourneau</i>	38
4.5.2	<i>Poudre de verre à bouteille</i>	40
5. LES BAP A BASE DE GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ		41
5.1	EFFET DES GRANULATS RECYCLES CARBONATES OU NON SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS (BAP EN PARTICULIER) A L'ETAT FRAIS.....	42

5.2 EFFET DES GRANULATS RECYCLES CARBONATES OU NON SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS (BAP EN PARTICULIER) A L'ETAT DURCI.....	44
<u>5.2.1 Sur les propriétés mécaniques.....</u>	44
<u>5.2.2 Sur la durabilité.....</u>	46
6. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES	48
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	50

CHAPITRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCES

1. INTRODUCTION AUX DECHETS

1.1. Qu'est-ce qu'un déchet ?

On appelle déchet tout bien ou substance dont le détenteur doit ou souhaite se débarrasser, comme défini par le code de l'environnement, article « L541-1-1 ».

1.2. Défis de la gestion des déchets

La gestion et la valorisation des déchets constitue aujourd'hui un enjeu majeur à l'échelle nationale et mondiale, dans le but de :

- Réduire l'empreinte carbone et protéger l'environnement
- Préserver les ressources naturelles
- Promouvoir une économie circulaire et créer de nouvelles opportunités économiques

1.3. Classification des déchets

Les déchets peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur origine :

1.3.1. Déchets ménagers :

Composés principalement de matières organiques, papiers, verre et plastiques. Ils sont généralement traités par incinération, enfouissement ou recyclage.

1.3.2. Déchets industriels :

Résultant principalement des activités de production industrielle, ces déchets proviennent de divers secteurs comme la métallurgie, l'industrie chimique, la fabrication automobile, etc. Ils représentent une grande diversité en termes de composition et ils nécessitent des traitements adaptés tels que le recyclage, la valorisation énergétique ou des procédés spécifiques comme l'incinération.

1.3.3. Déchets agricoles :

Provenant des activités de production végétale et animale, ils incluent principalement des résidus organiques tels que les fumiers, les résidus de culture et les sous-produits agroalimentaires. Leur valorisation peut passer par le compactage, la méthanisation pour la

production de biogaz, ou encore leur utilisation comme amendements organiques pour l'agriculture.

1.3.4. Déchets de construction et de démolition :

Ils contribuent significativement au volume global des déchets solides dans le monde. Ces déchets composés principalement de béton, briques, bois possèdent un potentiel de valorisation intéressant. Leur réutilisation dans le secteur du bâtiment apparaît aujourd'hui comme une solution prometteuse pour réduire la pression sur les ressources naturelles tout en limitant les impacts environnementaux liés à ce secteur.

La gestion des déchets ne se limite pas à leur simple élimination. Elle s'inscrit dans une démarche globale visant à protéger l'environnement, préserver les ressources naturelles et favoriser une économie circulaire. Chaque type de déchet, qu'il soit ménager, industriel, agricole ou issu de la démolition, représente à la fois un défi et une opportunité.

« Dans un Monde Durable, Rien ne se jette, Tout se Transforme »

2. DECHETS DE BETON DE DEMOLITION

2.1. Introduction

Le secteur de la construction produit d'importantes quantités de déchets annuellement. Parmi ces déchets, le béton occupe une place prépondérante, étant le matériau de construction le plus utilisé au monde, avec une consommation annuelle moyenne de 14 milliards de mètres cubes (GGCA,2020). Les granulats (sables, gravillons et graviers) qui constituent entre 60 et 70% du volume total du béton (Deodonne, 2015) proviennent de ressources naturelles non renouvelables. Une telle exploitation intensive des matériaux naturels a des conséquences environnementales significatives, en particulier en ce qui concerne la détérioration des écosystèmes, la raréfaction des ressources minérales et l'accroissement des rejets de gaz à effet de serre associés à leur extraction et à leur transport.

Le recyclage des déchets de démolition s'impose comme une stratégie envisageable pour réduire l'impact environnemental de ce secteur. Cette approche contribue à diminuer le volume de déchets dirigés vers les décharges et à restreindre les émissions de CO₂ associées à la fabrication de matériaux neufs (Fraj et al., 2017), favorisant ainsi une économie circulaire. En parallèle, elle répond également à la demande croissante en granulats dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics, tout en contribuant à une gestion plus durable des ressources naturelles. Ces granulats recyclés peuvent être utilisés comme substituts partiels ou totaux aux granulats naturels, offrant une solution durable pour le secteur de la construction et répondant aux exigences de chantiers modernes.

2.2. Quantité générée et gestion actuelle à l'échelle mondiale et locale

Connaître les quantités générées et les pratiques de gestion actuelles est une initiation cruciale pour élaborer des solutions adaptées à chaque contexte, en visant une réduction significative de l'effet de ces déchets sur l'environnement. Les volumes de déchets de construction et de démolition enregistrés à travers le monde diffèrent largement d'une zone géographique à l'autre, avec des niveaux élevés observés dans les pays à forte activité de construction et de rénovation.

En Chine, plus d'un milliard de tonnes de déchets issus de la construction sont produites chaque année, le secteur du bâtiment étant responsable d'environ 25 % des émissions nationales de gaz à effet de serre. Au Canada, près de 9 millions de tonnes de déchets de construction sont recensées annuellement, dont une proportion importante issue de la démolition, et près de 50 % sont enfouis en décharge. Ce secteur contribue aussi à 13,1 % des 674 millions de tonnes de CO_2 émises en 2020, ce qui le place parmi les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre du pays (Sajas, L., et al. 2024).

Les données relatives à la France indiquent qu'en 2014, le secteur du bâtiment et des travaux publics a généré environ 46 millions de tonnes de déchets, dont près de 23 millions résultaient de la démolition. Ce secteur représente en outre près de 43 % de la consommation d'énergie nationale et environ 23 % des rejets de gaz à effet de serre (Lachat, A., 2022).

A l'échelle nationale, en Algérie et d'après les statistiques de Dialnet (Dialnet, 2024), les déchets de construction et de démolition représentent le deuxième type de déchets le plus volumineux après les déchets ménagers et assimilés, avec une production annuelle de 11 millions de tonnes. Le rapport de l'Agence nationale des déchets (AND, 2020) indique qu'en Algérie, la quantité de déchets issus de la construction et de la démolition a atteint environ 13 millions de tonnes en 2020. Ce volume est en constante augmentation et pourrait atteindre environ 27 millions de tonnes d'ici 2035, si le rythme actuel de construction se maintient. Cependant, la mise en application des mesures inscrites dans le Schéma national de gestion intégrée des déchets (SNGID) permettrait de ramener ce volume à environ 25,7 millions de tonnes, en favorisant des actions orientées vers la valorisation et le recyclage des déchets de construction et de démolition.

Actuellement, la gestion de ces déchets en Algérie repose principalement sur leur stockage dans des centres de décharges pour des déchets inertes ou sur leur dépôt dans des zones de gravats. Toutefois, cette approche reste largement insuffisante pour relever les défis environnementaux engendrés par la croissance de ces volumes. La SNGID ambitionne de valoriser 60 % de ces déchets à l'horizon 2035, grâce à différentes méthodes, dont le tri, le concassage et la réutilisation des matériaux (SNGID 2035, 2020). Cependant, ces pratiques sont encore peu développées en Algérie.

En conclusion, les déchets de démolition représentent un enjeu crucial pour la gestion des déchets en Algérie. Le développement du recyclage, associé à une réglementation renforcée,

pourrait transformer ces déchets en une ressource précieuse pour le secteur du BTP. Une gestion efficace et durable permettra non seulement de réduire leur impact environnemental, mais également de contribuer à l'intégration des principes de l'économie circulaire dans la stratégie nationale.

2.3. Granulats de béton recyclés

2.3.1. Définition

Les granulats recyclés de béton proviennent essentiellement du concassage de déchets de béton durci, générés lors d'opérations de construction, de déconstruction ou encore à la suite de sinistres tels que les séismes ou les incendies. Contrairement aux granulats d'origine naturelle, ils présentent une composition hétérogène, en raison de la présence de mortier résiduel adhérent aux granulats initiaux, comme montré dans les figures 1.1 et 1.2. Ce mortier est considéré comme la partie réactive du granulat, dont la quantité dépend principalement de la taille globale de ce dernier, et elle varie probablement entre 20 et 60 % (Kapoor et al., 2020).

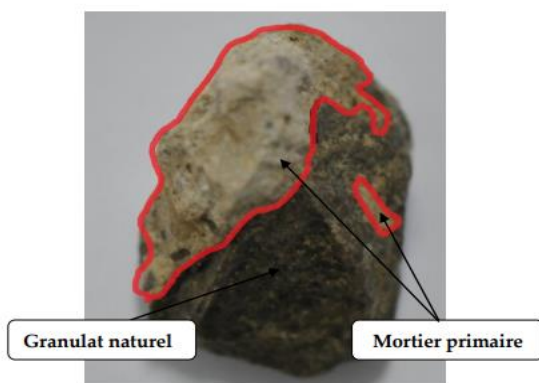


Figure 1.1. Granulat recyclé constitué d'une phase inerte (granulat naturel) et d'un mortier résiduel adhérent (Deodonne, 2015)

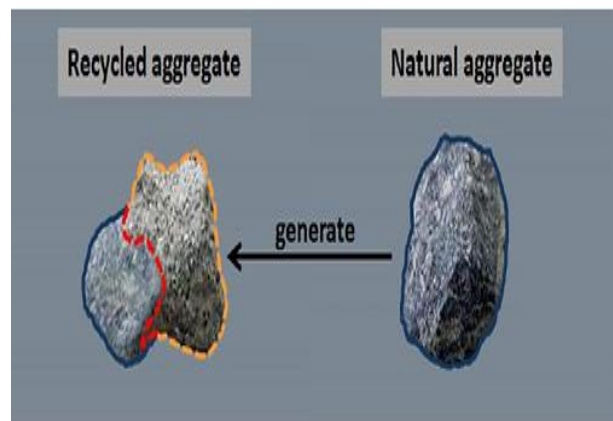


Figure 1.2. Comparaison morphologique d'un granulat naturel et un granulat recyclé (Bai et al, 2020)

2.3.2. Procédure de production des granulats de béton recyclé

L'élaboration des granulats issus des déchets de déconstruction suit généralement les mêmes étapes d'élaboration appliquées aux granulats extraits des ressources naturelles. Toutefois, ces matériaux proviennent de structures ayant déjà été utilisées. La présence d'éléments autres que le béton, tels que le bois, la brique, l'acier, etc., est inévitable. C'est pourquoi, une étape primaire et essentielle dans leur élaboration est le tri, qui est une étape absente dans la production des granulats naturels.

Après la phase de tri, les blocs de béton triés subissent une étape de concassage, suivie d'un criblage et de tamisage, permettant ainsi l'obtention des granulats sous différentes classes granulaires : sables, gravillons et graviers.

Ces trois étapes de production mentionnée, à savoir : le tri, le concassage et le criblage, sont reconnus comme les principales étapes d'élaboration, et sont largement décrite dans la littérature (Sereng, 2020., Kaddah, 2022., Goellner, 2017). À ce titre, le rapport publié par la DRIEE, l'IAU et l'Unicem (2017), propose un schéma explicatif du processus de production de ces granulats (Figure 1.3).

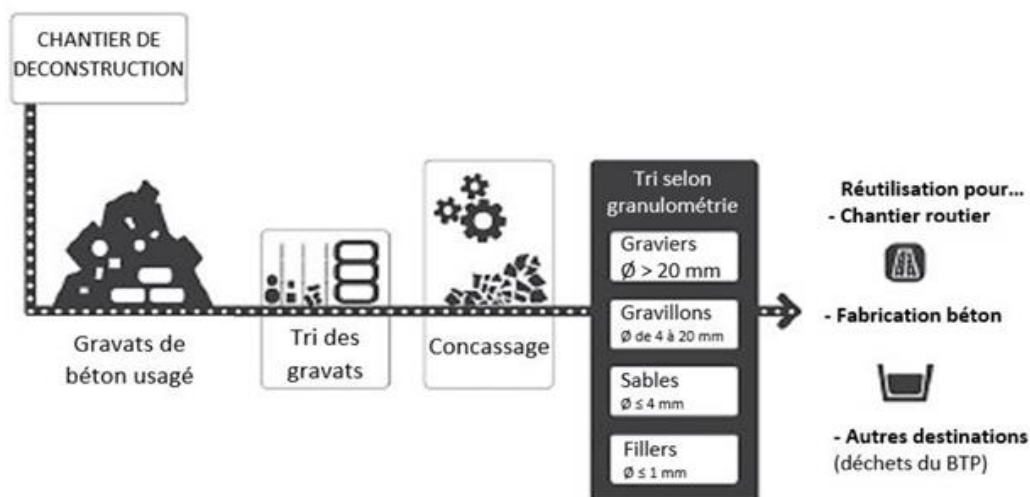


Figure 1.3. Principales étapes suivies dans la production des granulats recyclés (DRIEE, IAU îdF, et Unicem., 2017)

2.3.3. Composition chimique et minéralogique des granulats de béton recyclé

Sur le plan chimique, les granulats de béton recyclé présentent une composition issue de la combinaison entre les caractéristiques du granulat naturel et celles de la pâte de ciment hydratée (Remond et al., 2018). La présence de phases cimentaires résiduelles modifie la composition chimique des GBR par rapport à celle des GN, les principaux constituants des GBR sont la silice (SiO_2) la chaux (CaO), ainsi que l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3) en faibles quantités (Abriak, 2022).

En outre, les granulats de béton recyclé (GBR) se caractérisent par l'existence des phases hydratées telles que la portlandite $Ca(OH_2)$ et les silicate de calcium hydraté (C-S-H), résultant de l'hydratation initiale du ciment (Xio, 2022). De plus, des quantités non négligeables de sulfates provenant de la pâte cimentaire peuvent être trouvées (Remond et al, 2018). Cependant, l'étude de la composition chimique des GBR ne peut être réalisée sans intégrer l'influence de la taille des particules, en effet, il a été mentionné dans la thèse de Hernandez (Hernandez, 2022), que la composition chimique des GBR dépend de la dimension des particules, plutôt que par leur origine géologique.

2.3.4. Propriétés physiques des granulats de béton recyclé

2.3.4.1. Morphologie et granulométrie

En raison du procédé de fabrication, du concassage et de la présence de mortier adhérent, les granulats de béton recyclés présentent une morphologie différente de celle des granulats naturels. Ces derniers se caractérisent par une forme plus homogène et une surface lisse, tandis que les granulats de béton recyclés présentent une rugosité plus marquée. Cette rugosité améliore l'adhérence entre le GBR et la pâte de ciment, mais entraîne également une absorption d'eau plus élevée. Des constats similaires ont été rapportés par Pena Torres (Pena Torres, 2020). Selon Deodonne (Deodonne, 2015), le processus de concassage des gravats produit des granulats dont la répartition granulométrique varie principalement du type de concasseur utilisé. Par ailleurs, la qualité du béton parent joue un rôle déterminant : les bétons moins résistants engendrent une proportion plus importante de particules fines (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, 1992 ; Sri Ravindrarajah et Tam, 1987a ; Sri Ravindrarajah et Tam, 1987b).

2.3.4.2. Masse Volumique

Les granulats de béton recyclés (GBR) sont constitués de deux parties distinctes, le granulat parent et le mortier résiduel adhérent, qui est poreux. Leur masse volumique globale dépend donc de la quantité et des propriétés de ces deux phases. À l'inverse, les granulats naturels (GN) présentent une structure plus homogène. Cette différence explique pourquoi la masse volumique réelle des GBR est plus faible que celle des GN. En effet, la masse volumique des GBR se situe le plus souvent entre 2400 et 2500 Kg/m³, tandis que celle des GN atteint environ 2750 Kg/m³ (Abriak, 2023, Meftah, 2018). Cette variation s'explique par le type de béton d'origine, la proportion de mortier résiduel et les caractéristiques du granulat parent.

2.3.4.3. Absorption d'eau

Une caractéristique majeure des GBR réside dans la quantification de la quantité d'eau nécessaire à leur absorption. Avant d'incorporer les granulats recyclés (GBR) en substitution aux granulats naturels (GN) dans la formulation des bétons, il est essentiel d'évaluer leur capacité d'absorption d'eau. Cette étape est nécessaire pour éviter une perte de maniabilité et garantir une mise en place optimale des bétons frais.

En effet, cette caractéristique est directement associée à la quantité de mortier résiduel adhérent à la surface du granulat parent composé principalement d'une pâte de ciment poreuse et absorbante, qui influence significativement le pouvoir d'absorption d'eau des GBR. Les travaux de De Juan et al. (2008) et de Bai et al. (2020) confirment cette tendance, en montrant qu'il existe une corrélation de type linéaire entre l'absorption d'eau et la quantité de mortier adhérent (voir figure 1.4).

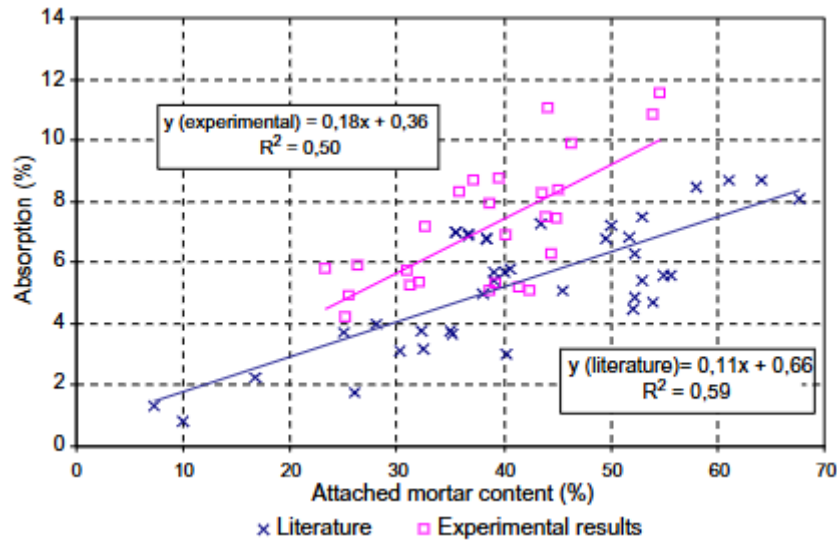


Figure 1.4. Relation entre l'absorption d'eau et la quantité de mortier collé (De Juan et al., 2008)

D'après l'étude de Xuan (Xuan, 2016), les granulats recyclés de dimension comprise entre 5 et 10 mm affichent une absorption d'eau proche de 7,2 %, ce qui contraste avec les faibles valeurs mesurées pour les granulats naturels, notamment ceux issus du granite, autour de 1,5 % (Kaddah, 2022).

D'autres études (Gómez, 2002., Katz, 2003., Rao, 2005., Tam et al, 2008., citées par Meftah, 2018) rapportent que l'absorption d'eau des granulats de béton recyclés varie entre 3 et 12%, alors que celle des granulats naturels se situe généralement entre 1 et 5 %, en fonction de leur type et de leur provenance. De plus, Gómez-Sóberon (2002) a montré que la diminution de la dimension des particules entraîne une augmentation du coefficient d'absorption des granulats recyclés, à teneur en mortier constante.

Il est établi par Mattar (Mattar et El Dalati, 2012) que l'absorption d'eau des GBR résulte de la présence d'une structure alvéolaire au sein de l'ancien mortier adhérant aux granulats naturels. Ces alvéoles, propriétés de la microstructure du vieux mortier, jouent un rôle déterminant en captant et en retenant l'eau. Cette porosité interne des GBR justifie leur capacité d'absorption d'eau beaucoup plus importante que celle des granulats naturels.

2.3.4.4. Cinétique d'absorption d'eau et temps de saturation

La cinétique d'absorption d'eau et le temps de saturation sont des propriétés essentielles des GBR, compte tenu de leur capacité d'absorption. Leur intégration dans les formulations de béton, à des niveaux de substitution des GN élevés, nécessite souvent un accroissement du rapport E/C ou l'utilisation d'adjuvants. Ainsi, connaître la vitesse d'absorption et le temps de saturation des GBR est crucial pour optimiser le dosage en eau des bétons recyclés.

Selon Liang et al, Quattrone et al, (Liang et al., 2021 ; Quattrone et al., 2016), la cinétique d'absorption des GBR suit deux phases distinctes : une absorption rapide initiale, suivie d'une phase plus lente. Dans la première phase, une pression capillaire élevée dans les petits pores et

une large surface de contact des GBR avec l'eau favorisent une absorption rapide. Dans la phase suivante, le taux d'absorption diminue en raison de deux facteurs principaux : la faible pression capillaire dans les grands pores, qui servent de voie d'échappement, et la présence des bulles d'air attachées aux surfaces des GBR, difficiles à éliminer rapidement (Liang et al., 2021). Le point de transition entre ces deux phases se situe généralement autour de 10 minutes. Evangelista et al (Evangelista et al., 2015) rapportent que les GBR absorbent durant les 10 premières minutes entre 50 et 80% de leur pouvoir total d'absorption à 24 heures. Pour compenser cette absorption, lors du malaxage, une partie de l'eau absorbée par les GBR doit être prise en considération dans le calcul total du dosage en eau (Ferreira et al., 2011 ; Sosa et al., 2021).

2.3.5. Propriétés mécaniques des granulats de béton recyclé

2.3.5.1. Résistance à l'usure (Micro Deval)

La résistance mécanique des granulats est un facteur clé pour la détermination des propriétés des matériaux de construction. À la différence des granulats d'origine naturelle, les granulats de béton recyclés possèdent un coefficient Micro-Deval (MDV) élevé. Selon Deodonne (Deodonne, 2015), un coefficient MDV élevé indique une moindre résistance des granulats.

2.3.5.2. Résistance à la fragmentation (Los Angeles)

Comme pour la tenue à l'usure, un indice Los Angeles (LA) élevé traduit une faible résistance mécanique du granulat. Le principe de l'essai repose sur la perte de masse. Dans le cas des granulats recyclés, elle est principalement due au détachement du mortier résiduel du granulat parent. Lorsque la teneur en mortier attaché est élevée, le détachement devient plus important, ce qui a été prouvé par De Juan et al (De Juan et al, 2008) (Figure 1.5). D'après le rapport de Meftah (Meftah, 2018), il a été observé une grande perte de masse lors de cet essai, ce qui s'explique par un coefficient LA plus élevé comparé à ceux obtenus généralement pour les granulats d'origine naturels (Chak et al, 2011., Lope et al, 2009., Padm et al, 2009., Tabs et al, 2009., Sago et al, 2001). Abriak (2022) a également confirmé que la résistance à l'abrasion est influencée à la fois par la qualité du béton initial et par les conditions de cure, c'est-à-dire son mode de conservation avant utilisation.

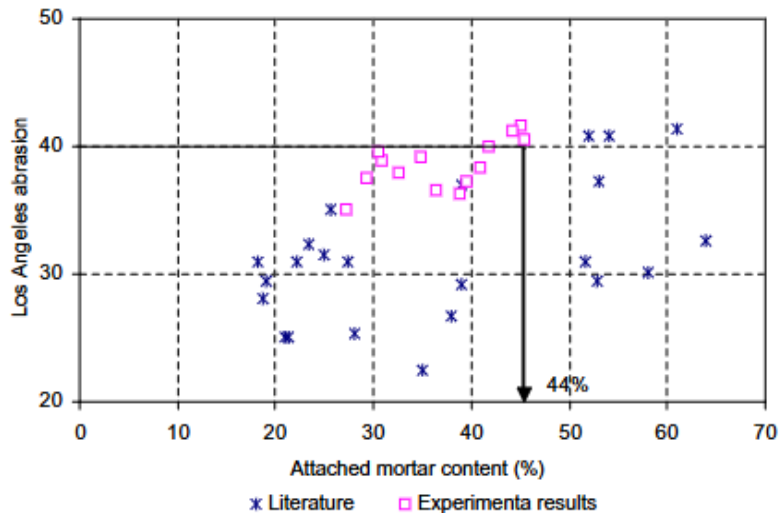


Figure 1.5. Relation entre le pourcentage de mortier attaché et le coefficient (LA) pour les granulats recyclés (De Juan et al, 2008)

2.3.6. Règlements, normes et domaine d'emploi des granulats de béton recyclés

À ce jour, aucune norme spécifique n'est dédiée aux granulats recyclés. En effet, les GBR sont soumis aux mêmes normes de caractérisation que celles appliquées aux granulats naturels (Deodonne, 2015). Toutefois, dans le cadre de leur utilisation, certaines exigences plus strictes sont imposées, notamment, en raison de leurs propriétés moins favorables que celles des granulats naturels.

Il a été rapporté dans la thèse de Kaddah (Kaddah, 2022) et d'après la norme NF EN 206+A2/CN (NF EN 206+A2/CN, 2022), que les granulats recyclés sont classés en trois types :

Type I : granulats issus uniquement de béton de démolition (béton armé ou non armé) ;

Type II : granulats issus de béton et de maçonnerie ;

Type III : granulats recyclés issus de mélange de bétons, de maçonnerie et d'autres matériaux de construction (pierres, asphaltes, etc)

L'objectif de cette classification est de caractériser la pureté des granulats recyclés, notamment en mettant en évidence leur hétérogénéité. En effet, plus les granulats comportent une plus grande variété de matériaux résiduels, tels que les granulats de type II et III, plus leurs propriétés sont moins favorables.

En raison de cette hétérogénéité, leur domaine d'utilisation, ainsi que leur niveau de remplacement des granulats naturels, est limité.

Conformément à la norme NF EN 206+A2/CN (NF EN 206+A2/CN, 2022), les granulats recyclés de type II et III, y compris les sables recyclés, ne peuvent pas être employés dans les bétons nécessitant des résistances supérieures à C25/30 (Kaddah, 2022).

Les taux de substitution des granulats naturels varient d'un pays à l'autre et sont généralement liés aux quantités de déchets issues du secteur de la construction. Shaban et al (Shaban et al, 2019) ont ainsi réalisé une comparaison internationale des réglementations, des taux d'incorporation des GR ainsi que leurs domaines d'utilisation (Tableau 1.1).

Tableau 1.1. Taux de remplacement des GN par les GBR et domaine d'utilisation selon les réglementations internationales (Shaban et al, 2019).

Pays/ norme	Classification	Taux maximal de substitution des granulats naturels (NA)		Applications	Résistance maximale
		Fins	Grossiers		
Allemagne, DIN 4226-100	GBR	0%	20-35 %	Béton structurel, béton précontraint non autorisé	C30/37 (20% de substitution)
	GMaR & GR	-	-	Béton non-structurel	C25/30 (35% de substitution)
Royaume-Uni, BS 8500-2	GBR	0%	20%	Béton structurel	C 40/50
	GR	0%	-	Béton non-structurel	
Hong Kong, WBTC No.12/2002	GBR	0%	100%	Béton structurel et applications moins exigeantes	20 MPa
			20%		35 MPa
Japon, BCSJ	GMR	100%	100%	Fondations et applications peu exigeantes	18 MPa
Japon, JIS A5021	GMR-Classe H	-	-	Sans limitation d'usage	45 MPa
Japon, JIS A5022	GMR-Classe M	-	-	Éléments non soumis au gel/dégel	-
Japon, JIS A5023	GMR-Classe L	-	-	Béton de remblai, béton de propreté, béton de nivellement	-
États-Unis, ACI 555R-01	GM	0%	50%	Béton non structurel	-
	GBR	50%	50%	Béton non structurel	-

GBR : Granulats de bétons recyclés, **GMaR** : Granulats de maçonnerie recyclés, **GMR** : Granulats mixtes recyclés, **GMR- Classe H** : granulats recyclés de haute qualité, **GMR- Classe M** : granulats recyclés de qualité moyenne, **GMR- Classe L** : granulats recyclés de faible qualité, **GM** : granulats mélangés.

En somme, les GBR, provenant des déchets de béton de démolition, représentent une solution avantageuse pour réduire l'exploitation des granulats naturels et limiter les impacts environnementaux liés à ce secteur. Cependant, leur structure hétérogène, marquée par la présence d'un ancien mortier adhérent, affecte leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques, limitant ainsi leurs performances dans les formulations de bétons.

3. TRAITEMENTS PROPOSES POUR L'AMELIORATION DE LA QUALITE DES GRANULATS DE BETON RECYCLES

Dans l'optique de renforcer les performances des granulats recyclés et de dépasser leurs contraintes d'emploi, plusieurs méthodes de traitement ont été proposées. Ces approches visent soit à améliorer les propriétés de l'ancien mortier, soit à le détacher complètement du granulats parent. Cette section de ce chapitre explore les principales méthodes proposées :

3.1. Traitement mécanique

Le principe du traitement mécanique repose sur la séparation du mortier résiduel du granulats parent d'origine naturelle. Ce processus peut être réalisé par chocs, selon la méthode Los Angeles, ou par abrasion, conformément au test micro-Deval (Braymand et al, 2017).

La méthode Los Angeles, permet de séparer efficacement le mortier avec une perte de masse allant jusqu'à 60% après tamisage, cependant, elle présente des inconvénients, notamment en termes de consommation énergétique, de durée et de bruit (Yoda, 2003., Braymand et al, 2017). La méthode MDE, bien qu'elle soit moins efficace que la méthode LA pour la séparation du mortier, nécessite également une durée de traitement plus longue pour obtenir des résultats similaires.

3.2. Traitement thermique

Le traitement thermique consiste à désagréger le mortier adhérent aux granulats recyclés. La méthode consiste à chauffer les granulats à haute température, puis à les plonger rapidement dans de l'eau froide. Ces cycles thermiques provoquent des pressions internes dans le mortier, entraînant la formation de fissures, ce qui facilite son détachement des granulats (De Juan, 2009, Amara, 2022). Pour des températures supérieures à 700 °C, seulement 2% du mortier résiduel reste collé au granulats naturel (Hernandez, 2022, Mulder et al., 2007). Cependant, au-delà de 500 °C, les caractéristiques des granulats de béton recyclés peuvent être altérées (Al Bayati, 2016). De plus, ce traitement est considéré comme polluant en raison des déchets générés lors de la combustion (Hernandez, 2022, Mulder et al, 2007).

3.3. Traitement thermique par micro-onde

La technique consiste à chauffer les granulats recyclés à l'aide d'ondes électromagnétiques, ce qui provoque des fissures dans le mortier résiduel et facilite ainsi son détachement du granulats. D'après Akbarnezhad (Akbarnezhad, 2010), cette méthode conduit à une diminution d'environ 33 % de l'absorption d'eau des granulats recyclés, tout en augmentant leur masse volumique apparente d'environ 3,8 %. Toutefois, la technique peut entraîner des fissures et un affaiblissement des propriétés du mortier encore adhérent à la surface des granulats. De plus, elle présente des inconvénients liés au temps nécessaire pour le traitement et à une consommation énergétique élevée (Hernandez, 2022).

3.4. Traitement par une solution d'acide

D'après Naga et al, Abba et al (Naga et al, 2000., Abba et al, 2009), le traitement consiste à utiliser une solution acide pour dissoudre la pâte cimentaire adhérente autour des GBR. La méthode améliore la qualité intrinsèque des granulats (Amara, 2022). En référence aux travaux d'Ismail et Ramli (Ismail et Ramli, 2013), l'absorption d'eau des granulats recyclés a diminué, avec une réduction comprise entre 7 et 12 %. De plus, l'incorporation de ces granulats traités dans les bétons augmente leur résistance à la compression de 25 et 29% comparativement aux bétons contenant des granulats non traités. Cependant, la technique présente certains inconvénients, notamment une durabilité parfois compromise des granulats recyclés, en raison d'une augmentation potentielle des concentrations en sulfates et en chlorures consécutive au traitement (Ismail et Ramli, 2013, Hernandez, 2022), ainsi que la production de résidus issus de la fabrication des solutions chimiques et la consommation importante d'eau pour le rinçage.

Les principaux traitements brièvement présentés précédemment peuvent être efficaces pour détacher le mortier résiduel ou améliorer les propriétés des granulats recyclés. Mais, ils présentent certains inconvénients qui les rendent moins envisageables, notamment :

- Leur coût élevé, ce qui les rend peu rentable
- Leur forte consommation énergétique
- Leur impact environnemental.

C'est pourquoi, le traitement des GBR par carbonatation a été proposé comme une alternative prometteuse. Ce procédé permet d'améliorer les caractéristiques de la matrice cimentaire attachée aux granulats, tout en contribuant à la limitation des rejets de CO_2 dans l'environnement.

3.5. Traitement par carbonatation

3.5.1. Définition du phénomène

Le béton en service est sujet à diverses pathologies, notamment à long terme, parmi celles-ci, la carbonatation à l'air libre. Cette altération devient particulièrement sévère dans les bétons poreux et armés.

La carbonatation est considérée comme un mécanisme physico-chimique qui résulte de la propagation du (CO_2) via le système poreux du béton, en présence d'hygrométrie relative, généralement située entre 50% et 70 %, et des conditions thermiques d'environ 20 °C. Le CO_2 pénètre dans le béton et interagit avec les produits formés lors de l'hydratation du ciment, en particulier la portlandite $Ca(OH)_2$, qui est le produit le plus soluble. Cette réaction mène à la formation d'un nouveau produit, le carbonate de calcium $CaCO_3$.

Gendron (Gendron, 2019) a résumé le mécanisme de la carbonatation en quatre étapes principales :

- Le CO_2 présent dans l'environnement pénètre dans le béton à travers ses pores ouverts, puis diffuse au sein de la matrice cimentaire ;
- Une quantité de CO_2 à l'état gazeux se solubilise dans l'eau contenue dans le réseau poreux du matériau ;
- Cette dissolution permet au CO_2 dissous de réagir avec les éléments hydratés du ciment, tels que le $Ca(OH_2)$;
- Enfin, le carbonate de calcium précipite dans les pores, modifiant les propriétés microstructurales du béton.

Comme connu, l'alcalinité de la solution interstitielle du béton est maintenue principalement par la présence de la portlandite. Cependant, lors de la carbonatation, la consommation de la portlandite et la formation de carbonate de calcium entraînent une diminution de l'alcalinité, ce qui se traduit par un abaissement de pH, passant de 13 à 9 et 8, voire inférieurs si toute la portlandite est consommée.

Cette perte d'alcalinité est particulièrement néfaste pour les bétons armés, car elle déstabilise la couche passive qui protège les armatures, les exposant ainsi à des risques de corrosion. En revanche, lorsqu'il s'agit de bétons non armés, le phénomène de carbonatation n'a pas d'effet négatif. Au contraire, la formation de carbonate de calcium présente des avantages, à savoir un accroissement de la masse volumique et un remplissage des pores, favorisant ainsi une meilleure compacité et, potentiellement, la durabilité du matériau.

3.5.2. Transformation physico-chimiques induite par la carbonatation

3.5.2.1. Comportement du CO_2 : Diffusion et solubilisation

Le CO_2 atmosphérique s'infiltré dans le béton par l'intermédiaire de son réseau poreux (Younsi, 2011). Ce phénomène se produit naturellement en raison d'un gradient de concentration, c'est-à-dire une différence de concentration entre l'extérieur du béton, où le CO_2 est abondant, et l'intérieur, où il est quasi inexistant. Le transport du CO_2 à l'intérieur du béton suit la première loi de Fick, selon laquelle plus la différence de concentration est importante, plus la diffusion est rapide (Kaddah, 2022). Dans un environnement naturel, le taux de CO_2 atmosphérique est généralement compris entre 300 (0,03%) et 400 ppm (0,04%) (Gendron, 2019), bien que cette valeur puisse être élevée dans les zones urbaines et industrielles.

Une fois à l'intérieur du béton, le CO_2 gazeux est initialement inerte. Cependant, en présence de l'eau disponible dans les pores du matériau, il se dissout conformément à la réaction suivante :



Cependant, l'acide carbonique (H_2CO_3) formé est un acide faible qui ne reste pas longtemps sous sa forme moléculaire. Il réagit rapidement avec les ions hydroxyde OH^- provenant de la décomposition de la portlandite [$Ca(OH_2)$].

La dissociation de l'hydroxyde de calcium $Ca(OH_2)$ s'exprime par la réaction (1.2) :



Les ions hydroxydes (OH^-) libérés par cette dissociation neutralisent immédiatement l'acide carbonique (H_2CO_3), ce qui entraîne la formation des ions bicarbonates (HCO_3^-) selon la réaction (1.3) :



Lorsque la concentration en ions bicarbonates (HCO_3^-) devient suffisante, une seconde dissociation peut avoir lieu, formant des ions carbonates (CO_3^{2-}) et en libérant de l'eau selon la réaction (1.4), et qui est considéré comme l'espèce carbonatée majoritaire (Kaddah, 2022)



Finalement, les ions carbonates (CO_3^{2-}) formés lors de la solubilisation de l'acide carbonique (H_2CO_3) vont être combinés avec les ions calcium (Ca^{2+}) libérés par la dissociation de la portlandite $Ca(OH_2)$ comme montré dans la réaction (1.2), afin de former ou de précipiter le carbonate de calcium selon la réaction (1.5)



Le déroulement du mécanisme de la carbonatation de la portlandite peut être bien expliqué et résumé par la figure (1.6), illustrée par Thiery (Thiery, 2007).

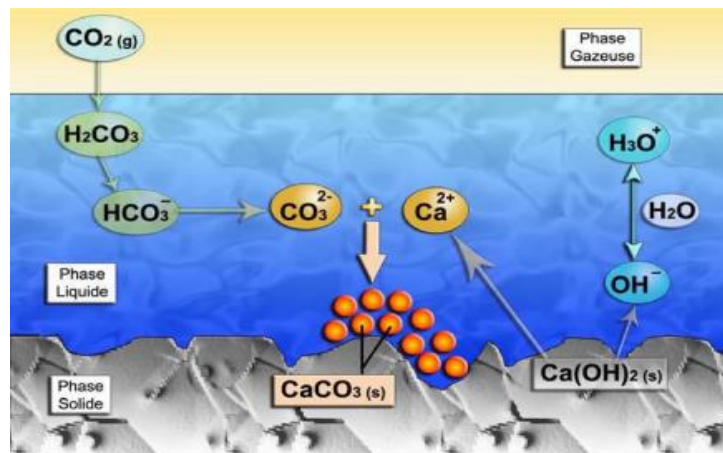
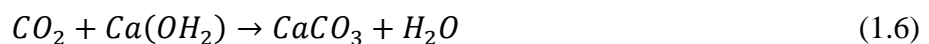
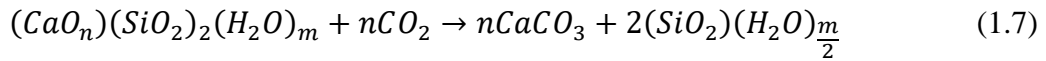


Figure 1.6. Processus de carbonatation de l'hydroxyde de calcium $Ca(OH_2)$ selon Thiery (Thiery, 2007)

D'après la schématisation de la figure (1.6), la réaction de carbonatation de la portlandite $Ca(OH_2)$ avec le CO_2 peut-être être simplifiée par la réaction (1.6), qui présente l'équation bilan du mécanisme.



Généralement, l'étude de la carbonatation des matériaux cimentaires s'est principalement focalisée sur la portlandite. Cependant, sa diminution progressive au cours du processus nécessite d'élargir l'analyse à d'autres hydrates de ciment, en particulier les C-S-H, qui exercent un rôle clé dans la microstructure des bétons (Bertin, 2017). Avec la baisse du pH du béton induite par la transformation chimique de la portlandite en carbonate de calcium, les C-S-H subissent une décalcification progressive, entraînant une réduction de leur teneur en calcium. Cette altération favorise la formation de carbonates directement sur la surface des C-S-H lorsque la diffusion des ions Ca^{2+} excède celle du CO_2 (Hernandez, 2022). À la différence de la carbonatation de la portlandite, celle des C-S-H aboutit à la génération de carbonate de calcium et d'un gel de silice, avec une éventuelle libération d'eau (Auroy, 2014). Ce processus est facilité par l'eau liée des silicates de calcium hydratés, qui agit comme un catalyseur (Ishiba et Maekawa, 2000., Marchand et al, 2001., cité par Gendron, 2019). La réaction bilan qui décrit cette transformation peut être exprimée comme suit :



Outre la portlandite et les C-S-H, d'autres composés peuvent être affectés par la carbonatation. À titre d'exemple, l'ettringite qui est un hydrate résultant de l'hydratation du C_3A et du gypse en présence d'eau, ainsi que les sulfoaluminates, issus de la réaction entre les aluminates et le sulfate de calcium, peuvent entrer en réaction avec le CO_2 afin de produire du carbonate de calcium et d'autres composés secondaires. Cependant, ces réactions restent bien moins significatives que celles impliquant la portlandite et les C-S-H. Leur impact est limité dans le phénomène global de carbonatation.

3.5.2.2. Le carbonate de calcium $CaCO_3$

Le carbonate de calcium ($CaCO_3$) est une phase minérale naturelle, présente au sein de la plupart des matériaux de construction. Il existe majoritairement sous forme de calcite, d'aragonite et de vaterite, ainsi que sous deux formes hydratées ($CaCO_3 \cdot 6H_2O$, appelée ikaite, et $CaCO_3 \cdot H_2O$), en plus d'une phase amorphe (Ševčík, 2017). Il provient du processus géologique et est couramment présent dans des roches telles que le calcaire, le marbre et la craie. Il connaît une utilisation importante dans plusieurs industries, notamment pour la fabrication de ciment et de béton.

Lors du processus de carbonatation, le carbonate de calcium précipite sous trois formes allotropiques distinctes : calcite, aragonite et vaterite, tout en conservant la même formule chimique ($CaCO_3$). Ces différentes phases cristallines se distinguent par leur structure cristallographique et leur morphologie (Kaddah, 2022).

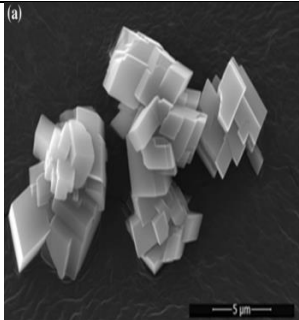
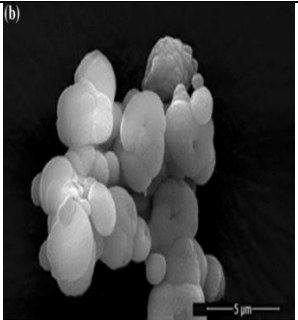
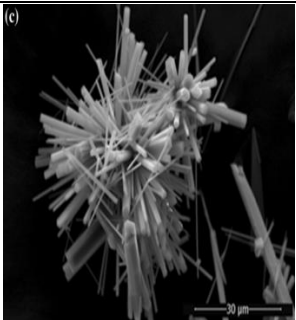
La formation des polymorphes dépend de plusieurs facteurs, notamment la température, le pH, la nature des réactifs, ainsi que la teneur en CO_2 et l'humidité (Tai et al, 1998., Anstice et al, 2005., Peric et al, 1996 cités par Auroy, 2014).

Comme cité par Gendron (Gendron, 2019), la calcite est le polymorphe du carbonate de calcium le plus stable et le plus couramment observé, tandis que l'aragonite et la vaterite sont des phases

plus rares qui ont tendance à se transformer en calcite au fil du temps. Selon le même auteur (Gendron, 2019), la calcite résulte de la carbonatation de la portlandite, tandis que l'aragonite et la vatérite proviennent de la carbonatation des C-S-H et des phases sulfatées.

Un récapitulatif des propriétés des trois polymorphes du carbonate de calcium est présenté au tableau (1.2).

Tableau 1.2. Principales propriétés des polymorphes (calcite, aragonite et vatérite) du carbonate de calcium

Caractéristiques	Calcite	Vatérite	Aragonite
Forme cristalline (Morandea, 2013., Kaddah, 2022)	Rhomboédrique	Hexagonale	Orthorhombique
Volume molaire $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ (Morandea, 2013)	35	38	34
Origine minérale (Morandea, 2013., Ševčík., 2017)	Carbonatation de la portlandite	Carbonatation des C-S-H avec faible C/S et des phases sulfatés	Carbonatation des C-S-H avec C/S élevée et des phases sulfatés
Influence de la température et l'humidité (Morandea, 2013)	Principalement présent à 20°C et avec une humidité relative élevée	Dominant à 50 °C et une humidité relative faible	Prédominant à 50 °C et une faible humidité relative
Image MEB (Ševčík., 2017)			

3.5.3. Paramètres influençant la carbonatation

3.5.3.1. Paramètres liés à l'environnement

3.5.3.1.1. La température

Le processus de carbonatation dépend fortement de la température, dont l'effet est largement discuté dans la littérature. L'élévation de la température favorise l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du matériau, ce qui empêche la dissolution du CO_2 (Van Balen et Van Gemert, 1994 cité par Gendron, 2019). Cependant, d'autres auteurs (Hancox, 1968, Rahman et Glasser, 1989, Wong et al, 2001 cités par Auroy, 2014) ont observé que la hausse de la température stimule thermiquement le déroulement de carbonatation en favorisant le séchage des pores. Ce phénomène facilite la propagation du CO_2 en phase gazeuse à travers le réseau poreux du matériau. En revanche, Chaussadent (Chaussadent, 1997) et Dheilly et al (Dheilly et al, 2002) ont souligné que le phénomène de carbonatation est plus efficace à des températures plus basses, mettant en évidence une divergence dans les conclusions des différentes études.

3.5.3.1.2. L'humidité

Le degré d'humidité relatif (HR) influence significativement la pénétration du CO_2 à travers le matériau, en agissant sur le taux de saturation du parement, ce qui conditionne la capacité de transfert du gaz. Elle est également à l'origine des transferts d'eau liés aux processus de dessiccation et d'humidification du matériau (Thiery, 2005). La carbonatation atteint sa vitesse maximale à des niveaux d'humidité relative (HR) qui sont suffisamment élevés pour permettre la dissolution du CO_2 , mais pas trop élevés pour entraver sa diffusion. Lorsque l'HR est faible, le faible apport en eau réduit l'absorption du CO_2 , ce qui réduit la formation d'ions CO_3^{2-} nécessaires à la réaction de carbonatation. À l'inverse, lorsque l'HR est accrue, la pénétration du CO_2 est considérablement ralentie, car celle-ci est environ 1.10^4 fois plus rapide dans un milieu gazeux que dans un milieu liquide (Drouet, 2010).

3.5.3.1.3. La concentration du CO_2

Le niveau de carbonatation est directement influencé par la quantité de CO_2 atmosphérique, qui constitue le réactif essentiel de cette réaction. D'après Yoon et al (Yoon et al., 2007), la profondeur de carbonatation augmente avec la teneur en CO_2 et varie en proportion de la racine carrée du CO_2 et du temps ($\sqrt{CO_2 \cdot temps}$). Thiery (Thiery, 2005) confirme que les profondeurs de carbonatation s'avèrent plus importantes au sein des milieux à forte teneur en CO_2 .

Toutefois, d'autres études, notamment celle de Ji et al. (2010), ont montré que la teneur en portlandite et en calcite reste similaire, que la carbonatation soit réalisée en conditions accélérées (jusqu'à 40 % de CO_2) ou en conditions atmosphériques.

Les mêmes conclusions ont été validées par Hyvert et al (Hyvert, 2010), qui ont observé qu'avec des teneurs en CO_2 allant de 0,03 et 50%, le $Ca(OH)_2$ se transforme entièrement dans la partie carbonatée. Selon Drouet (Drouet, 2010), les trois polymorphes (calcite, aragonite et

vatérite) sont identifiés, que le processus de carbonatation soit atmosphérique ou accéléré, et ce, quelle que soit la pression partielle de CO_2 . Toutefois, la distribution polymorphique du $CaCO_3$ varie en fonction du pourcentage de CO_2 .

3.5.3.2. Paramètres liés aux propriétés du matériau

Outre les paramètres environnementaux qui influencent le processus de carbonatation, d'autres facteurs liés aux propriétés intrinsèques du matériau jouent un rôle tout aussi crucial et méritent d'être étudiés.

En effet, la composition de béton est un élément clé dans la carbonatation. Comme le souligne Gendron (Gendron, 2019), un béton riche en ciment contient une quantité importante de produits carbonatables par unité de volume, ce qui influence directement la profondeur de carbonatation. Cependant, cette profondeur diminue à mesure que le dosage en liant augmente. Gendron (Gendron, 2019) précise également que la tenue du béton à la carbonatation dépend fortement de sa porosité : plus le ratio eau/liant diminue, plus la porosité diminue, ce qui réduit l'évolution de la carbonatation.

La porosité du béton constitue un facteur déterminant dans le processus de carbonatation. Un béton présentant une porosité élevée facilite l'infiltration du CO_2 à travers son réseau de pores, augmentant ainsi la surface d'échange entre le CO_2 dissous et les composés susceptibles de se carbonater (Gendron, 2019). Cependant, la facilité de pénétration du CO_2 ne dépend pas uniquement de la porosité globale, mais également de la taille et de la distribution des pores. Dans les micropores, la diffusion du CO_2 est ralentie par des interactions avec les parois, tandis que dans les pores plus larges, le gaz circule plus librement malgré la complexité du réseau poreux (Gendron, 2019).

3.5.4. Techniques de caractérisation de la carbonatation

Différentes techniques expérimentales sont mises en œuvre pour analyser la carbonatation (Gendron, 2019) :

- Parmi les approches faciles et fiables, pour identifier l'évolution de la carbonatation, figure la pulvérisation de la phénolphtaléine, un réactif coloré de pH. L'indicateur change de couleur autour d'un pH de 9 (± 1 unité de pH), permettant ainsi de distinguer les zones carbonatées des zones encore alcalines (Drouet, 2010). Quand le béton est sain (non-carbonaté), son pH est généralement supérieur à 12, ce qui entraîne une coloration rose de la zone saine. Avec l'avancement de la carbonatation et la consommation de l'hydroxyde de calcium, le pH subit une réduction, et sous un pH de 9 environ, l'indicateur devient incolore, signalant ainsi la perte d'alcalinité et la progression de la carbonatation.

Bien que cette méthode soit simple et rapide à mettre en œuvre, elle présente certaines limites. Sa précision est parfois mise en question, car le niveau d'équilibre du pH, correspondant au seuil critique de corrosion des armatures, peut se situer au-delà de la

zone de virage de la phénophtaléine (Drouet, 2010). Cela signifie que l'altération des armatures peut débuter dès une acidité du béton compris entre 10 et 11, avant même que l'indicateur ne devienne totalement incolore (Hamada, 1968 ; Parrot et Killoh, 1989).

- L'essai de l'analyse thermogravimétrique (ATG) est une méthode permettant d'évaluer la déshydroxylation de la portlandite ainsi que la décomposition des carbonates de calcium sous l'effet de la chaleur. Principalement utilisée pour établir des profils précis, elle présente néanmoins certaines limites, notamment en raison des difficultés d'interprétation liées aux pertes de H_2O et de CO_2 enregistrées au cours de l'analyse. (Fumiaki et al, 2000., Ramachandran et al, 2002., Thiery, 2005., kocaba, 2009 cités par Gendron, 2019).
- Le MEB (microscope électronique à balayage) est un outil d'analyse permettant d'étudier l'apparition des carbonates de calcium et de contrôler la transformation de la portlandite et les C-S-H (Morandeau, 2013). Il offre des observations détaillées de la microstructure des matériaux cimentaires, mettant en évidence les transformations induites par la carbonatation.

3.5.5. Carbonatation des granulats de béton recyclé

Les agrégats de béton de déconstruction (GBR) sont constitués du vieux mortier collé aux granulats parents d'origine naturelle.

En exposant les GBR à des ambiances atmosphériques où la concentration en CO_2 dépend de la zone d'exposition (généralement comprise entre 0,03% et 0,04% (Gendron, 2019)), mais pouvant être plus élevée dans les zones industrielles telles que les cimenteries, les garages de véhicule, les zones industrielles, etc., ou en accélérant le processus par un traitement à la carbonatation accélérée, on observe des effets spécifiques sur ces matériaux.

Les deux traitements se révèlent efficaces pour améliorer les propriétés des GBR, mais c'est le facteur temps qui les distingue. Toutefois, le but reste le même.

En effet, exposer les GBR à la carbonatation favorise l'amélioration de leurs caractéristiques physiques et mécaniques, facilitant ainsi l'intégration de ces matériaux dans les formulations des bétons en remplacement des granulats naturels, et ce, à des taux de remplacement élevés voire totaux (cas de cette thèse).

Outre les paramètres environnementaux (concentration en CO_2 , température et hygrométrie) et les paramètres liés au matériau exposé qui influencent la carbonatation, la taille des particules des granulats de béton recyclé exerce une influence cruciale sur le potentiel d'action du traitement. En effet, les GBR de petite taille sont généralement plus poreux, absorbants et légers que ceux de tailles plus grandes. Cette distinction résulte de la présence d'ancien mortier au sein des petites particules, qui constitue la partie réactive dans la réaction de carbonatation.

La portlandite et les C-S-H sont plus abondants dans les petites particules que dans les plus grosses. De plus, la porosité accrue de ces petites particules favorise la diffusion du CO_2 à

l'intérieur des granulats, ce qui optimise le processus de carbonatation. De même, Sereng et al (Sereng et al, 2019) révèlent que les granulats ayant une petite taille (1-4 mm) présentent un effet plus marqué de la carbonatation naturelle par rapport aux granulats plus gros (10- 20 mm), à cause d'une surface spécifique plus élevée qui facilite l'interaction avec le CO_2 . Les mêmes constatations ont été approuvées par (Xiao et al, 2022., Kikuchi et Kurada, 2011).

Peu de recherches se sont concentrées directement sur la carbonatation naturelle comme méthode de traitement des GBR, la majorité des travaux étant axée sur la carbonatation accélérée en vue de gagner plus du temps. Cependant, Xuan et al (Xuan et al, 2016), ont mentionné que le stockage dans des conditions sèches pendant des durées prolongées favorise leur carbonatation naturelle et améliore leurs performances sans recourir à un traitement supplémentaire.

Pendant la réaction de la carbonatation, le $CaCO_3$ précipite au sein de la porosité de la phase cimentaire du granulat recyclé, en augmentant leur densité et leur résistance, et en réduisant par conséquent leur absorption d'eau (Xuan et al, 2017).

Zhan et al (Zhan et al, 2020), ont étudié l'effet de la carbonatation en termes de transformation chimique induite à l'intérieur des granulats de béton recyclés à travers des observations microscopiques (Figure 1.7).

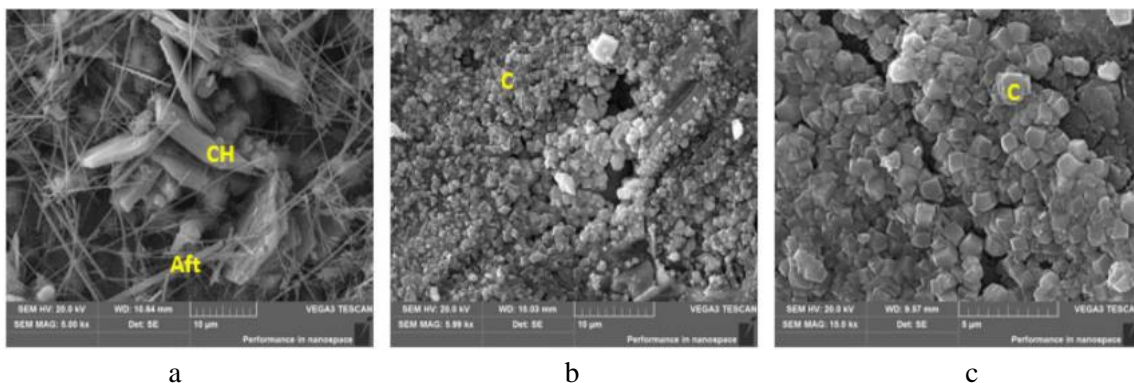


Figure 1.7. Transformation chimique induite lors de la carbonatation des granulats recyclés (Zhan et al, 2020)

Avant le traitement (Figure 1.7.a), la structure de l'ancienne matrice cimentaire des granulats recyclés est poreuse avec la présence des produits d'hydratation (portlandite, C-S-H et ettringite). Après carbonatation, la transformation des hydrates en carbonate de calcium est visible (Figure 1.7.b), avec un remplissage partiel et une densification de la structure. La figure 1.7.c, présente une transformation plus avancée de la carbonatation, la portlandite a été entièrement convertie en carbonate de calcium, réduisant davantage la porosité et améliorant ainsi la compacité.

L'étude menée par Xiao et al (Xiao et al, 2022), a montré des améliorations notables des caractéristiques des GBR après un traitement de carbonatation appliquées aux granulats recyclés grossiers et fins. Ce traitement s'est déroulé dans une salle de carbonatation ayant une teneur de 20 ± 2 % de CO_2 , sous des conditions d'humidité de 75 ± 5 % pendant 14 jours.

Le traitement a permis de réduire la capacité d'absorption d'eau des granulats en raison de la formation de ($CaCO_3$), qui comble les pores du mortier adhérent. Par ailleurs, la densité apparente des granulats a été augmentée, reflétant une structure plus compacte. La carbonatation améliore aussi la compacité de la structure. Dans la voie même, Liu et al (Liu et al, 2019), rapportent que la carbonatation des GBR améliore leurs propriétés en augmentant leur densité apparente et en réduisant leur absorption d'eau. D'après l'auteur (Liu et al, 2019), cette amélioration est attribuée à la précipitation de carbonate de calcium ($CaCO_3$) et de gel de silice, qui colmatent les pores de la pâte de ciment résiduelle, conduisant ainsi à une microstructure plus dense et plus résistante.

En plus des effets bénéfiques sur la porosité et la densité des GBR, la carbonatation améliore aussi la liaison au niveau des granulats et de la pâte de ciment, renforçant ainsi la zone de transition interfaciale (ITZ). De plus, les résultats de Xiao et al (Xiao et al, 2022) montrent que la carbonatation densifie l'ITZ en renforçant l'adhérence dans l'interaction entre le vieux mortier et la nouvelle matrice cimentaire. Cependant, les auteurs soulignent que cet effet bénéfique est principalement observé au niveau de la nouvelle ITZ, tandis que l'ancienne ITZ et les fissures internes des granulats recyclés restent peu affectées par le traitement.

Dans cette même perspective, Sereng et al (Sereng et al, 2019) ont montré l'impact de la carbonatation à l'air libre et accélérée, sur les spécificités des GBR, en mettant l'accent sur leur capacité de stockage du CO_2 et leur absorption d'eau. Leur travail a révélé que la carbonatation accélérée permet de réduire l'absorption d'eau jusqu'à 67%, suite à la formation du carbonate de calcium. Toutefois, il a été constaté que les granulats de démolition après avoir été exposés à une carbonatation naturelle sont moins réactifs à une carbonatation accélérée, leur capacité de stockage de CO_2 étant réduite. Cette diminution peut être attribuée à la réduction de la porosité induite par la carbonatation naturelle, qui colmate une partie des vides et limite la pénétration du CO_2 au sein du matériau. En conséquence, les GBR déjà partiellement carbonatés montrent une réactivité moindre par rapport aux granulats recyclés fabriqués en laboratoire et qui possèdent une plus grande disponibilité en hydrates réactifs et une porosité.

Outre les bénéfices sur les granulats de béton recyclés, la technique de carbonatation constitue une approche prometteuse pour atténuer les rejets de CO_2 dans l'environnement en piégeant durablement ce gaz au sein des GBR. À cet égard, Saadé et al. (2021) ont examiné l'effet du traitement sur des fractions granulaires de dimensions 0-4 mm et 4-16 mm, réalisées dans un tambour rotatif exposé à un flux de gaz industriel contenant 15% de CO_2 , à une température de 50 °C. Ce traitement a permis de capturer jusqu'à 31 kg de CO_2 par tonne de GBR pour la partie fine et 5 kg/t pour la fraction grossière, tout en réduisant la porosité et en augmentant la densité des granulats, améliorant ainsi leur compacité.

4. LES BETONS AUTOPLACANTS

4.1. Introduction aux BAP

Le béton autoplaçant correspond à une innovation créée pour surmonter les difficultés liées au coulage du béton dans des structures fortement ferrillées, une demande fortement soulignée au Japon. Pour faire face à la complexité des opérations de mise en œuvre, nécessitant des technologies de vibration complexes et une main-d'œuvre hautement qualifiée, Okamura et Ouchi (Okamura 1999) ont créé les BAP. Ces bétons se distinguent par leur grande fluidité et leur capacité de déformabilité, ce qui leur permet de s'écouler et de se compacter sous le seul effet de la pesanteur, sans nécessiter de moyens de vibration mécaniques.

En ce qui concerne les bétons conventionnels, la vibration est obligatoire pour évacuer les bulles d'air présentes dans les formulations, car l'existence de l'air peut, après durcissement, constituer une porte d'entrée pour les attaques extérieures. De plus, la vibration permet de remplir les coffrages et d'assurer un bon parement du béton durci. Cependant, cette technique présente l'inconvénient d'être énergivore, en rapport avec la demande énergétique nécessaire liée à l'utilisation d'équipements de vibration.

Les BAP répondent efficacement au problème de vibration rencontré avec les bétons conventionnels. En effet, leur grande fluidité leur permet de s'écouler et de se compacter sous leur poids propre, éliminant ainsi le besoin de vibration mécanique. Cela simplifie les opérations de coulage, réduit les dépenses relatives aux installations et aux effectifs, et améliore le cadre de travail sur les chantiers. Par ailleurs, cette caractéristique garantit une meilleure homogénéité du béton, une finition de surface de qualité, tout en conservant des caractéristiques mécaniques et de pérennité identiques aux bétons conventionnels.

4.2. Particularité de la composition des BAP

L'AFGC (AFGC, 2008) préconise pour les BAP une teneur en pâte élevée, comprise entre 330 et 400 l/m³. Ce volume permet d'assurer une bonne déformabilité ainsi qu'un remplissage correct des coffrages. Il contribue également à séparer les gravillons, limitant ainsi leurs contacts et en facilitant leur dispersion. De plus, la formulation des BAP renferme une quantité notable de fines, d'environ 500 kg/m³ (AFGC, 2008). Cette quantité contribue à réduire la ségrégation et le ressuage et assure une maniabilité satisfaisante adaptée au caractère fluide des BAP.

L'emploi des superplastifiants constitue une condition primordiale à l'obtention de la fluidité. Cependant, leur dosage doit être soigneusement contrôlé et ne pas dépasser le seuil de saturation. Le fonctionnement des superplastifiants est relativement complexe ; il peut s'expliquer de la façon suivante : au contact d'une substance polaire telle que l'eau, les grains cimentaires, dont la surface est caractérisée par des charges électriques opposées (positives et négatives), ont tendance à s'agglomérer, formant des amas appelés floccs. Cette floculation emprisonne une part de l'eau entre les particules cimentaires, la rendant indisponible pour améliorer la maniabilité du mélange de béton. Les SP s'adsorbent sur la couche externe du

ciment, neutralisent les charges opposées et induisent des forces répulsives entre les particules. Cette dispersion libère l'eau piégée, améliorant ainsi la lubrification du mélange et augmentant sa maniabilité.

Finalement, afin d'éviter les risques de blocage dans les BAP, notamment dans les zones fortement ferraiées, il est recommandé par l'AFGC (AFGC, 2008) de limiter la taille des granulats ($D_{max} < 20$ mm) et de contrôler leur volume. De plus, pour garantir une fluidité optimale, le rapport G/S (Gravier/Sable) doit être proche de 1. En effet, l'accroissement de la proportion de gros granulats est souvent associé à une plus grande probabilité de blocage (Khayat, 1998). Par ailleurs, il est important de noter que la nature des granulats (naturels ou recyclés), leur forme et leur distribution granulométrique sont des facteurs essentiels à prendre en compte.

4.3. Approches de formulation des BAP

Utilisée de manière courante pour le calcul des formulations des bétons conventionnels, la méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée aux BAP, car elle ne prend pas en compte l'emploi des adjuvants et des additions, pourtant essentiels à ces bétons (Bens, 2008 cité par Amara, 2022). Depuis la naissance des BAP, diverses méthodes de formulation ont été développées, poursuivant des objectifs globalement similaires.

Les différentes approches proposées dans la littérature reposent sur des constats clés : d'une part, les gros granulats sont les plus sensibles au phénomène de blocage en milieu confiné en raison de l'effet parois. Il est donc nécessaire d'en limiter la quantité tout en conservant un volume minimal pour réduire les besoins en pâte nécessaires à ouvrabilité identique. D'autre part, la maniabilité dépend de la fluidité de la phase pâteuse, ajustable par le ratio E/L ou la quantité du SP. L'augmentation du dosage en eau diminue la résistance mécanique et accroît le risque de ségrégation, tandis qu'un surdosage en superplastifiant peut provoquer du ressuage (Amara, 2022) et un retard de prise et de durcissement.

Les différentes méthodes de formulation des BAP figurent au tableau 1.3.

Tableau 1.3. Approches de formulation des BAP

Approche de formulation	Description	Développé par
Approche Japonaise	Approche volumique axée sur l'optimisation du mortier. Elle limite les gravillons à 50% de leur compacité afin de limiter les risques de blocage. Le volume du sable correspond à 40% du volume de mortier, ce qui permet d'assurer une bonne fluidité. Le dosage du liant n'est pas précisé de manière stricte, mais il peut être ajusté en fonction des performances recherchées. L'eau et le superplastifiant (SP) sont ajustés expérimentalement, en	Okamura et Ozawa (Okamura et Ozawa, 1995)

	se basant sur l'essai d'étalement au mini-cône et d'écoulement à l'entonnoir.	
Méthode Française (LCPC)	<p>La méthode repose sur un modèle mathématique représentant une suspension de particules solides, tenant compte de l'organisation des grains. Elle permet de prédire la compacité du mélange en fonction des répartitions granulométriques, des quantités de constituants, de la compacité propre et de la masse volumique apparente. La procédure consiste à :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fixer la proportion de liant et déterminer le dosage optimal en SP - Evaluer le besoin en eau en présence du SP - Réaliser des calculs à l'aide d'un logiciel prenant en compte l'effet de paroi. <p>La viscosité est fixée à 5.10^4 Pa.S, avec un ajustement de l'eau et du SP pour atteindre la résistance, la fluidité et le seuil de cisaillement souhaités.</p>	De Larrard (De larrard, 1999)
Approche suédoise	Repose sur l'optimisation du squelette granulaire en intégrant les risques de blocage dans le processus de formulation. Elle vise à déterminer un volume de pâte critique en dessous duquel le risque de blocage des granulats est nul, en fonction du rapport G/S. Une fois ce volume identifié, le rapport G/S est ajusté pour répondre aux propriétés rhéologiques souhaitées. Les dosages en fine, en eau et en SP sont optimisés afin d'assurer une viscosité adéquate et la résistance ciblée.	Tangtermsirikul et Van (Tangtermsirikul et Van, 1995) Bui et Montgomery (Bui et Montgomery, 1999)
Méthode chinoise	Vise à optimiser le remplissage granulaire par l'intermédiaire d'un facteur de compacité. Ce facteur calculé expérimentalement, permet de déterminer le volume de la partie liante nécessaire afin de combler la porosité intergranulaire et répondre aux critères de résistance et de durabilité. Le dosage en SP est ajusté expérimentalement pour garantir l'ouvrabilité du mélange.	Su et al (Su et al 2001, 2003)
Méthode Mixte	Les méthodes mixtes combinent différentes approches pour formuler les BAP. Brouwers et Radix ont harmonisés les méthodes japonaise et chinoise en évaluant le facteur de compacité solide (granulats, sables, ciment, fines). Ils ont montré que la répartition optimale des particules suit une courbe théorique quand	Brouwers et Radix (Brouwers et Radix, 2005)

la compacité est maximale. L'apport en eau est ensuite optimisé conformément à la méthode japonaise via des essais d'étalement au mini-cône. Pour sa part, El-Hilali a utilisé une approche mixte en combinant la méthode de l'empilement compressible pour la proportion optimale, la méthode chinoise pour les granulats et la méthode japonaise pour le dosage en eau, en validant le tout par des essais supplémentaires de fluidité avec un cône de Marsh et une aiguille de Vicat (Amara, 2022).

El-Hilali (El-Hilali, 2010)

4.4. Caractérisation des BAP à l'état frais

La fluidité, de même que la déformabilité, ne sont pas les seules spécificités à vérifier dans les BAP ; la vitesse d'écoulement, l'évaluation des risques de blocage et la mesure de la résistance à la ségrégation sont également des paramètres essentiels pour valider la formulation et l'utilisation des BAP.

Plusieurs essais normalisés ont été établis pour caractériser ces bétons à l'état frais. Les principaux tests de caractérisation sont résumés dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4. Essais d'évaluation des propriétés des BAP à l'état frais

Paramètre évalué	Essai (norme associé)	Objectif de l'essai et plage de validité
Fluidité	Test d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8)	L'essai donne une indication sur la mobilité des BAP et la bonne homogénéité du mélange en milieu non confiné. De plus, l'observation des bords de la galette fournit des indications sur les risques de ressuage. Trois classes d'étalement sont définies : $550\text{mm} \leq \text{SF1} \leq 650\text{mm}$ $660\text{mm} \leq \text{SF2} \leq 750\text{mm}$ $760\text{mm} \leq \text{SF3} \leq 850\text{mm}$
Vitesse d'écoulement	Temps d'étalement (T500mm) (NF EN 12350-8)	Mesurer la viscosité et la fluidité du BAP en mesurant son temps d'écoulement pour atteindre le diamètre 500 mm. Deux classes de viscosité sont définies : $\text{VS1} < 2 \text{ secondes}$ $\text{VS2} \geq 2 \text{ secondes}$
Risque de blocage	Essai de la boîte en L (NF EN 12350-10)	La mesure de la fluidité à travers les armatures est évaluée en calculant le rapport H_2/H_1 (hauteur horizontale/ hauteur verticale)

Deux classes de taux de remplissage sont définies :		
PL1 ≥ 0,8 (2 barres)		
PL2 ≥ 0,8 (3 barres)		
Déterminer la résistance du béton à la ségrégation		
Résistance à la ségrégation	Stabilité au tamis (NF EN 12350-11)	statique Deux classes de stabilité au tamis :
		SR1 ≤ 20%
		SR2 ≤ 15%

Dans le cadre général, les essais définis dans le tableau 1.4 sont suffisants pour caractériser la fluidité des BAP (Amara, 2022). Cependant, d'autres essais peuvent être menés pour une analyse plus approfondie, tels que :

- Test de fluidité réalisé à l'anneau (J-ring) (NF EN 12350-12)
- Test d'écoulement à l'entonnoir (V funnel) (NF EN 12350-9)
- Test de la boîte LCPC (LCPC BOX) (Roussel, 2007)
- Essai à la boîte en U (U-BOX) (Hayakawa, 1993)
- Essai de la colonne (Otsuki et al, 1996)

Dans cette étude, seule la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, le T500, le taux de remplissage dans la boîte en L et la mesure de la ségrégation statique ont été réalisées.

4.5. Les additions dans les BAP

4.5.1. Types et nature des additions minérales

On appelle addition minérale pour béton une poudre de finesse inférieure à 100 µm. Elles sont principalement classées en ajouts inertes ou réactifs.

Ces produits sont utilisés dans le domaine du BTP pour diverses applications. Elles sont notamment intégrées dans la fabrication des ciments comme constituants principaux ou secondaires, pour produire plusieurs types de ciments, mais aussi dans le but de limiter l'usage de matières premières ainsi que pour réduire l'empreinte carbone liée à la production du clinker. De plus, elles peuvent être incorporées dans les bétons, comme addition, influençant leurs propriétés, que ce soit à l'état frais ou durci.

Afin de faciliter la mise en place et le coulage des BAP sans vibration, il est essentiel d'obtenir une meilleure fluidité, tout en garantissant la stabilité statique et dynamique et en éliminant les risques de ressuage. C'est pourquoi la composition des BAP requiert une proportion suffisante de pâte, qui joue un rôle déterminant pour satisfaire ces exigences.

Pour atteindre ce volume, il est essentiel d'utiliser des ajouts minéraux, dont l'utilisation dans les mélanges des BAP est plus avantageuse que l'augmentation de ce volume uniquement par le ciment, tant sur le plan technique, environnemental et économique.

Diverses additions peuvent être utilisées dans la formulation des BAP, parmi lesquelles, le filler de calcaire, la fumée de silice, le laitier granulé, le métakaolin, la poudre de verre, etc. Le choix d'une addition dépend principalement des propriétés recherchées, qu'il s'agisse d'améliorer la fluidité et la stabilité du mélange, d'optimiser la résistance mécanique ou encore d'accroître la durabilité du béton face aux agressions environnementales. Il est également influencé par leur disponibilité, qui varie selon les ressources locales et les filières industrielles, ainsi que par leur impact environnemental.

4.5.2. Rôle des additions minérales dans la performance des matériaux cimentaires

Selon leur nature, les ajouts minéraux peuvent être classés en addition inertes ou réactives. La différence entre ces deux catégories repose principalement sur leur effet sur les propriétés des matériaux auxquels ils sont ajoutés. Il est donc essentiel d'analyser les effets de ces additions sur les matériaux cimentaires afin de mieux comprendre leur rôle dans les bétons.

4.5.2.1. Effet de remplissage

Du fait que plus fines que le ciment, toutes les additions peuvent remplir les espaces libres entre les particules de ciment. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet filler ou de remplissage. Cette action favorise une meilleure ouvrabilité du mélange en améliorant sa fluidité et son homogénéité (Ali Boucetta, 2014).

De plus, en remplissant ces vides, la compacité de la structure augmente, entraînant essentiellement une amélioration du comportement mécanique et une durabilité accrue à long terme. En résumé, lorsque l'addition est plus fine que le ciment, elle contribue à l'optimisation de la matrice cimentaire, qu'elle soit inerte ou réactive.

4.5.2.2. Effet physique ou de surface (germination ou nucléation hétérogène)

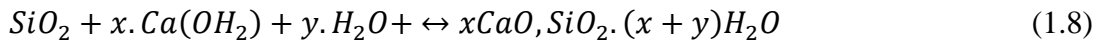
Indépendamment du type d'addition, inerte ou réactive, une augmentation des résistances mécaniques à jeune âge est généralement observée dans tous les matériaux cimentaires contenant ces ajouts.

Ce phénomène s'explique par la germination hétérogène, où les hydrates développés lors de la prise du ciment précipitent non seulement autour des grains cimentaires, mais aussi sur la surface des particules d'additions (Behim, 2005). Ces particules agissent comme des sites de nucléation préférentiels, favorisant la formation et la dispersion des hydrates dans la matrice cimentaire. Cette disposition réduit l'épaisseur de la couche d'hydrates entourant les particules du ciment, ce qui facilite la diffusion de l'eau vers leur cœur et accélère ainsi leur hydratation. Lorsque aucune addition n'est utilisée, les grains de ciment sont entourés d'une couche d'hydrates plus dense, limitant l'accès de l'eau et diminuant la vitesse d'hydratation.

4.5.2.3. Effet chimique (pouzzolanique ou hydraulique)

La majorité des additions à caractère réactif développent leur activité chimique à travers une réaction pouzzolanique. Celle-ci apparaît à partir de la silice amorphe contenue dans l'addition

et la portlandite (issus de l'hydratation du ciment), en contact avec l'eau. Elle peut être présentée par la réaction chimique suivante (1.8) :



Les hydrates (C-S-H) secondaires ainsi formés présentent un rapport C/S proche de 1, ce qui signifie qu'ils sont riches en silice (De Larrard, 2002, cité par Ali boucetta, 2014).

Certains ajouts, le laitier granulé de haut fourneau, à titre d'exemple, possèdent une activité hydraulique. Contrairement aux matériaux purement pouzzolaniques, ces ajouts peuvent réagir directement avec l'eau, mais leur réaction se déroule lentement et requiert une activation alcaline pour être pleinement efficace. Ce rôle est généralement assuré par la portlandite.

Contrairement aux produits d'hydratation issus de la réaction pouzzolanique (CSH notamment), les hydrates issus de la réaction hydraulique possèdent un rapport C/S plus élevé (Bessa, 2004 cité par Ali Boucetta, 2014), ce qui signifie qu'ils contiennent une plus grande proportion de calcium.

4.5.3. Additions sélectionnées dans cette étude et leur contribution aux BAP

Dans cette étude, l'attention est portée sur trois additions spécifiques : le filler de calcaire (FC), le laitier granulé de haut fourneau (LG) et la poudre de verre à bouteilles (PV). Ce choix repose sur leur impact à la fois sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci des BAP, ainsi que sur leur contribution à la durabilité et à la valorisation des matériaux alternatifs.

4.5.3.1. Filler de calcaire

Dans les formulations des bétons, le filler calcaire est une addition largement adoptée, en particulier dans les BAP. Issu du broyage du calcaire, il est principalement composé de carbonate de calcium ($CaCO_3$) et est classé parmi les additions de type I, considérées comme quasi-inertes selon la norme NF P18-508 (NF P18-508). Sa composition chimique peut varier en fonction de l'origine géologique du calcaire utilisé, avec une teneur en calcite généralement supérieure à 62% (Diederich, 2010).

a). Influence de filler calcaire sur les propriétés à l'état frais des BAP

Le filler calcaire est largement utilisé dans les formulations des BAP, et son impact sur l'écoulement du mélange a fait l'objet de nombreuses études. Son principal rôle réside dans son effet de remplissage, qui permet de combler la porosité du béton et de favoriser la répartition des particules cimentaires. Ce mécanisme empêche la formation des flocculats, qui retiennent l'eau. Ainsi, l'incorporation du filler calcaire favorise une meilleure fluidité du mélange sans nécessiter un accroissement de la teneur en eau. Cependant, le pouvoir de cet effet est lié fortement à la finesse du filler calcaire. Un filler très fin peut entraîner une élévation de la capacité d'absorption d'eau, ce qui peut nuire aux propriétés à l'état frais. De plus, un dosage excessif en filler calcaire peut accroître la demande en eau, réduisant ainsi l'écoulement du BAP et augmentant sa viscosité.

Selon l'étude d'Ali-Boucetta (Ali-Boucetta, 2014), à faibles dosages, l'incorporation de filler calcaire favorise l'amélioration de la maniabilité et du comportement des BAP à l'état frais. Toutefois, lorsque la quantité devient trop élevée, une augmentation de la viscosité du mélange est observée, ce qui limite l'écoulement du béton et peut affecter sa mise en place.

Ces résultats ont été confirmés par El-Hilali et al (El-Hilali et al, 2010), qui soulignent que l'utilisation du filler calcaire dans les BAP améliore la fluidité et la stabilité du mélange, tout en réduisant les risques de ségrégation et de ressuage.

Le travail d'Ali-Boucetta (Ali-Boucetta, 2014) et d'El-Hilali et al (El-Hilali et al, 2010), montrent que l'influence de la finesse et la teneur en filler calcaire sur l'ouvrabilité, le besoin en superplastifiant et la stabilité du mélange. Ils rapportent qu'un filler modérément fin contribue à une meilleure fluidité et réduit la demande en eau, tandis qu'un filler très fin peut augmenter la viscosité, limitant ainsi l'écoulement des BAP.

b). Influence du filler calcaire sur la résistance mécanique et la durabilité des BAP

Le développement des résistances à la compression des BAP contenant du FC a été montré par Zhu et Gibbs (Zhu et Gibbs, 2005), qui soulignent que cette addition favorise une meilleure compacité et une réduction de la porosité, en particulier aux jeunes âges. Cet effet est attribué à la finesse du filler, qui permet un remplissage des vides et une hydratation optimale du ciment. Diederich (Diederich, 2010), explique deux mécanismes principaux de cette amélioration :

- L'amélioration de la densité du béton, en particulier, au niveau de l'interface pâte-granulat (Boziljkov, 2003).
- La création des zones de germination favorisant la précipitation des produits d'hydratation, un phénomène lié à l'effet physique fourni par l'addition (Ye et al, 2007 cité par Diederich, 2010).

Cependant, selon Michel et al (Michel et al, 2007), la progression des résistances mécaniques dues au filler calcaire reste significative uniquement pour des taux d'incorporation ne dépassant pas 10%.

Toutefois, bien que l'ajout de filler améliore la résistance mécanique, son influence sur la durabilité des BAP est peu nuancée. Siad et al (Siad et al, 2011), ont montré que la perméabilité élevée des BAP contenant du filler calcaire favorise la pénétration des ions chlorures et la diffusion des gaz agressifs, augmentant la sensibilité des armatures à la corrosion en milieu agressif. Par ailleurs, Ali-boucetta (Ali-boucetta, 2014) a révélé que l'ajout de filler calcaire dans le BAP accélère leur carbonatation, avec des signes visibles dès la première semaine d'exposition au CO_2 , et une carbonatation quasi totale après une année.

4.5.3.2. Laitier granulé de haut fourneau

L'élaboration de la fonte dans le haut fourneau implique l'ajout au minerai de fer et au coke d'un fondant destiné à abaisser le point de fusion dans la gangue et de permettre l'extraction du minerai à des températures comprises entre 1400 °C et 1500 °C (Behim, 2005). Par différence

de densité, les produits non transformés en métal constituent le laitier, qui flotte à la surface de la fonte à la sortie du haut fourneau. Dès sa sortie, pour obtenir un produit réactif, un traitement rapide du laitier, connu sous le nom de trempe, est réalisé avec de l'eau. Ce traitement vise à piéger les espèces minérales, ce qui confère au matériau son pouvoir hydraulique. Le laitier ainsi obtenu est défini par la norme NF EN 15167-1 (NF EN 15167-1, 2006).

Chimiquement, et selon la littérature (Behim, 2005), le laitier peut avoir une composition chimique variable, qui dépend principalement du degré de pureté du minerai, de la nature et de la teneur des fondants et des combustibles, ainsi que du procédé employé. Cependant, sa composition varie généralement entre 30 et 50% de chaux, 28 à 38% de silice, 2 à 24% d'alumine et 1 à 2,5 % de soufre. Cette composition est proche de celle du clinker, ce qui explique la similarité des mécanismes d'hydratation (Bellara, 2022) et la réactivité potentielle du laitier en tant que constituant cimentaire. Le diagramme ternaire de Keil (Figure 1.8) illustre cette proximité de composition entre les deux produits, mettant en évidence l'influence des proportions de CaO, SiO₂ et Al₂O₃.

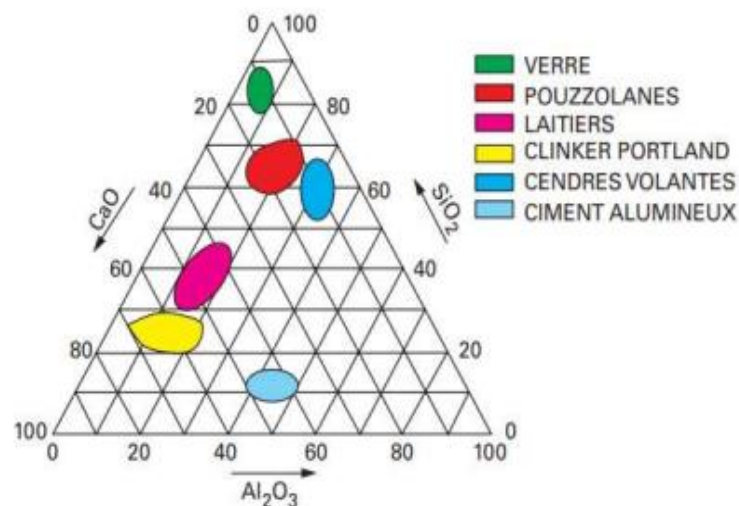


Figure 1.8. Diagramme de Keil : relation entre la composition de laitier et du clinker (Bellara, 2022)

a). Influence du laitier granulé sur les propriétés à l'état frais des BAP

L'introduction du laitier granulé dans les BAP a fait l'objet de nombreuses études. Les travaux de Belghit (Belghit, 2009) et Ali-Boucetta (Ali-Boucetta, 2014) convergent sur plusieurs points, notamment :

- Réduction de l'ouvrabilité des BAP avec l'augmentation du dosage en laitier granulé ;
- Accroissement des besoins en superplastifiant ;
- Amélioration de la stabilité et de la fluidité à faible dosage, mais cela devient pénalisant à des taux élevés.

b). Influence du laitier granulé sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP

D'après Djelloul et al. (Djelloul et al, 2018), l'incorporation du LG en substitution partielle du ciment permet de renforcer progressivement à long terme les performances mécaniques et la durabilité des BAP. À court terme, une diminution des résistances mécaniques est observée, notamment à 7 et 28 jours, en raison de la réactivité plus lente du laitier. Cependant, à partir de 56 et 90 jours, la formation progressive de produits d'hydratation supplémentaires compense cette perte initiale, conduisant à une augmentation significative de la résistance en compression.

Ali-Boucetta et al. (Ali-Boucetta et al, 2021) ont rapporté que l'incorporation du laitier granulé réduit la porosité capillaire et améliore la résistance aux agents agressifs des BAP. En particulier, une diminution de la perméabilité à l'oxygène et de l'absorption capillaire a été observée, traduisant une meilleure compacité du béton. Ainsi, les auteurs (Ali-Boucetta et al, 2021) rapportent que l'utilisation du laitier granulé n'accroît pas la carbonatation du BAP, ce qui contribue à préserver son intégrité structurelle à long terme.

4.5.3.3. Poudre de verre à bouteilles

Considéré comme un déchet ménager dont la consommation ne cesse d'augmenter, le verre représente un matériau à fort potentiel de valorisation, parmi lesquels figure le secteur de la construction. Comme l'a rapporté Idir (Idir, 2009), son incorporation dans une matrice cimentaire engendre deux effets contradictoires. Le premier est lié au mécanisme de l'alcali-réaction, un phénomène délétère pour le béton qui provoque un gonflement excessif et des fissurations. À l'inverse, le second effet repose sur la réactivité pouzzolanique du verre s'il est finement broyé, ce qui peut être bénéfique à la durabilité et aux performances mécaniques du béton. Cette réactivité dépend notamment de la couleur du verre recyclé. En effet, le verre blanc est le plus réactif, suivi du verre vert, tandis que le verre brun ou marron possède la réactivité la plus faible (Idir, 2009).

La couleur du verre est principalement déterminée par sa composition chimique. Le composant de base du verre est la silice (SiO_2), qui constitue entre 68% et 74% de sa composition. À cela s'ajoutent d'autres oxydes tels que (K_2O , Na_2O , CaO et MgO), jouant le rôle de fondants et de stabilisants. Enfin, les oxydes métalliques sont introduits pour teinter le verre : le Cr_2O_3 donne une teinte verte, le Fe_2O_3 confère une couleur brune, le CuO produit le verre bleu, et l' AgO génère une teinte jaune. Ces ajouts ne se limitent pas à une simple coloration ; ils contribuent également à abaisser la température de fusion du verre et à prolonger son temps de travail. Après fusion, réalisée entre 1400 °C et 1500 °C, il se forme une masse homogène, amorphe, visqueuse et transparente, qui servira à la formation du verre final (Ali-Boucetta, 2014).

a). Influence de la poudre de verre sur les propriétés à l'état frais des BAP

Selon Chekireb (Chekireb, 2015), le remplacement partiel du ciment par la poudre de verre améliore l'ouvrabilité, abaisse le besoin en superplastifiant et diminue le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique, favorisant ainsi un bon écoulement sans altérer la stabilité. Cheribet (Cheribet, 2023) a confirmé ces observations en montrant qu'une substitution allant jusqu'à 30 % entraîne une augmentation de l'étalement du BAP, atteignant 690 mm contre 650 mm pour le béton de référence. Cette amélioration est attribuée à la faible absorption d'eau et

à la surface lisse des particules de verre, réduisant les frottements internes du mélange. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'Ali-Boucetta (Ali-Boucetta, 2014), qui a prouvé que l'utilisation de la PV contribue à une bonne dispersion des particules et améliore la rhéologie du béton. Cependant, un dosage trop élevé peut nécessiter un ajustement du rapport E/C ou un dosage en superplastifiant pour maintenir des performances optimales à l'état frais.

b). Influence de la poudre de verre sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP

L'incorporation de la poudre de verre dans les BAP influe significativement sur leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Selon Chekireb (Chekireb, 2015), la poudre de verre améliore la résistance mécanique des BAP à long terme grâce à son pouvoir pouzzolanique. Elle favorise la formation des hydrates de formation secondaire (C-S-H), améliorant ainsi la compacité du béton. Toutefois, aux jeunes âges, une négligeable amélioration de la résistance est observée.

Les travaux d'Ali-Boucetta (Ali-Boucetta, 2021), confirment que la poudre de verre réduit la porosité accessible à l'eau, ce qui diminue l'absorption capillaire et diminue la perméabilité du béton. En outre, l'utilisation de la poudre de verre restreint la diffusion des ions chlorures, limitant ainsi les risques de corrosion des armatures. Cependant, contrairement au laitier, la poudre de verre n'améliore pas la résistance à la carbonatation, ce qui peut être un inconvénient dans un béton armé.

Selon Adesina et Awoyera (Adesina et Awoyera, 2019), les BAP contenant de la poudre de verre présentent une meilleure durabilité par rapport aux formulations classiques, essentiellement grâce à l'atténuation de la perméabilité à l'eau et aux gaz.

5. LES BAP A BASE DE GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ

Le développement du béton autoplaçant s'appuie sur ses nombreux bénéfices, notamment sa mise en œuvre sans vibration, son homogénéité et stabilité. Toutefois, sa formulation nécessite une quantité importante de pâte et de granulats naturels, entraînant un impact environnemental significatif sur le plan de l'épuisement des ressources non renouvelables, de la consommation énergétique et de l'émission de CO_2 .

Face à cette problématique, l'incorporation de granulats issus du béton de démolition apparaît comme une alternative prometteuse pour réduire cette consommation de ressources naturelles et favoriser une approche circulaire du secteur de la construction.

Comme rapporté dans la section (2.3), les GBR possèdent néanmoins des caractéristiques intrinsèques inférieures à celles des granulats naturels, ce qui influence négativement la fluidité des BAP à l'état frais et leurs performances à l'état durci. Cependant, soumettre ces granulats à un traitement de carbonatation permet d'améliorer certaines de leurs propriétés comme montré dans la section (3.5.5) de ce chapitre afin de réduire les effets négatifs souvent observés lors de leur incorporation dans le béton.

Cette dernière section de ce chapitre a pour objectif d'étudier l'impact des granulats recyclés frais (non carbonatés) et carbonatés sur le comportement des bétons, en particulier les BAP. L'analyse porte, d'une part, sur l'état frais, en examinant leur influence sur la fluidité et l'homogénéité du mélange, et d'autre part, sur l'état durci, en évaluant leurs effets sur les performances mécaniques et la durabilité du béton.

5.1. Effet des granulats recyclés carbonatés ou non sur le comportement des bétons (BAP en particulier) à l'état frais

La substitution des granulats d'origine naturelle par les granulats issus de la démolition de béton, qu'ils soient utilisés à l'état brut ou traités par la carbonatation, modifie significativement les propriétés d'écoulement des BAP.

Plusieurs études antérieures ont étudié l'impact du remplacement des GN par les GBR et plusieurs conclusions ont été apportées :

En référence au travail mené par Kapoor et al. (Kapoor et al., 2020), l'introduction des granulats recyclés affecte l'ouvrabilité des BAP du fait de leur forte capacité d'absorption d'eau et de leur surface rugueuse par rapport aux granulats naturels. La raison pour laquelle les auteurs ont d'abord optimisé les dosages en superplastifiant et d'agent modificateur de viscosité, puis les ont augmentés en fonction du pourcentage croissants de remplacement des granulats naturels, fins et grossiers, par les granulats de béton recyclés. Les résultats indiquent que l'accroissement du taux de substitution des GN par les GBR influence l'ouvrabilité et la mise en œuvre des BAP ; néanmoins, un ajout maîtrisé de SP a permis de compenser cette diminution.

Grdic et al (Grdic et al, 2010), ont montré que l'emploi des gros granulats recyclés en substitution des granulats naturels modifie la fluidité des BAP, mais permet quand même de garantir des propriétés autoplaçantes satisfaisantes, sous réserve d'un réglage du dosage en eau pour compenser la capacité d'absorption des granulats, dus principalement à la présence de vieux mortier collé au granulat et aussi à leur porosité accrue. Les auteurs ont augmenté la quantité d'eau initiale, qui était de 170 l/m³ pour le BAP témoin, à 178 l/m³ pour un remplacement partiel de 50% et à 186 l/m³ pour un remplacement total.

Kebaili et al (Kebaili et al, 2015) ont évalué l'effet du remplacement partiel et intégral des granulats naturels grossiers par des granulats de béton recyclés. Ils ont conclu d'après leurs résultats que l'utilisation des GBR à l'état sec affecte le caractère autoplaçant et la rhéologie des BAP, même si la quantité d'eau nécessaire à leur absorption a été prise en compte et ajoutée à la quantité d'eau de gâchage initiale. Les auteurs constatent que les granulats à l'état sec continuent d'aspirer l'eau de la pâte, ce qui modifie l'équilibre hydrique du mélange. C'est pourquoi, ils proposent comme alternative d'éviter l'utilisation de ces granulats à l'état sec et recommandent d'adopter un remplacement volumique plutôt que massique, afin de garantir l'excès de pâte nécessaire au maintien du caractère autoplaçant.

De même Safiuddin et al (Safiuddin et al, 2011), ont examiné l'influence des granulats recyclés sur les spécificités des BAP avec différents taux de remplacement, variant de 0%, 30%, 50%,

70% et 100%, tout en maintenant le dosage en superplastifiant et en eau constants. Les résultats obtenus confirment la faisabilité d'un remplacement jusqu'à 50% des GN par les GBR tout en conservant les paramètres d'ouvrabilité satisfaisants. Cependant, lorsque le taux de substitution dépasse les 50 %, les propriétés propres des GBR influencent le caractère autoplaçant des BAP. La forte absorption d'eau, la porosité accrue et la rugosité, sont d'après les auteurs (Safiuddin et al, 2011), les principales causes de la perte de fluidité. Ce qui a été également expliqué par Kebaili et al. (Kebaili et al, 2015). Selon les deux études, une réduction du volume de pâte entraîne une augmentation des frictions et frottements entre les particules solides (granulats), ce qui accroît la viscosité du béton et entraîne par conséquent une baisse d'écoulement en milieu non confiné (étalement), une augmentation du temps d'écoulement (T500) et des risques de blocage en milieu confiné.

Djelloul et al. (Djelloul et al., 2018), ont montré que l'intégration des GBR dans les compositions des BAP reste possible, tant que le taux d'incorporation ne dépasse pas 50%.

Cependant, les auteurs rapportent que l'accroissement du remplacement au-delà de ce taux affecte la fluidité et augmente les risques de blocage. Ils ont parallèlement rapporté que l'introduction du laitier granulé à hauteur de 15% et 30% en remplacement du ciment contribue à améliorer l'ouvrabilité, le remplissage et la stabilité des BAP contenant les GBR. L'étude rapporte également que l'emploi simultané de granulats de béton recyclés et de laitier granulé influence la densité du béton frais, celle-ci diminuant à mesure que les proportions de substitution augmentent, suite à la différence de densité entre ces deux matériaux et les granulats naturels ainsi que le ciment.

Les propriétés intrinsèques des granulats recyclés, notamment la porosité et la forte absorption d'eau, affectent les propriétés rhéologiques des bétons. Comme la technique de la carbonatation des GBR est un sujet d'actualité, les investigations portant sur l'effet des GBR-C sur les bétons frais demeurent limitées, notamment pour les BAP. C'est la raison pour laquelle cette partie propose une revue bibliographique des résultats obtenus sur les bétons conventionnels, mettant en évidence que l'effet de ce procédé reste généralement similaire, indépendamment du type de béton.

Dans le travail de Tam et al. (Tam et al, 2016), trois types de graviers ont été utilisés pour la formulation de béton conventionnel. Graviers naturels (GN), graviers recyclés frais (GBR-F) et recyclés carbonatés (GRC), soumis à différentes durées (0 min, 30 min, 90 min) et différentes pressions (0 KPa, 75 KPa et 150 KPa) de carbonatation. Les graviers de béton recyclés, qu'ils soient traités ou non, ont été introduits en substitution des granulats naturels aux proportions de 30% et 100%. Il a été constaté que l'emploi de GBR non traités réduit l'affaissement du béton, avec une diminution particulièrement marquée lorsque la substitution est intégrale.

Cependant, les bétons contenant 30% de GBR carbonatés ont présenté un affaissement similaire à celui du béton à base de GN. Cependant, à 100% de remplacement, un affaissement élevé a été obtenu. Les auteurs ont expliqué ce résultat par l'effet déterminant du taux d'incorporation des GBR-C. En réalité, lorsque la substitution est totale, l'allongement de la durée et l'augmentation de la pression de carbonatation exercent un effet plus prononcé, principalement

en raison de la forte réduction de l'absorption d'eau et de la porosité des GBR. En revanche, lorsque la teneur en GBR-C est limitée à 30%, l'influence de ces paramètres demeure faible.

5.2. Effet des granulats recyclés carbonatés ou non sur le comportement des bétons (BAP en particulier) à l'état durci

5.2.1. Sur les propriétés mécaniques

Il est bien connu que la résistance mécanique et la durabilité des bétons sont très influencées par la résistance des phases qui les constituent. Xuan et al. (Xuan et al., 2017), indiquent que la durabilité des bétons est fortement conditionnée par la perméabilité de la pâte cimentaire hydratée, des granulats et de la zone de transition (ITZ), mais aussi par la manière dont ces constituants sont disposés dans la matrice. C'est pourquoi, l'utilisation des granulats recyclés qu'ils soient frais ou carbonatés conditionne fortement les performances du béton à l'état durci et doit être bien analysée avant de les utiliser à grande échelle. De nombreux travaux se sont penchés sur l'évaluation des performances mécaniques et de la durabilité des bétons classiques contenant des GBR-C. Cependant, l'utilisation de ces granulats dans les BAP reste toujours à évaluer.

Sasanipour et al. (Sasanipour et al., 2020), ont montré que la substitution des granulats naturels, qu'ils soient fins ou grossiers, influence la résistance à la compression des BAP dès que le taux de remplacement dépasse les 25%. Cet impact est d'autant plus important pour l'utilisation de la fraction fine plutôt que de la fraction grosse à cause de la quantité élevée de mortier résiduel dans cette fraction, qui conduit à l'obtention d'une structure plus poreuse. En effet, la réduction de résistance enregistrée était de l'ordre de 52% à 28 jours lorsque la fraction fine a été utilisée.

Sasanipour et al. (Sasanipour et al., 2020) rapportent aussi que la granulométrie des granulats ainsi que le taux de substitution des GN par les GBR exercent une influence notable sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Ils précisent que lorsque les GN sont totalement remplacés par des GBR grossiers, cette vitesse diminue, tout en demeurant dans une plage jugée acceptable. Cependant, pour la fraction fine, la diminution est plus importante, ce qui justifie l'effet marqué de l'ancienne matrice présente en grande quantité dans le granulats recyclés. Dans le même sens de conclusion, selon Hung Mo et al. (2021), la résistance à la compression des BAP incorporant des granulats recyclés de 5 à 10 mm est conditionnée par plusieurs facteurs. Ils observent notamment que cette résistance se réduit à mesure que le taux de substitution des granulats naturels par des GBR augmente, une baisse attribuée d'après les auteurs (Hung Mo et al., 2021) à la mauvaise qualité de l'ancienne matrice cimentaire collée au GBR et aussi, au procédé de concassage appliqué lors de la production des granulats recyclés, lequel engendre la formation de microfissures dans l'ancien mortier, fragilisant ainsi la qualité du granulats recyclés lui-même.

D'autre part, il a été observé dans leur étude qu'à jeune âge (1 à 7 jours), les BAP contenant des GBR, présentent des résistances en compression pratiquement similaires aux BAP contenant seulement des granulats naturels. Les auteurs ont expliqué cet effet par la présence des grains de ciment anhydre dans l'ancienne matrice cimentaire qui pourrait accélérer

l'hydratation du ciment par rapport aux BAP avec GN. Néanmoins, aux âges plus avancés, l'écart des résistances enregistré devient plus marqué, qui est probablement due, d'après les auteurs à l'insuffisance de la quantité d'eau afin d'assurer la continuité des réactions d'hydratation.

En conclusion sur l'étude de Hung Mo et al. (Hung Mo et al, 2021), le taux optimal de remplacement des GN par les GBR ne doit pas dépasser les 50%.

Cependant, selon Nili et al. et Fakitsas et al. (Nili et al., 2019 ; Fakitsas et al., 2012), l'utilisation de GBR saturés d'eau pendant trois jours, suivie d'un séchage en surface pendant 12 heures, entraîne une résistance à la compression des BAP supérieure à celle obtenue avec des GN à 28 et 90 jours.

Après l'évaluation de certaines études antérieures, on peut conclure que l'utilisation des granulats recyclés à l'état frais (non traités) doit être toujours limitée à un faible taux, afin de garantir des performances mécaniques adéquates.

Dans l'étude de Xuan et al (Xuan et al, 2016), plusieurs paramètres ont été étudiés. D'une part, les auteurs ont évalué l'impact de l'utilisation des GBR sur la résistance en compression du béton, et ils ont trouvé qu'elle est très influencée par l'augmentation du taux d'incorporation de ces derniers. En effet, un remplacement de 30% n'altère pas significativement la résistance, tandis qu'un remplacement total la réduit d'environ 26% par rapport au béton témoin. D'autre part, leur travail a porté sur l'évaluation de l'effet de la carbonatation des GBR sur les performances mécaniques des bétons. Ils ont mis en évidence qu'après un traitement sous une pression de 5 bar, il est possible de substituer les granulats naturels par des granulats de béton recyclés jusqu'à un taux de 60 %, sans impact notable sur la résistance à la compression. Tandis qu'à 100 % d'incorporation, le traitement a permis d'augmenter la résistance des bétons d'environ 22,6 % par rapport au béton confectionné avec 100 % GBR non carbonatés (figure 1.9).

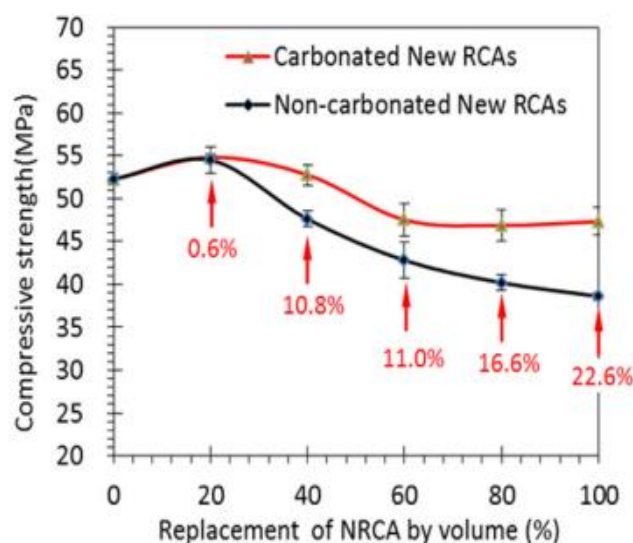


Figure 1.9. Evolution de la résistance mécanique des bétons contenant des GR frais et carbonatés (Xuan et al, 2016)

Les mêmes constatations ont été tirées par Xiao et al (Xiao et al, 2022). Les auteurs ont rapporté que l'utilisation des granulats recyclés carbonatés permet d'augmenter la résistance à la compression d'environ 20,9 % par rapport à celle des bétons réalisés uniquement avec des granulats recyclés non traités. Les auteurs ont expliqué cette amélioration par l'effet bénéfique de la carbonatation qui a entraîné une densification de la microstructure des GBR, remplissant ainsi leur porosité et leur fissure par le carbonate de calcium formé, ce qui a entraîné une amélioration de l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire, augmentant ainsi la résistance mécanique des bétons qui les contiennent. Cependant, il convient de souligner que les bétons fabriqués avec des granulats naturels présentent systématiquement une résistance plus élevée que ceux intégrant des granulats recyclés carbonatés.

Dans l'étude de Cheng et al (Cheng et al, 2024), l'impact de la pression de carbonatation des granulats recyclés ainsi que leur taux d'incorporation dans les formulations des BAP à l'état durci a été étudié. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de leur étude :

D'un point de vue mécanique, les auteurs ont trouvé que l'utilisation des granulats recyclés améliore la résistance en compression des bétons au jeune âge. Cependant, cet effet diminue avec le temps et avec l'augmentation du taux d'incorporation des GBR. Tandis que l'absorption élevée d'eau par ces granulats contribue à la génération de cristaux de portlandite de grande taille, conséquence de la présence d'une quantité importante d'eau à l'interface entre les GBR et le ciment.

De plus, les auteurs (Cheng et al., 2024), ont rapporté que la variation de la pression de carbonatation joue un rôle déterminant pour l'optimisation des caractéristiques des GBR et, de ce fait, pour l'augmentation de la résistance en compression. Ainsi, sous une pression de 75 KPa, les BAP incorporant des GBR carbonatés présentent de meilleures performances. En revanche, une hausse supplémentaire de la pression de carbonatation combinée à un taux élevé d'incorporation de GBR peut avoir un effet négatif sur la résistance à la compression BAP.

5.2.2. Sur la durabilité

Sasanipour et al. (2020) ont montré que l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels (GN) par des granulats de béton recyclés (GBR) entraîne une hausse de l'absorption d'eau et du volume des vides perméables. Cet effet est d'autant plus marqué lorsque les GBR utilisés sont fins plutôt que grossiers.

Par ailleurs, l'incorporation de gros GBR réduit la résistance à la pénétration des ions chlorure. Cette diminution reste limitée pour un taux de substitution de 25 %, mais elle devient plus prononcée lorsque la proportion de GBR augmente. L'utilisation de GBR fins accentue encore davantage cette baisse de performance ; leur effet négatif sur la résistance à la diffusion des ions chlorure s'intensifie avec le taux de remplacement. Selon les auteurs (Sasanipour et al. 2020) ces observations s'expliquent principalement par la forte porosité et la présence de mortier résiduel adhérent aux GBR, qui altèrent la compacité et la durabilité du béton.

De leur côté, Djelloul et al. (2018) ont également observé que l'emploi de granulats recyclés accroît significativement l'absorption d'eau des bétons, et ce, de manière proportionnelle au taux de substitution des GN. À titre d'exemple, une substitution totale conduit à une absorption capillaire environ deux fois supérieure à celle d'un béton autoplaçant (BAP) élaboré avec 100 % de granulats naturels. Cette augmentation est attribuée à la forte capacité d'absorption des granulats recyclés, qui modifie le système poreux du matériau. Toutefois, l'incorporation d'une addition minérale réactive, telle que le laitier granulé, à des taux de 15 % ou 30 %, permet d'atténuer sensiblement ces effets et d'améliorer la résistance du béton.

Selon les résultats obtenus dans la thèse de Kaddah (Kaddah, 2022), l'auteure a examiné la résistance à la pénétration des ions chlorure dans des bétons conventionnels élaborés avec trois types de graviers : naturels, recyclés carbonatés et recyclés non carbonatés, et en comparant les résultats avec un mortier considéré comme référence. La formulation utilisant exclusivement des granulats naturels a présenté la meilleure performance face à la pénétration des ions chlorure.

Toutefois, l'emploi de granulats recyclés carbonatés a contribué à abaisser le coefficient de diffusion des ions chlorure (traités à une carbonatation accélérée). D'après les constatations de Kaddah (Kaddah, 2022), le processus de carbonatation appliqué aux GBR conduit à une réduction de leur porosité, tout en améliorant la compacité de la pâte cimentaire ainsi que celle de la zone de transition interfaciale (ITZ). Les mêmes conclusions ont été apportées par Cheng et al. (Cheng et al, 2024), qui ont mis en évidence qu'une incorporation de 30 % de granulats recyclés, soumis à une carbonatation sous 75 kPa, permet d'augmenter significativement la résistance des BAP face à la pénétration des ions chlorure. Néanmoins, au-delà de 30% de remplacement, cette résistance diminue d'environ 38%. Selon les explications des auteurs, l'origine de cette amélioration réside principalement dans la cristallisation et la stabilisation des carbonates de calcium au sein des vides des GBR, générées par la pénétration du CO_2 et sa réaction avec les composés hydratés de la matrice cimentaire initiale, notamment la portlandite et les C-S-H. Ils expliquent également que des pressions de carbonatation élevées déterrent le mortier du granulat recyclé, ce qui favorise l'augmentation de la porosité et l'apparition de microfissures, réduisant ainsi les performances du béton durci.

Xuan et al (Xuan et al, 2017), rapporte que la densification de la microstructure des GBR après la carbonatation entraîne une diminution de l'absorption d'eau des bétons qui les contiennent. Selon les auteurs, ce critère est considéré comme un critère d'évaluation des autres indicateurs de durabilité. En réalité, la baisse de l'absorption d'eau conduit à une réduction de la porosité du béton ainsi qu'à une moindre perméabilité aux gaz et aux ions chlorure (Xuan et al., 2017).

L'étude menée par Chinzorigt et al (Chinzorigt et al, 2020), conclut que l'utilisation des granulats recyclés réduit la résistance du béton à la carbonatation ce qui est expliqué par l'augmentation des profondeurs carbonatés, notamment, si ces granulats ont été traités au CO_2 . Par ailleurs, une profondeur de carbonatation plus importante influence négativement la résistance du béton face à la pénétration des ions chlorure, selon les résultats des auteurs

(Chinzorigt et al., 2020), la diffusion des chlorures est rapide lorsque la résistance à la carbonatation diminue.

D'après Russo et Lollini (2022), l'introduction de granulats recyclés carbonatés en substitution de 30 % des granulats naturels conduit à une nette amélioration de la résistance du béton à la diffusion des ions chlorure. En effet, le coefficient de diffusion du béton contenant des GBR carbonatés est environ 1,1 fois supérieur à celui du béton à granulats naturels, tandis que celui du béton à base de GBR non carbonatés est environ 1,7 fois plus élevé. Les auteurs expliquent cette amélioration par l'effet bénéfique du traitement de carbonatation sur les GBR. Ils rapportent également que l'absorption d'eau et la capillarité (ou sorptivité) des bétons contenant des GBR carbonatés sont inférieures à celles des bétons à base de GBR non traités. Cette amélioration est attribuée au remplissage des pores des granulats par des dépôts de carbonate de calcium formés lors de la carbonatation.

Russo et Lollini (2022) ont également étudié l'effet de l'incorporation de granulats recyclés, qu'ils soient carbonatés ou non, sur la résistance des bétons face à la carbonatation, aussi bien en milieu naturel qu'en conditions accélérées. Leurs résultats indiquent qu'aucune tendance générale ne peut être dégagée, car deux explications contradictoires sont avancées : d'une part, la présence d'une plus grande quantité de portlandite, qui freine la carbonatation. D'autre part, une porosité totale plus élevée du béton recyclé, ce qui la favorise. Dans le cas du béton contenant des granulats recyclés carbonatés, bien qu'il contienne plus de mortier que le béton de référence, une partie de la portlandite est déjà consommée lors du traitement de carbonatation. Cela rend l'interprétation des résultats plus complexe et met en évidence la nécessité de recherches complémentaires afin de clarifier le mécanisme et l'influence des GBR-C sur la résistance des bétons à la carbonatation.

6. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES

La valorisation et la gestion durable des déchets solides s'imposent aujourd'hui comme un enjeu crucial, tant sur le plan environnemental qu'économique. Les granulats de béton recyclés (GBR) présentent une opportunité prometteuse en tenant lieu d'alternative aux granulats naturels, contribuant à préserver les ressources non renouvelables et à atténuer les pressions environnementales de la construction. Toutefois, leur nature hétérogène et leur porosité peuvent limiter leur utilisation à des taux élevés.

Pour améliorer la qualité des GBR, diverses méthodes de traitement ont été proposées, parmi lesquelles la carbonatation, qui constitue une solution intéressante. En utilisant ce procédé, il est possible de densifier la microstructure des GBR en précipitant le carbonate de calcium dans leurs pores et de capter durablement le CO_2 . La carbonatation des GBR a montré une amélioration significative de leurs propriétés, en particulier la diminution de l'absorption d'eau et l'augmentation de la résistance mécanique.

En outre, en plus de la valorisation des granulats de béton recyclés, l'ajout d'additifs minéraux dans les formulations des bétons autoplaçants (BAP) est une autre méthode clé pour améliorer

leurs propriétés. Les BAP sont fortement influencés par les additions telles que le (FC), le (LG) et la (PV), que ce soit à l'état frais ou à l'état durci. Le filler de calcaire, grâce à son effet de remplissage et de fluidification, améliore la maniabilité et la stabilité des BAP, tout en diminuant les risques de ségrégation. Le laitier granulé et la poudre de verre ont la même influence sur la performance des bétons, notamment à l'état durci, en raison de leur réactivité.

Le laitier granulé a un pouvoir hydraulique similaire à celui du clinker Portland, mais son développement est plus lent et il nécessite un activateur alcalin pour favoriser son hydratation.

Quant à la poudre de verre, elle participe à la production des hydrates secondaires suite à la réaction entre la portlandite et la silice amorphe de l'addition.

En combinant ces différentes stratégies, notamment l'utilisation de granulats recyclés traités par carbonatation et l'ajout d'additions minérales, on pourrait envisager une approche efficace pour créer des BAP performants, écologiques et durables. Néanmoins, il est nécessaire d'examiner en profondeur l'effet de ces matériaux sur les propriétés des BAP afin d'optimiser leur incorporation, tout en maintenant les performances requises en termes de fluidité, de résistance mécanique et de durabilité.

CHAPITRE I

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abdelgadir, A., Gholamerza, F., Fazl, O., Burkan, I., Ghani, R., Benoit, F., et Simon, F., (2009). Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and concrete composites*, 31(8): 555-563.

Abriak, Y., (2023). Valorisation des sédiments des dragage et des granulats de béton recyclés. Thèse de doctorat, IMT Nord-Europe et université de Sherbrooke.

Adesina, A., & Awoyera, P. (2019). Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production. *SN Applied Sciences*, 1(9), 962.

Agence national des Déchets (AND). (2020). Rapport sur la gestion des déchets en Algérie. Récupéré de <https://and.dz>

Akbarnezhad, A., (2010). Microwave-assisted production of aggregates from demolition debris. Amirkabir university of technology.

Al-Bayati, H, K, A., Das, P, K., Tighe, S.L., Baaj, H., (2016). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and building material.*, Vol. 112, pp. 284-298.

Alexandre, J., & Vénuat, M. (1968). De la carbonatation du béton-partie II. *Rev. des matériaux Constr*, 639, 469-481.

Ali-Boucetta, T. (2014) Contribution du Laitier Granulé et de la Poudre de Verre sur les Propriétés D'écoulement et de durabilité des Bétons Autoplaçant Et de Haute Performances. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

Ali-Boucetta, T., Behim, M., Cassagnabere, F., Mouret, M., Ayat, A., & Laifa, W. (2021). Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag. *Construction and Building Materials*, 270, 121133.

Amara, H., (2022). Contribution à la valorisation des granulats recyclés dans l'élaboration de béton autoplaçant : Etude comparée du comportement de bétons BAP et de mortier MBE. Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba.

Anstice, D.J., Page, C. L., Page, M. M. (2005). The pore solution phase of carbonated cement pastes. *Cement and Concrete research*, 35(2), 377-383.

Auroy, M., (2014). Impact de carbonatation sur les propriétés de transport d'eau des matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

B

Badreddine-Bessa, A. (2004). Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

Bai, G., Zhu, C., Liu, C., & Liu, B. (2020). An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and building materials*, 240, 117978.

Behim, M. (2005). Sous-produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire. Doctorat d'état Université Badji Mokhtar Annaba-Algérie.

Belghit, C. (2009). Contribution à la formulation d'un béton autoplaçant a base de matériaux locaux effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité, Mémoire de Magister. Mémoire de magister, Option matériaux et structures, Université Badji-Mokhtar Annaba, Algérie.

Bellara, S., (2022). Ouvrage réalisé sur un sol renforcé par des mélanges Co-valorisés : Application à la valorisation des sédiments en génie civil. Thèse de doctorat, Université de Skikda.

Bertin, M., (2017). L'impact du séchage au jeune âge sur la carbonatation des matériaux cimentaires avec additions minérales. Thèse de doctorat, Université Paris-Est-Marne-La vallée.

Bosiljkov, V. B. (2003). SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1279-1286.

Braymand, S., Roux, S., Fares, H., Déodonne, K., & Feugeas, F. (2017). Separation and quantification of attached mortar in recycled concrete aggregates. *Waste and Biomass Valorization*, 8, 1393-1407.

Brouwers, H. J. H., & Radix, H. J. (2005). Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. *Cement and concrete research*, 35(11), 2116-2136.

C

Chakradhara Rao. M., Bhattacharyya. S.K., Barai.S.V., (2011)., Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete, *Materials and Structures/ Materiaux et Construction*, Vol 44, N°1, p 205-220.

Chaussadent, T. (1999). Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé (No. OA 29).

Chekireb, S. (2015). Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).

Cheng, S., Chen, G., Chen, K., & Wang, H. (2024). Study on the effect of carbonized recycled coarse aggregate admixture on the properties of self-compacting concrete.

Cheribet Drouiche, Z, S, E, I., (2023). Valorisation de poudre de verre dans la formulation de béton autoplaçant. Mémoire de Master, Ecole nationale polytechnique.

Chinzorigt, G., Lim, M. K., Yu, M., Lee, H., Enkbold, O., & Choi, D. (2020). Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate. *Cement and Concrete research*, 136, 106062.

D

D. Xuan, (2016). “Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, p.8.

De Larrard, F. (2000). Structures granulaires et formulation des bétons.

De Larrard, F. (2002). Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux. Presses des Ponts.

Dheilly, R. M., Tudo, J., Sebaïbi, Y., & Quéneudec, M. (2002). Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca (OH) 2. *Construction and building materials*, 16(3), 155-161.

Dialnet. 2024. Circular Economy and Environment: Waste statistics in Algeria. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es>.

Djelloul, O. K., Menadi, B., Wardeh, G., & Kenai, S. (2018). Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag. *Advances in concrete construction*, 6(2), 103.

DRIEE, IAU îdF, et Unicem. (2017). Granulats en Île-de-France : Panorama régional. 80 pages

Drouet, E., (2010). Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires : prise en compte des transferts hydriques. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan.

Duval, R. (1992). La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. *La Durabilité du Béton*, 225-270.

E

El Hilali, A. (2009). Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP): influence des fines calcaires et des fibres végétales (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

El Hilali, A., Ghorbel, E., & Gonnon, P. (2006). Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants. *Actes 24èmes Rencontres Universitaires de Génie*, 155, 1-2.

Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and building materials*, 86, 178-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>

F

Ferreira, L., De Brito, J., & Barra, M. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617-627. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>.

Fraj, A. B., & Idir, R. (2017). Concrete based on recycled aggregates–Recycling and environmental analysis: A case study of paris’ region. *Construction and Building Materials*, 157, 952-964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>

Fumiaki, M., Yoshimichi, A., Sumio, S., (2000). Carbonation degree of autoclaved aerated concrete. *Cement and concrete research*, vol. 30(11), p. 1741-1745.

G

G. Bai, C. Zhu, C. Liu, and B. Liu, (2020). An Evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Contr. Build. Mater.*, vol. 240, p. 117978, Apr., doi: 10.1016/j.conbuilmat. 2019.117978.

Gendron, F., (2019). Carbonatation des matériaux cimentaire, étude de la diffusion du CO₂. Thèse de doctorat. Université La Rochelle, Ecole Doctorale EUCLIDE.
Global Cement and Concrete Association (GGCA). (2020). *Cement and concrete around the world*.

Goellner, J., (2017). Granulats en ile de France, Panorama régional.
Gómez-Soberón J.M.V., (2002) “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study”, *Cement and concrete research*, Vol 32N°2, °p 1301-1311.

Gómez-Soberón J.M.V., (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study., *Cement and concrete research*, Vol 32N°2, °p 1301-1311.

Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M., & Ristic, N. S. (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1129-1133.

H

Hamada, M., (1968). Corrosion of reinforcing steel in concrete and its control: A review., *journal of the society of Materials Science*, 17(175), 848-856.

Hancox, N. L. (1968). The role of moisture diffusion in the drying of cement paste under the influence of temperature gradients. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1(12), 1769.

Hayakawa, M., Matsuoka, Y., & Shindoh, T. (1993). Development and application of superworkable concrete. In *Special Concretes-Workability and Mixing* (pp. 185-192). CRC Press.

Hyvert, N., Sellier, A., Duprat, F., Rougeau, P., & Francisco, P. (2010). Dependency of C–S–H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. *Cement and Concrete Research*, 40(11), 1582-1589.

I

IDIR, R. (2009). Mécanismes d’Actions des Fines et des Granulats de Verre sur la Réaction Alkali-Silice et la réaction Pouzzolanique, Thèse de Doctorat en Cotutelle, Université de Sherbrooke de Canada et l’université INSA de Toulouse.

International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, (1992)., Recycling and demolished concrete and masonry: report of Technical Committee 37- DRC, Demolition and Reuse of Concrete, 1st ed. ed, RILEM report. E & FN Spon, London; New York.

Ishiba, T., Maekawa, K., (2000)., Modelling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory. Proceeding of JSCE, 47, Tokyo.

Ismail, S., Ramli, M., (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural application. Construction and building material., Vol 44, pp. 464-476.

J

Ji, Y., Yuan, Y., Shen, J., Ma, Y., & Lai, S. (2010). Comparison of concrete carbonation process under natural condition and high CO₂ concentration environments. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 25(3), 515-522.

K

Kaddah, F., (2022). Etude multi-échelle de la carbonatation des granulats de béton recyclé : nouvelles méthodes de caractérisation et modélisation. Thèse de doctorat, Ecole nationale de Nantes.

Kapoor, K., Singh, S. P., Singh, B., & Singh, P. (2020). Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Materials Today: Proceedings, 32, 600-607.

Katz, A., (2003)., Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and Concrete Research, Vol 33, N°5, p 703-711.

Khayat, K. H. (1998)., Use of viscosity-modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete. Materials Journal, 95(2), 158-167.

Kikuchi, T., & Kuroda, Y. (2011)., Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 9(1), 115-124.

Kocaba, V., (2009)., Development of evaluation of methods to follow microstructural development of cementitious systems including slags. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne.

Kunwufine, D., (2015)., Etude des caractéristiques physico-chimiques de béton de granulats recyclés et de leur impact environnemental. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.

L

Lachat, A. (2022)., Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnementale et mesure dans le cadre d'une économie circulaire. Thèse de doctorat, Université de Paris.

Légifrance. (2023)., Code de l'environnement, article L541-1-1.

Liang, K., Hou, Y., Sun, J., Li, X., Bai, J., Tian, W., & Liu, Y. (2021)., Theoretical analysis of water absorption kinetics of recycled aggregates immersed in water. Construction and Building Materials, 302, 124156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124156>

Lopez-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-Lopez, M., & Lopez-Colina, C., (2009)., Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, 29(12), 3022-3028. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.009>

Lu, B., Shi, C., Cao, Z., Guo, M., & Zheng, J. (2019)., Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *Journal of cleaner production*, 233, 421-428.

M

M.S. de Juan and P.A. Gutiérrez, (2009)., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and building materials.*, vol.23, no.2, pp. 872-877, Feb., doi: 10.1016/j.Conbuildmat.2008.04.012.

Marchand, J., Bentz, D. P., Samson, E., & Maltais, Y., (2001)., Influence of calcium hydroxide dissolution on the transport properties of hydrated cement systems. *Proceeding of the American Ceramic Society: Workshop on the Role of Calcium Hydroxide in Concrete.*

Matar, P., & El Dalati., (2012)., «Caractéristiques du béton à base de granulats recyclés ». *Etude expérimentales. Annales du Bâtiments et des travaux publics.*, P 32-39.

Meftah, H., (2018)., Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons de granulats recyclés, renforcés de fibres polypropylène. *Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba.*

Michel, F., Piérard, J., Courard, L., & Pollet, V. (2007)., Influence of physico-chemical characteristics of limestone fillers on fresh and hardened mortar performances. In *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Proceedings PRO 54.* RILEM Publications SARL, Bagneux, France.

Ministères de l'environnement et des énergies renouvelables. (2020)., Stratégie nationale de gestion intégrée des déchets (SNGID) à l'horizon 2035. Récupéré de <https://and.dz>

Mo, K. H., Ling, T. C., & Cheng, Q. (2021)., Examining the influence of recycled concrete aggregate on the hardened properties of self-compacting concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 1133-1141.

Morandeu, M. (2013)., Carbonation atmosphérique des systèmes cimentaires à faible teneur en portlandite. *Thèse de doctorat, Université de Paris-Est.*

Mulder, E., De Jong, T, P, R., Feenstra, L., (2007)., Closed cycle construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Manag.*, Vol 27, no. 10, pp. 1408-1415.

N

Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., (2000)., Effects of recycled aggregate characteristics on performance parameters of recycled aggregate concrete. *Symposium Paper, Vol. 192: 53-72.*

Namoulniara, D. K. (2015)., Etude expérimentale de la diffusion du CO₂ et des cinétiques de carbonatation de matériaux cimentaires à faible dosage en clinker (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).

O

Okamura, H., & Ozawa, K. (1995)., Mix design for self-compacting concrete. *Concrete library of JSCE*, 25(6), 107-120.

Okamura, H., Ouchi, M. (1999)., Self-compacting concrete development, present use and future. In A. Skarendahl & O. Petersson (Eds.), *the first international RILEM Symposium on self-compacting concrete* (pp 3-14). RILEM publications S.A.R.L.

Otsuki, N., Hisada, M., Nagataki, S., & Kamada, T. (1996)., An experimental study on the fluidity of antiwashout underwater concrete. *ACI Materials Journal*, 93(1), 20-25.

P

Padmini, A., Ramamurthy, K., & Mathewes, M.S. (2009)., Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 23(2), 829-836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>

Parrot, L. j., & Killoh, D. C., (1989)., Carbonation in 36- year- old, in situ concrete. *Magazine of concrete research*, 41(149), 3-10.

Parrott, L. J. (1987)., A review of carbonation in reinforced concrete.

Pena Torres, P, (2020)., Modélisation du comportement à long terme des bétons de granulats recyclés. Thèse de doctorat, Université de Cergy, Paris.

Peric, J., Vucak, K., Krstulovic, R., Brecevic, L., & Kralj, D., (1996)., Phase transformation of calcium carbonate polymorphs. *Thermochimica Acta*, 277, 175-186.

Petersson, O., Billberg, P., & Van, B. K. (2004)., A model for self-compacting concrete. In *Production methods and workability of concrete* (pp. 495-504). CRC Press.

Q

Quattrone, M., Cazacliu, B., Angulo, S. C., Hamard, E., & Cothenet, A. (2016)., Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production. *Construction*.

R

Rahman, A. A., & Glasser, F. P. (1989)., Comparative studies of the carbonation of hydrated cements. *Advances in Cement Research*, 2(6), 49-54.

Ramachandran, V, S., Ralph, M, P., Baudoin, J, J., Delgado, A, H., (2002)., Handbook of thermal analysis of construction materials. Noyes Publications.

Rao, A., (2005)., “Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete”, Department of civil engineering, Institut indien de technologie, Thèse de doctorat, Kânpur-Inde.

Rémond, S., Mechling, J. M., Garcia-Diaz, E., Lavaud, R., Trauchessec, R., & Cazacliu, B. (2018)., Caractérisation des granulats de béton recyclés.

Russo, N., & Lollini, F. (2022)., Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 51, 104290.

S

Saadé, M., Feraille, A., Rospars, C., & Torrenti, J. M. (2021)., Captage de CO₂: Analyse du cycle de vie d'un processus de carbonatation de granulats de béton recyclés. *Journée GC*.

Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., & Taylor, A. H. (2001)., Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and concrete research*, 31, (5), 707-712. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)

Sajas, L., Francoeur, V., & Bourgault, M. (2024)., Analyses des facteurs influençant l'adoption de comportement écoresponsable dans l'industrie de la construction : Une revue systématique des leviers et obstacles. *Le climatoscope*, (n°6), département de mathématique et de génie industriel, polytechnique Montréal.

Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020)., Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540.

Sereng, M., Djerbi, A., Omikrine, M. O., Dangla, P., & Torrenti, J. M. (2019)., Effet de la carbonatation sur les granulats recyclés et le coefficient d'absorption d'eau. *Academic Journal of Civil Engineering*, 37(1), 110-114.

Ševčík, R., Šašek, P., Viani, A. (2017)., Physical and nanomechanical properties of synthetic anhydrous crystalline CaCO₃ polymorphs: vaterite, aragonite and calcite. *Journal of Materials Science*, 53(6), 4022-4033.

Siad, H., Mesbah, H. A., Khelafi, H., Escadeillas, G., & Mouli, M. (2011)., Effet de la nature de l'addition minérale sur la diffusion et la perméabilité au gaz des BAP.

Sosa, M. E., Zaccardi, Y. A. V., & Zega, C. J. (2021)., A critical review of the resulting effective water-to-cement ratio of fine recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 313, 125536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125536>.

Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1987a., Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete, *Magazine of Concrete Research* 39.

Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T., 1987b., Recycled concrete as fine aggregate in concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 9, 235-241. Doi: 10.1016/0262-5075(87)9007-8.

Su, N., & Miao, B. (2003)., A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 215-222.

Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001)., A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and concrete research*, 31(12), 1799-1807.

Shaban, W. M., Yang, J., Su, H., Mo, K. H., Li, L., Xie, J. (2019)., Quality Improvement Techniques for Recycled Concrete Aggregate: A review », *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 17, no 4, p. 151-167.

T

Tabsh, S. W., Abdelfatah. A.S., (2009)., Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol23, N°2, 1163-1167.

Tai, C. Y., & Chen, F. B., (1998)., Polymorphism of CaCO₃ precipitated in a constant-composition environment. *AIChE Journal*, 44(8), 1790-1798.

Tam V.W.Y., Wang K., and Tam C.M., (2008)., “Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol 152, N°2, p 703-714.

Tangtermsirikul, S., & Bui, V. K. (1995, December)., Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete. In *Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil thailand engineering* (pp. 58-69).

Thiery, M., (2005)., Modélisation atmosphérique des matériaux cimentaires, prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques. Thèse de doctorat, École nationale des Ponts et Chaussées.

Thiery, M., (2007). Exemple d'application d'un modèle de carbonatation in situ, BLPC. n° 270-27, p. 22.

V

Van Balen, K., Van Gemert, D. (1994)., Modelling lime mortar. *Materials and Structures*, 27, 393-398.

Van Khanh, B., & Montgomery, D. (1999)., Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume. In *Self-compacting concrete* (Stockholm, 13-14 September 1999) (pp. 373-384).

W

Wong, S. F., Wee, T. H., Swaddiwudhipong, S., & Lee, S. L. (2001). Study of water movement in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 53(3), 205-220.

X

Xiao, J., Zhang, H., Tang, Y., Deng, Q., Wang, D., & Poon, C. S. (2022)., Fully utilizing carbonated recycled aggregates in concrete: Strength, drying shrinkage and carbon emissions analysis. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134520.

Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2016)., Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65, 67-74.

Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2017)., Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 84, 214-221.

Y

Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L. (2007)., Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102.

Yoda, K., Harada, M., & Sakuramoto, F. (2003)., Field application and advantage of concrete recycled in-situ recycling systems. In *Recycling and Reuse of Waste Materials* (pp. 437-446). Thomas Telford Publishing.

Yoon, I. S., Çopuroğlu, O., & Park, K. B. (2007)., Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete. *Atmospheric environment*, 41(34), 7274-7285.

Younsi, A., (2011)., Carbonatation de bétons à forts taux de substitution de ciment par des additions minérales. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle.

Z

Zhu, W., & Gibbs, J. C. (2005)., Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1457-1462.

CHAPITRE II

TÉCHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

CHAPITRE II

TÉCHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matériaux employés dans cette recherche, avec un focus particulier sur les granulats recyclés. Il décrit également les différentes méthodes expérimentales qui seront utilisées pour analyser l'influence du remplacement des granulats naturels par des granulats de béton recyclés sur le comportement des BAP, tant à l'état frais qu'après durcissement.

Sommaire

1. INTRODUCTION	64
2. PRÉSENTATION ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISES	64
2.1 CIMENT	64
2.2 ADDITIONS MINERALS	65
2.2.1 <i>Filler calcaire (FC)</i>	65
2.2.2 <i>Laitier granulé de haut fourneau (LG)</i> .	66
2.2.3 <i>Poudre de verre à bouteille (PV)</i>	67
2.3 GRANULATS	69
2.3.1 <i>Sables</i>	69
2.3.2 <i>Gravillons</i>	69
2.3.3 <i>Cinétique d'absorption des gravillons recyclés</i>	72
2.4 SUPERPLASTIFIANT	72
2.5 EAU DE GACHAGE	73
3. PROCÉDURES EXPERIMENTALES	73
3.1 PREPARATION ET TRAITEMENTS DES GRAVILLONS RECYCLES	73
3.2 ANALYSES MICROSTRUCTURALES EFFECTUEES SUR LES GRAVILLONS RECYCLES	74
3.2.1 <i>Analyse thermogravimétrique (ATG)</i>	74
3.2.2 <i>Observation au MEB</i>	75
3.2.3 <i>Porosimétrie par intrusion de mercure (MIP)</i>	76

3.3 PREPARATION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES	76
3.4 CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS	77
3.4.1 Étalement au cône d'Abrams.	77
3.4.2 Mesure du temps d'écoulement (T500)	78
3.4.3 Taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX)	79
3.4.4 Stabilité au tamis.....	80
3.4.5 Mesure de la masse volumique	80
3.4.6 Mesure de la teneur en air occlus	81
3.5 CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT DURCI.....	81
3.5.1 ESSAIS MECANIQUES	81
3.5.1.1 Essai de compression	81
3.5.1.2 Module de déformation dynamique	82
3.5.2 INDICATEURS DE DURABILITE.....	83
3.5.2.1 Essai d'absorption d'eau par capillarité	83
3.5.2.2 Essai de mesure de la Porosité accessible à l'eau.....	84
3.5.2.3 Essai de perméabilité à l'air.....	85
3.5.2.4 Essai de carbonatation accélérée	87
4. SYNTHÈSE.....	89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90

CHAPITRE II

TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

1. INTRODUCTION

Le présent chapitre est divisé en deux parties distinctes. La première section fournit une description détaillée des matériaux utilisés pour la formulation des différents mélanges de BAP. Chaque composant y est examiné sous l'angle de ses propriétés physiques, mécaniques et microstructurales, afin de comprendre son impact sur les performances des bétons. La seconde partie est destinée à la présentation des protocoles expérimentaux, mis en œuvre pour la préparation et le traitement par carbonatation des granulats recyclés. Elle présente en outre les techniques utilisées pour caractériser les BAP à l'état frais et durci, ainsi que les essais réalisés afin d'évaluer leur durabilité.

La réduction des déchets de béton en petits morceaux transportables a été réalisée sur le site de récupération du béton en décharge. Tandis que, les essais de caractérisation à l'état frais et les mesures de résistance mécanique ont été réalisés au laboratoire des Matériaux, Géomatériaux et Environnement (LMGE) à Annaba, Algérie.

Les essais de durabilité et les analyses microstructurales ont été effectués dans deux laboratoires : le laboratoire de l'école nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran, Algérie, et le laboratoire de Génie civil et Géo-environnement (LGCGE) de l'institut des Mines-Télécoms Nord-Europe à Lille, France.

2. PRÉSENTATION ET CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. *Ciment* :

Le ciment employé dans cette étude provient de la cimenterie de Biskra (SPA BISKRA Ciment), Algérie. C'est un ciment portland (CEMI 42,5 R) sans additions qui est conforme à la norme algérienne (NA 442,13). Le tableau (2.1) présente ses propriétés physiques, ses compositions chimiques et minéralogiques calculées à partir des formules de BOGUE.

Tableau 2.1. Propriétés physiques, composition chimique et minéralogique du ciment (CEMI 42,5 R)

Propriétés physiques								
	Masse volumique Apparente (kg/m ³)	Masse volumique Absolue (kg/m ³)	S.S.B (cm ² /g)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Consistance normale (%)	Refus au tamis 40 µm (%)	
CEM I 42.5R	980	3100	3728	220	280	26	12	
Composition chimique								
Oxydes (%)	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
CEM I 42.5R	64,67	4,41	3,62	21,0	2,37	2,70	0,67	2,92
Composition minéralogique								
Eléments (%)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gypse			
	68,8	8,3	5,6	11,0	5			

2.2. Additions minérales

Trois types d'additions minérales ont été choisis et utilisés dans cette thèse : À l'exception du filler calcaire, le laitier granulé ainsi que la poudre de verre ont été récupérés (lavés et concassés pour le cas de la poudre de verre), séchés et broyés au niveau du laboratoire (LMGE) à l'aide d'un broyeur à boulets de capacité maximale de 10 Kg.

2.2.1. Filler Calcaire (FC)

L'addition est commercialisée par l'entreprise SNC Bexcarb Benbrahim, située à El-Kherroub wilaya de Constantine, sous la dénomination Bexcar 10N (Voir fiche technique, en annexe 2). Le produit est issu du concassage et broyage de roche calcaire et se présente sous forme d'une fine poudre blanchâtre (Figure 2.2). Le tableau 2.2 présente les caractéristiques physiques et la composition chimique du filler calcaire.

Tableau 2.2. Composition chimique et Propriétés physiques du filler calcaire

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	53,49	Masse volumique absolue	(g/cm ³)	2,68
Al ₂ O ₃	0,25	Masse volumique apparente	(g/cm ³)	1,09
Fe ₂ O ₃	0,27	Surface spécifique Blaine	(cm ² /g)	5018
SiO ₂	0,18	Refus au tamis 40 µm	(%)	12,9
MgO	0,22	Refus au tamis 80 µm	(%)	2,5
Na ₂ O	0,07	D ₅₀	(µm)	6,9
K ₂ O	0,01	Demande en eau	(%)	31
Cl ⁻	0,00			
SO ₃	0,00			
P-A-F	43,29			

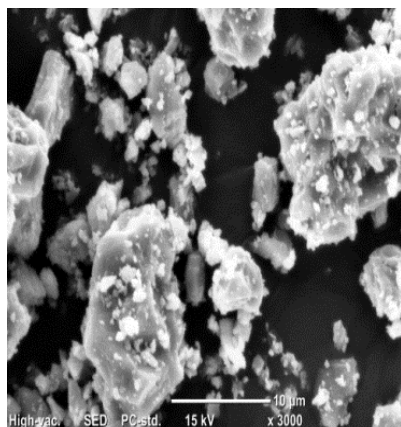


Figure 2.1. Image MEB du filler calcaire (agrandissement de 3000)

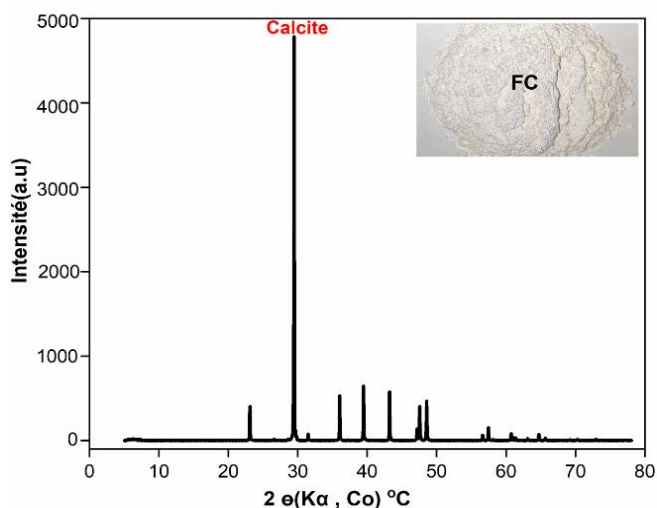


Figure 2.2. Diffractogramme RX du filler calcaire

La photo MEB du filler calcaire présentée sur la figure 2.1 montre des particules de forme principalement angulaire, avec une distribution variée des tailles. Les plus grosses particules présentent des surfaces rugueuses accompagnées de plus petites particules adhérentes à leurs surfaces. Cette morphologie irrégulière et rugueuse permet d'augmenter la surface de contact avec le ciment. Parallèlement, la DRX confirme que ces particules sont majoritairement constituées de calcite (CaCO_3).

2.2.2. Laitier granulé de haut fourneau (LG)

Originaire du complexe sidérurgique d'El-Hadjar, dans la wilaya d'Annaba, ce matériau provient du processus de production de la fonte. À la sortie du haut fourneau, 60% du laitier produit est refroidi brutalement (Behim, 2005), formant ainsi un produit dont la granulométrie s'étend de 0 à 5 mm et il se caractérise par des grains sphériques de teinte claire. Les caractéristiques physiques et la composition chimique du laitier granulé sont détaillées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Composition chimique et Propriétés physiques du laitier granulé

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	44,73	Masse volumique absolue	(g/cm^3)	2,90
Al_2O_3	6,80	Masse volumique apparente	(g/cm^3)	0,94
Fe_2O_3	1,60	Surface spécifique Blaine	(cm^2/g)	5797
SiO_2	36,37	Refus au tamis 40 µm	(%)	12,2
MgO	3,21	Refus au tamis 80 µm	(%)	2,3
K_2O	0,68	D₅₀	(µm)	3,4
Cl ⁻	0,16	Demande en eau	(%)	33
Na_2O	0,24			
SO_3	0,35			

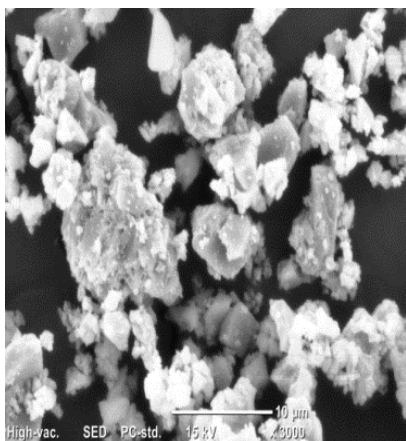


Figure 2.3. Image MEB du laitier granulé (agrandissement de 3000)

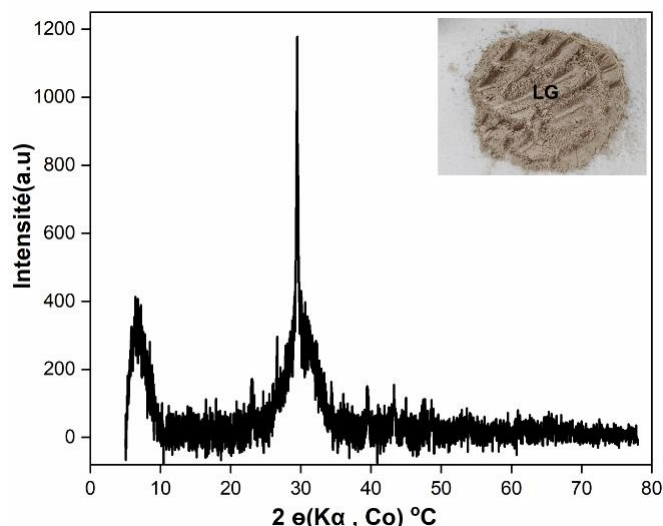


Figure 2.4. Diffractogramme RX du laitier granulé

L'image MEB du laitier granulé montre des particules de forme principalement angulaire, certaines apparaissant agglomérées et formant des amas. Des observations similaires à celles rapportées par (Bellara et al, 2021 ; E,Condren et al, 2007). Cette morphologie angulaire avec des surfaces rugueuses augmente la surface de contact et favorise une bonne interaction avec la matrice cimentaire, améliorant ainsi la réactivité du matériau. L'analyse DRX montre la présence de calcite avec un pic autour de 30° . D'après l'analyse de ce diagramme, on peut conclure que le laitier granulé possède une structure vitreuse, résultant de son refroidissement rapide. Cette structure vitreuse lui confère une réactivité chimique, ce qui favorise la formation des hydrates de formation secondaire.

2.2.3. Poudre de verre à bouteilles (PV)

Le matériau utilisé provient du recyclage de bouteilles en verre jetées dans l'environnement. Seules les bouteilles de couleur verte ont été sélectionnées pour ce processus. Après un nettoyage minutieux visant à éliminer les impuretés. Les bouteilles ont été broyées finement pour obtenir une poudre de couleur grisâtre majoritairement constituée de silice comme le montre la composition chimique présentée dans le tableau 2.4. L'utilisation de ce déchet dans les mélanges à base de liants apporte des avantages techniques grâce à ses propriétés pouzzolaniques (Ali-Boucetta, 2014 ; Idir, 2009) tout en offrant une solution environnementale favorable.

Tableau 2.4. Composition chimique et Propriétés physiques de la poudre de verre

Analyse chimique		Analyse physique		
Oxydes	% Massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	10,58			
Al ₂ O ₃	1,29	Masse volumique absolue	(g/cm ³)	2,54
Fe ₂ O ₃	1,15	Masse volumique apparente	(g/cm ³)	0,82
SiO ₂	68,08	Surface spécifique de Blaine	(cm ² /g)	5112
MgO	1,57	Refus au tamis 40 µm	(%)	12,7
K ₂ O	0,41	Refus au tamis 80 µm	(%)	2,5
Cl	0,01	D ₅₀	(µm)	6,8
Na ₂ O	15,37	Demande en eau	(%)	31
SO ₃	0,04			
P-A-F	0,50			

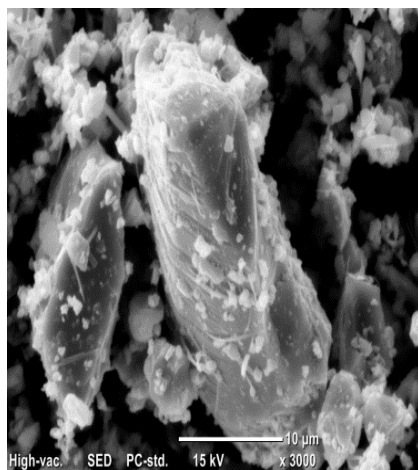


Figure 2.5. Image MEB de la poudre de verre (agrandissement de 3000)

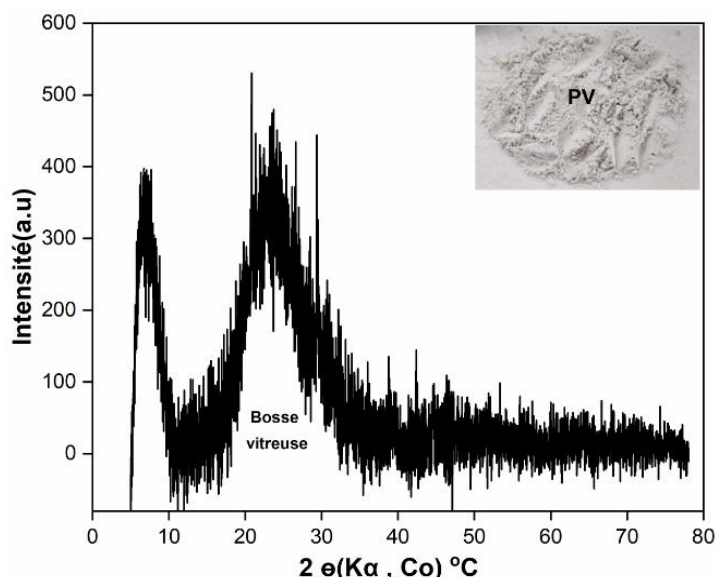


Figure 2.6. Diffractogramme RX de la poudre de verre

Sous MEB, les particules de la poudre de verre présentent une forme allongée analogue à celle d'aiguilles, avec des surfaces relativement lisses et la présence de petites particules adhérentes. Cette morphologie angulaire et allongée favorise une meilleure répartition dans la matrice cimentaire, augmentant ainsi la surface de contact pour les interactions chimiques. Les particules, bien que lisses, conservent leur potentiel de réactivité grâce à leur composition riche en silice. En parallèle, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) confirme que la poudre de verre possède une structure vitreuse. Cette nature vitreuse, combinée à sa forme angulaire, renforce son potentiel à améliorer la réactivité dans les matrices cimentaires, notamment en se comportant comme un matériau pouzzolanique.

La distribution granulométrique du ciment et des ajouts utilisés a été effectuée conformément à la norme (NF-ISO 13320), à l'aide d'un appareil laser Coulter LS 230 (Figure 2.7), qui permet

de mesurer des particules de tailles comprises entre $0,04 \mu\text{m}$ et $2000 \mu\text{m}$. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 2.8.



Figure 2.7. Granulomètre laser Coulter LS 230 (IMT Nord-Europe, Lille)

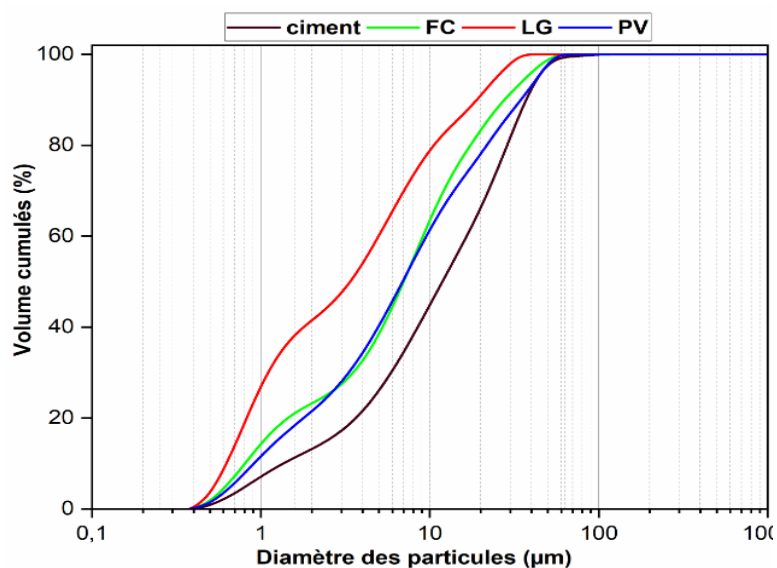


Figure 2.8. Courbe granulométrique du ciment et des ajouts utilisés

2.3. Granulats

2.3.1. Sables

Deux sables distincts ont été sélectionnés pour cette étude. Le premier est un sable siliceux roulé provenant des dunes d'Oum Ali à Tébessa, avec une granulométrie comprise entre 0 et 2 mm et un module de finesse de 2,10. Le second est un sable grossier issu du concassage des roches calcaires, fourni par l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) à El-Kherroub (Constantine), présentant des dimensions de 0 à 4 mm et un module de finesse de 3,2.

2.3.2. Gravillons

Trois types de gravillons ont été utilisés. Un gravillon naturel (GN) de dimensions (4/10) mm, d'origine calcaire, provenant d'Ain Abid situé à 40 Km de la wilaya de Constantine. Les deux autres gravillons proviennent du recyclage des déchets de déconstruction d'une ancienne construction à usage résidentiel, construite dans les années 2000 à Annaba, dans l'est de l'Algérie, dont le béton présentait une résistance en compression d'environ 20 à 25 MPa (Figure 2.9).



Figure 2.9. Déchets de déconstruction

Après la préparation des gravillons recyclés (voir la section procédures expérimentales), une partie a été utilisée à l'état brut (frais) noté (GBR-F), tandis que l'autre a été soumise à un traitement de carbonatation naturelle et est notée (GBR-C). La figure 2.10 illustre les trois gravillons utilisés.



a. Gravillon Naturel



b. Gravillon recyclé non traité (frais)



c. Gravillon recyclé carbonaté

Figure 2.10. Différents types de gravillons utilisés

La distribution granulométrique des granulats d'étude est illustrée dans la figure 2.11, tandis que leurs propriétés physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau 2.5.

2.3.3. Cinétique d'absorption des gravillons recyclés

Le suivi de la cinétique d'absorption des GBR a été déterminé par la méthode du pycnomètre selon la norme NF EN 1097-6 (NF EN 1097-6, 2022) sur trois échantillons de GBR pour des échéances de 5, 10, 20, 30 minutes, 1, 2, 4, 8, 24 et 48 heures de saturation dans l'eau. Contrairement à la méthode qui consiste à essuyer l'eau de surface des GBR avant chaque pesée, où certaines fines particules peuvent se détacher des GBR suite aux opérations d'épongeage au bout de deux ou trois tentatives (Liang et al., 2021 ; Duan et al., 2022), et par conséquent, les valeurs d'absorption d'eau des GBR diminuent et ne sont plus pertinentes. La méthode du pycnomètre s'affranchit de ces opérations d'essuyage et conserve l'état global des GBR pour des résultats plus fiables. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 2.12.

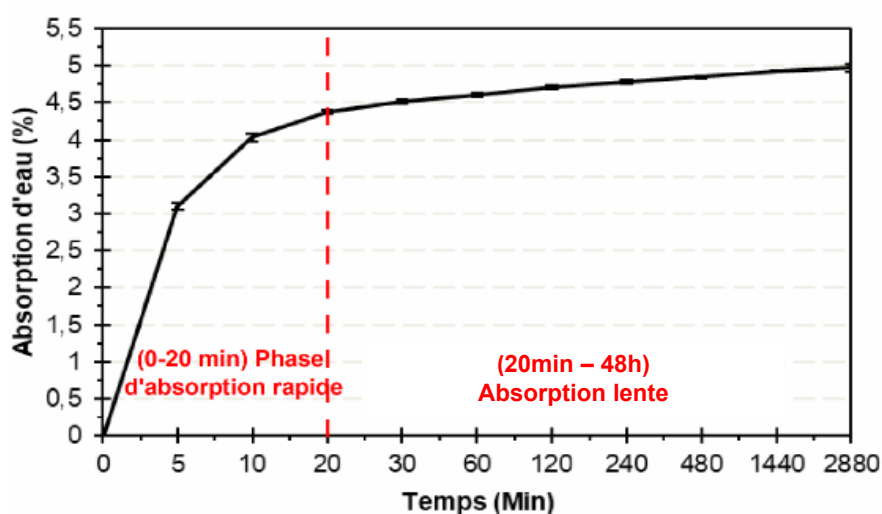


Figure 2.12. Cinétique d'absorption des gravillons de béton recyclés

Les coefficients d'absorption des GBR augmentent avec le temps ; cependant, l'absorption est plus rapide au cours des 20 premières minutes. En effet, au-delà de 20 minutes d'immersion des GBR dans l'eau, l'évolution de l'absorption est faible et tend à se stabiliser.

2.4. Superplastifiant

L'adjuvant choisi pour cette étude est le POLYFLOW LSR 8800, un superplastifiant capable de réduire fortement la quantité d'eau. Il s'agit d'un produit polyvalent de nouvelle génération, à base de polycarboxylate et sans chlore, commercialisé par l'entreprise SOLU-EST à Annaba. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6. Caractéristiques techniques du Superplastifiant POLYFLOW LSR 8800

Densité	pH	Teneur en Cl ⁻	Teneur en Na ₂ O	Extrait Sec
1,07 ± 0,02	5 à 5,5	≤ 0,1 %	≤ 1 %	29% à 2%

2.5. Eau de gâchage

Pour la préparation des divers mélanges de béton, l'eau utilisée provenait du réseau d'eau potable du département de génie civil de l'université d'Annaba.

3. PROCÉDURES EXPERIMENTALES

3.1. PRÉPARATION ET TRAITEMENT DES GRAVILLONS RECYCLÉS

À l'issue du tri des déchets de démolition, les blocs de béton ont été fragmentés par concassage à l'aide d'un marteau, puis réduits à des dimensions compatibles avec l'ouverture du concasseur à mâchoires. Les blocs concassés ont ensuite été tamisés pour obtenir des granulats aux dimensions similaires à celles des gravillons naturels, soit 4/10 mm.

Une partie de ces gravillons a été utilisée à l'état frais (brut) (GBR-F), tandis qu'une partie a été exposée à l'air libre, dans un garage de réparation mécanique de véhicules, où les valeurs de CO_2 enregistrées varient de 0,09 % à 0,11 %, pouvant atteindre jusqu'à 0,46 %. Pendant la période de traitement, les conditions ambiantes étaient relativement stables, présentant une température moyenne proche de $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ et une humidité relative de $70\% \pm 5\%$.

Les gravillons ont été étalés en couches fines dans des bacs comme illustré dans la figure 2.13 et régulièrement remués pendant une période d'environ huit mois. À l'issue de chaque intervalle de temps, à savoir 0, 3, 5 et 8 mois, la carbonatation a été vérifiée par pulvérisation de la phénolphthaléine (figure 2.14). Cette opération a été répétée jusqu'à ce que l'ensemble des grains soit entièrement incolore, indiquant une carbonatation complète.

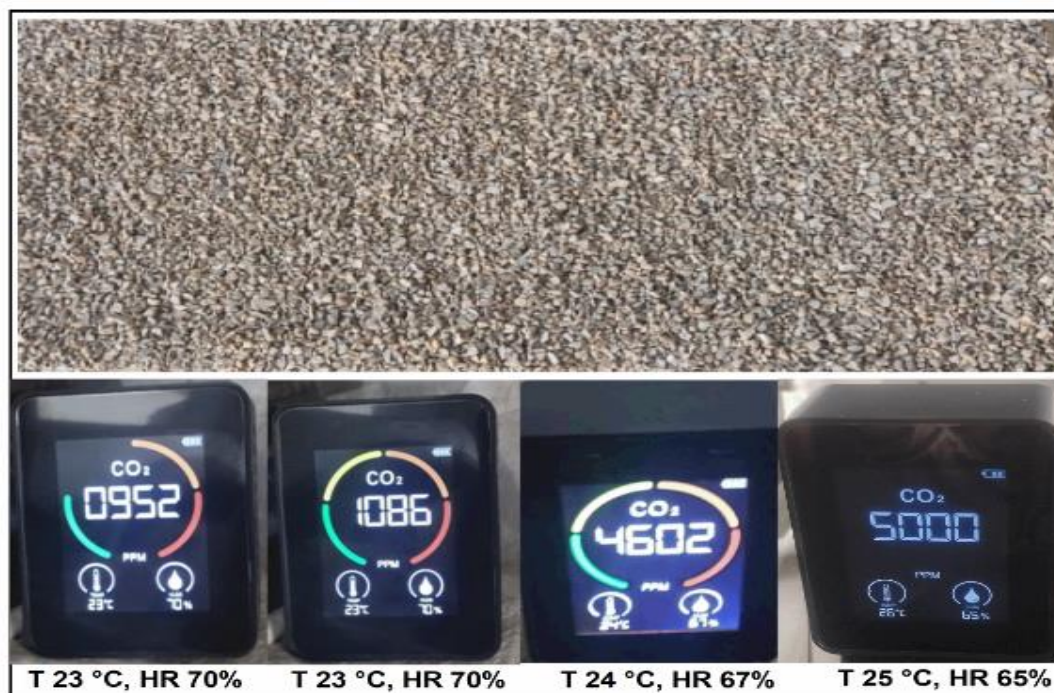


Figure 2.13. Exposition et traitement des gravillons recyclés



Figure 2.14: Evolution de l'état de carbonatation des gravillons recyclés

3.2. Analyses microstructurales effectuées sur les granulats recyclés

3.2.1. Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique (ATG) permet de mesurer comment la masse d'un échantillon évolue selon le temps et la température au cours d'un programme thermique prédéfini. Cette technique permet de détecter les transformations de phase en observant les pertes de masse associées à des réactions spécifiques au cours de l'augmentation de la température.

L'ATG peut fournir des informations qualitatives et quantitatives sur la composition des matériaux. Elle est utilisée pour caractériser les matériaux cimentaires en mesurant directement les variations de masse dues à la décomposition ou à la libération des composants, tels que l'eau chimiquement liée, la portlandite et les carbonates de calcium (Mefteh, 2018). Elle est souvent couplée à l'analyse dérivée (DTG) pour quantifier les différentes pertes de masse identifiées pendant l'essai.

L'analyse thermogravimétrique a été effectuée dans notre étude sur les gravillons recyclés à l'état frais et après carbonatation, qui ont été séchés au préalable dans une étuve ventilée à 40 °C jusqu'à ce que leur masse reste stable. Les échantillons broyés ont ensuite été soumis à l'analyse à l'aide d'un appareil Netzsch STA 449F3 (figure 2.15). Cette méthode vise à étudier dans notre cas l'effet de la carbonatation naturelle sur les granulats de béton recyclés, c'est-à-dire la génération de carbonate de calcium et la consommation des composés hydratés dans la matrice cimentaire préexistante.

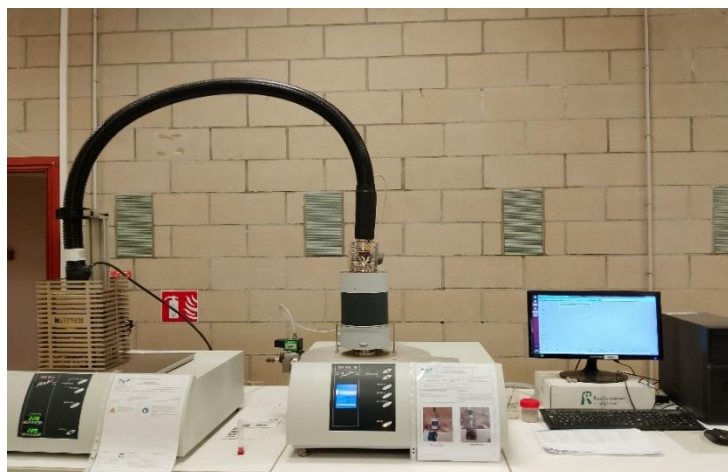


Figure 2.15. Appareil d'analyse thermogravimétrique (ATG) Netzsch STA 449F3 (IMT Nord-Europe, Lille)

3.2.2. Observation au MEB

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées pour étudier l'effet de la carbonatation naturelle sur la microstructure des granulats recyclés. Ce type d'observation permet de visualiser les transformations microstructurales, notamment, la transformation des hydrates, en particulier la portlandite et les CSH en carbonate de calcium, suite au traitement.

Par ailleurs, le MEB a également été utilisé pour observer la morphologie des additions, à savoir : le filler calcaire (FC), le laitier granulé (LG) et la poudre de verre (PV) à des échelles microscopiques. Ces analyses visent à mieux comprendre les propriétés intrinsèques de ces matériaux et leur interaction potentielle dans les mélanges cimentaires.

L'appareil utilisé pour ces observations est le microscope JEOL qui favorise des observations à très haute résolution (figure 2.16).



Figure 2.16. MEB JEOL utilisé pour les observations microstructurales (IMT Nord-Europe, Lille)

3.2.3. Porosimétrie par intrusion de mercure

La mesure de la porosité par intrusion de mercure a été réalisée dans l'objectif d'étudier la structure poreuse ainsi que la distribution des pores à l'échelle nanométrique et micrométrique des gravillons recyclés, avant et après leur traitement par carbonatation. À cet effet, l'essai a été effectué conformément à la norme ISO 15901-1 (ISO 15901-1, 2016), à l'aide d'un porosimètre de marque Micromeritics Autopores V 9600 (Figure 2.17) ; à l'égard des échantillons de gravillons frais (non traités) et d'échantillons traités, tous inclus dans la plage granulométrique (4/6,3) mm, sèches préalablement à 40 °C.

Cet appareil permet d'effectuer des mesures aussi bien à basse qu'à haute pression. À basse pression, 0-50 psi, soit environ 345 KPa, il permet de déterminer les pores de plus grande taille, pouvant atteindre jusqu'à 360 µm. À haute pression (jusqu'à 33000 psi, soit 228 MPa), il permet de caractériser des pores de taille réduite, compris entre 6 et 0,005 µm.

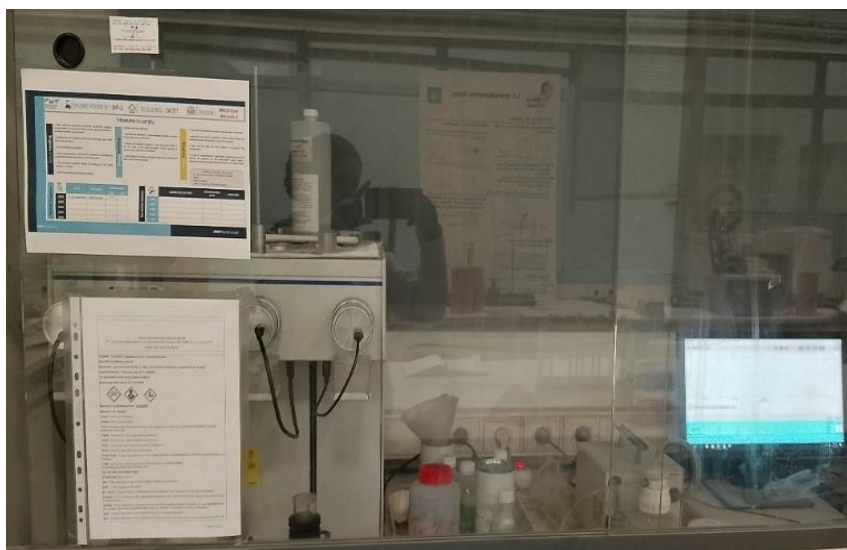


Figure 2.17. Porosimètre à mercure (IMT Nord-Europe, Lille)

3.3. Préparation et conservation des éprouvettes

Le béton a été préparé à l'aide d'une bétonnière à axe incliné d'une capacité maximale de 35 l/m³. La méthode de formulation adaptée est présentée dans le troisième chapitre. Le processus de malaxage est détaillé dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7. Séquence de malaxage du BAP

Durée	Phase
t 1min	Incorporation des différentes fractions granulaires, suivie de l'ajout du ciment et des différents ajouts minéraux (malaxage pendant 1 min).
t 2min	Introduction de 75% de l'eau de gâchage et malaxage pendant 2 minutes
t 3min	Ajout du superplastifiant dilué dans les 25% de l'eau de gâchage restante et malaxage pendant 2 minutes.

Le temps total de malaxage est de 5 minutes.

Après avoir confirmé la fiabilité des essais à l'état frais, le béton a été coulé dans différents moules, chaque type de moule étant destiné à un essai spécifique.

- Des moules cubiques de dimensions (10.10.10) cm pour mesurer le module de déformation dynamique ainsi que la résistance à la compression
- Des cylindres de (11.5) cm en ce qui concerne les mesures de l'absorption capillaire et la porosité accessible à l'eau
- Des cylindres de (15.5) cm pour la détermination de la perméabilité à l'air
- Des prismes de (7.7.28) cm pour les tests de carbonatation accélérée et la surveillance des variations de masse des éprouvettes carbonatées.

Par la suite, les moules ont été conservés à une température constante de 20 °C pendant 24 heures. Une fois démoulées, les éprouvettes ont été maintenues sous l'eau à température ambiante jusqu'à la réalisation de l'essai.

3.4. Caractérisation des BAP à l'état frais

3.4.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8, 10)

Le test initial, destiné à contrôler la fluidité, la mobilité et l'homogénéité des BAP sans obstacle, est l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

Pour réaliser cet essai, une plaque de dimensions (900. 900) mm est placée sur une surface horizontale et stable. La plaque et le cône sont nettoyés et humidifiés, puis le cône est positionné au centre d'un cercle de 210 mm sur la plaque (figure 2.19). Le cône est rempli en une seule fois sans agitation ni compactage mécanique, et le surplus de béton est arasé. Après un repos de 30 secondes, le cône est soulevé verticalement en 1 à 3 secondes.

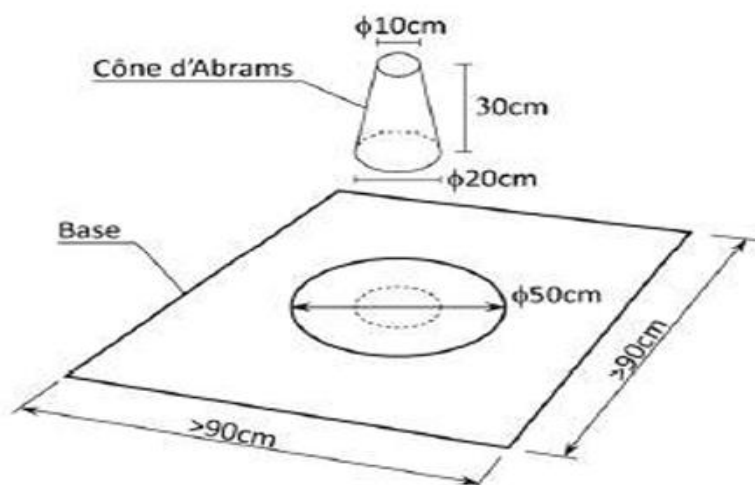


Figure 2.18. Essai d'étalement au cône d'Abrams

La mesure de l'étalement consiste à prendre la moyenne de deux diamètres perpendiculaires une fois l'écoulement du béton achevé conformément à la norme (NF EN 12350-8, 2010). Cette

valeur se situe entre 550 mm et 850 mm conformément à la norme (NF EN 206-9, 2010). Le diamètre d'étalement obtenu permet de déterminer différentes classes de BAP destinées à diverses applications :

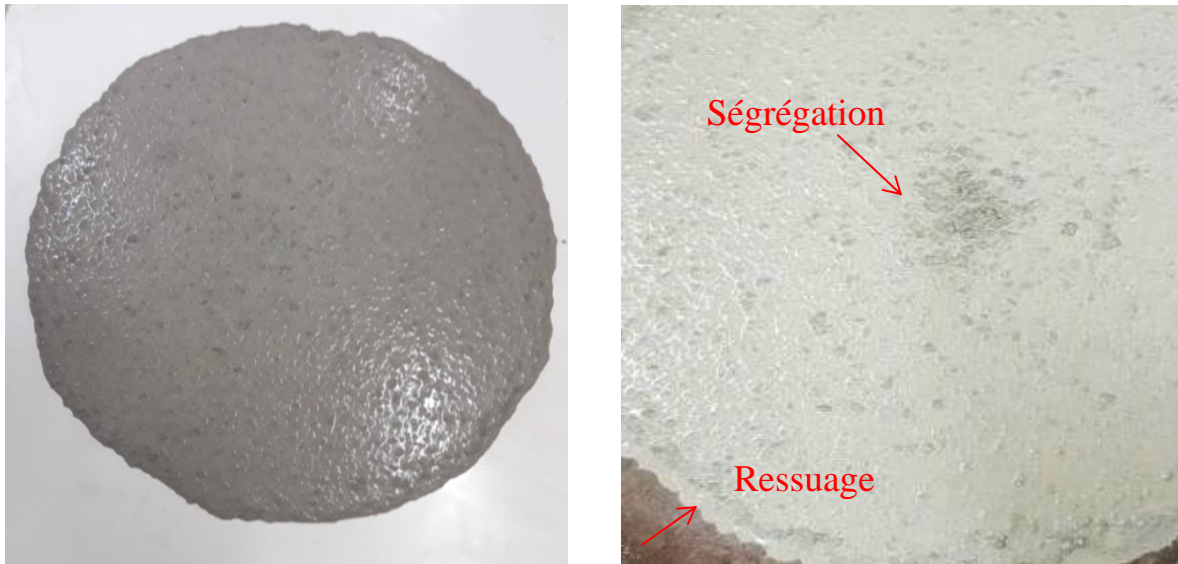
Classe SF1 : étalement compris entre 550 mm et 650 mm

Classe SF2 : étalement compris entre 660 mm et 750 mm

Classe SF3 : étalement compris entre 760 mm et 850 mm

L'évaluation visuelle de l'étalement peut révéler la ségrégation, caractérisée par un centre de galette rempli de granulats dépourvus de pâte, ou le ressuage, identifiable par une auréole de laitance de quelques millimètres en périphérie.

La figure 2.19 illustre les différentes formes de galette qui peuvent être obtenues lors de l'essai d'étalement, en fonction des propriétés des BAP et des phénomènes observés, tels que la ségrégation ou le ressuage.



(a). Étalement d'un BAP homogène et stable

(b). Étalement d'un BAP hétérogène présentant des signes de ségrégation et de ressuage

Figure 2.19. Différents étalements de BAP (LMGE, Annaba)

3.4.2. Mesure du temps d'écoulement T500 (12350-8, 10)

Le temps d'étalement (T500) correspond aux temps nécessaires pour que le béton atteigne un diamètre de 500 mm, à partir du moment où le cône est soulevé. À étalement final identique, un béton dont la pâte est plus visqueuse mettra davantage de temps à s'étaler, ce qui se traduira par une valeur plus élevée du T500. En fonction de la valeur du T500 obtenue, deux classes de BAP sont définies selon (NF EN 206-9, 2010) :

Classe VS1 : temps d'écoulement < 2 secondes

Classe VS2 : temps d'écoulement \geq 2 secondes

3.4.3. Taux de remplissage à la boîte en L (NF EN 12350-10,10)

L'essai de la boîte en L sert à mesurer la capacité d'écoulement du béton dans un environnement confiné tout en vérifiant qu'il ne rencontre pas de blocage important. Ce test est conçu pour examiner si le béton peut être mis en place sans obstructions significatives, conformément à la norme (NF EN 12350-10,10).

Pour l'essai, le dispositif comporte une boîte en L munie d'une trappe séparant les parties verticales et horizontales. Des barres d'armatures en acier, d'un diamètre de 12 mm, peuvent être insérées avant la trappe (figure 2.20). Selon la configuration choisie, l'espace libre entre les barres est de 41 mm pour trois barres et 59 mm pour deux barres. Le compartiment vertical de la boîte est rempli d'environ 13 litres de béton. Après avoir nivelé la surface du béton, celui-ci est laissé au repos pendant environ 1 minute. À l'issue de ce temps de repos, la trappe est ouverte, laissant le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte. Après cela, le taux de remplissage (PL) peut être évalué à l'aide de l'équation : $PL = \frac{H_2}{H_1}$ avec H_2 et H_1 sont les hauteurs de béton dans la partie horizontale et verticale respectivement. En fonction de la valeur de ce rapport, deux classes de BAP sont définies :

Classe PL1 \geq 0,8 : correspond au taux de remplissage avec deux barres d'armatures

Classe PL2 \geq 0,8 : correspond au taux de remplissage avec trois barres d'armatures

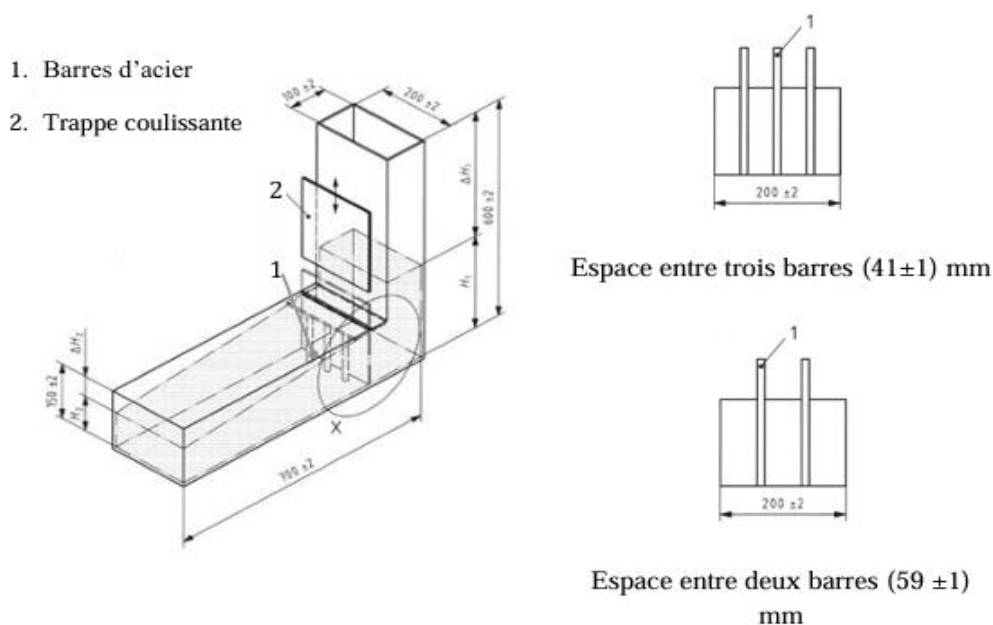


Figure 2.20. Essai de la boîte en L

3.4.4. Stabilité au tamis (NF EN 12350-11,10)

La résistance du béton autoplaçant à la ségrégation statique peut être appréciée par l'évaluation de sa stabilité au tamis. Pour réaliser l'essai, après l'arrêt du malaxage, on commence par verser 10 litres de béton frais dans un seau qu'on laisse reposer pendant 15 minutes. Une balance préalablement étalonnée est utilisée pour mesurer la masse du tamis et de son fond. Une fois le temps de repos écoulé, le béton est versé délicatement à une hauteur de 500 mm au centre du tamis, en prenant soin d'inclure l'eau de ressuage éventuelle. Après un temps de repos de 2 minutes, on mesure la masse accumulée au fond du tamis, comprenant la laitance passée à travers celui-ci, et le pourcentage de laitance (SR) est déterminé pour apprécier la stabilité (figure 2.21).

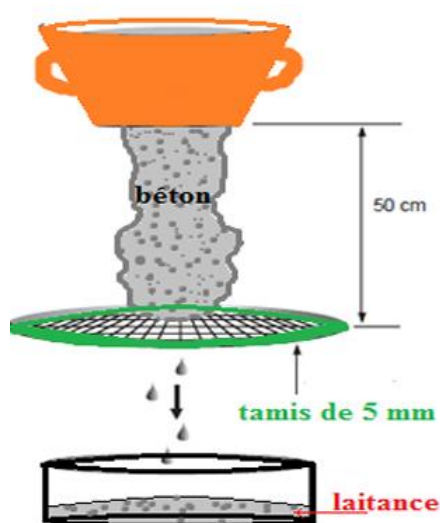


Figure 2.21. Essai de stabilité au tamis



Figure 2.22. Béton en repos pour le calcul du pourcentage de laitance traversant le tamis (LMGE, Annaba)

Et selon la norme (NF EN 206-9, 10) les valeurs de stabilité sont classées comme suit :

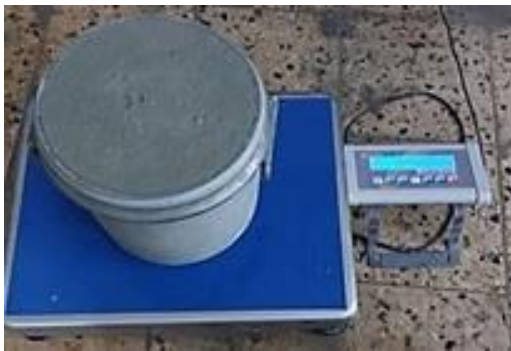
- Classe SR1 : Pourcentage de laitance $\leq 20\%$
- Classe SR2 : Pourcentage de laitance $\leq 15\%$

3.4.5. Mesure de la masse volumique (NF EN 12350-6, 12)

L'évaluation de la masse volumique du béton frais permet de comparer la masse volumique calculée à celle obtenue par expérimentation. L'essai a été réalisé conformément à la norme (NF EN 12350-6, 12), à l'aide d'un aéromètre (figure 2.23) d'une capacité de 8 litres. Pour cela, la cuve de l'aéromètre est remplie de béton frais et placée sur une balance sans vibration ni agitation. La masse volumique, exprimée en kg/m^3 , est calculée en soustrayant la masse de la cuve vide de celle de la cuve pleine, puis en divisant le résultat par le volume de béton.

3.4.6. Mesure de la teneur en air occlus (NF EN 12350-7, 12)

La mesure de la teneur en air occlus permet d'évaluer la qualité et le comportement du béton à l'état durci, car cet essai repose sur le principe de la capacité du béton à se déformer sous pression, en considérant que l'air emprisonné dans le matériau est compressible. Une teneur élevée en air occlus entraîne donc une baisse significative des performances mécaniques et de la durabilité du béton. L'essai est réalisé après la mesure de la masse volumique du béton frais. Une fois cette mesure effectuée, un couvercle équipé d'un cadran gradué est fixé sur la cuve contenant 8 litres de béton frais. Ensuite, une pression est appliquée à l'aide d'une pompe à air intégrée dans le dispositif, situé sur la partie supérieure du couvercle. Cette pression comprime l'air contenu dans le béton, entraînant ainsi une diminution du niveau d'eau. La lecture affichée sur le manomètre indique alors le pourcentage d'air emprisonné dans l'échantillon.



a. Mesure de la masse volumique du béton frais dans la cuve de l'aéromètre



b. Mesure de la teneur en air occlus « Méthode de compressibilité »

Figure 2.23. Mesure de la masse volumique du béton frais et la teneur en air occlus à l'aide de l'aéromètre (LMGE, Annaba)

3.5. Caractérisation des BAP à l'état durci

3.5.1. Essais mécaniques

3.5.1.1. Essai de compression (12390-3, 12)

La résistance à la compression a été évaluée sur des cubes de 10 cm de côté, selon les prescriptions de la norme NF EN 12390-3 (NF EN 12390-3, 2012). L'essai a été mené à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité maximale de 2000 KN (figure 2.24). Après 24 h, les éprouvettes ont été démoulées, immergées dans l'eau jusqu'aux différents âges de test, fixées à 2, 7, 28, 90 et 365 jours. La résistance mesurée pour chaque période correspond à une moyenne calculée à partir de trois résultats.



Figure 2.24. Mesure de la résistance en compression (LMGE, Annaba)

3.5.1.2. Module de la déformation dynamique (12504-4, 05)

Le module de déformation dynamique du béton a été déterminé en mesurant la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le matériau, méthode reconnue pour son caractère non destructif. L'équipement utilisé, comprenant des transducteurs électroacoustiques, permet de générer des ondes de vibration longitudinales. Ces ondes sont émises par un transducteur placé sur une face de l'échantillon, et après avoir parcouru une distance L, elles sont captées par un second transducteur qui les convertit en signal électrique.

Avant chaque série de mesure, l'appareil est soigneusement étalonné (figure 2.25) pour garantir des résultats précis et fiables.



Figure 2.25. Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (LMGE, Annaba)

Lorsque le dispositif est activé, le temps nécessaire à l'onde pour traverser l'échantillon est mesuré en microsecondes. La vitesse de propagation des ondes, appelé célérité C, peut alors être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T} \text{ (m/s)} \quad 2.1$$

Où L est la distance entre les deux transducteurs en mètres, et T représente le temps de propagation mesuré en microsecondes.

Ensuite, Une corrélation reliant la vitesse des ondes et le module d'élasticité dynamique a été mise en évidence, selon la formule suivante :

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho_{app}(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad 2.2$$

Où :

V correspond à la vitesse de propagation des ondes exprimé en (m/s)

ρ_{app} correspond à la masse volumique du béton frais exprimé (Kg/m^3)

ν désigne le coefficient de Poisson dynamique

E est le module d'élasticité dynamique exprimé en GPa

Finalement, le module d'élasticité dynamique est calculé à partir de l'expression suivante :

$$E = \rho_{app} V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad 2.3$$

Le coefficient de Poisson se situe entre 0,2 et 0,3.

3.5.2. INDICATEUR DE DURABILITÉ

3.5.2.1. Essai d'absorption d'eau par capillarité (AFPC-AFREM 1997)

L'essai d'absorption capillaire permet de quantifier, par pesée, l'eau absorbée par un béton sec et d'apprécier sa capacité de remontée capillaire, ce qui donne une indication sur sa porosité capillaire. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (11.5) cm, conservées pendant 90 jours dans l'eau à une température de 20 °C, conformément aux recommandations de l'AFPC-AFREM (AFPC-AFREM 1997).

Pour réaliser l'essai, les échantillons de béton sont séchés dans une étuve à 80 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (la différence entre deux pesées successives doit être inférieure à 0,01 %). Ensuite, la surface latérale de chaque éprouvette est recouverte d'un papier adhésif imperméable afin d'éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai. Après avoir assuré l'étanchéité latérale, les éprouvettes sont placées dans des supports séparés les unes des autres et émergées dans un bac d'eau à une hauteur de 3 mm, comme illustré sur les figures 2.26 et 2.27.

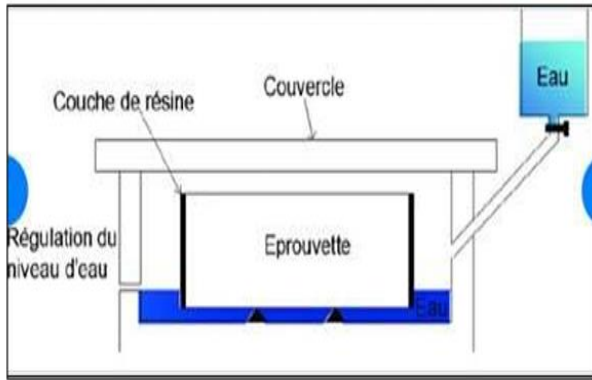


Figure 2.26. Dispositif de mesure de l'absorption d'eau par capillarité



Figure 2.27. Mesure de l'absorption d'eau par capillarité (LMGE, Annaba)

L'expérience a pour but de mesurer la quantité d'eau absorbée, évaluée par des pesées successives des échantillons à différents intervalles de temps (0 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h et 24 h). Avant de procéder à chaque pesée, on veille à ce que la surface de l'éprouvette en contact avec l'eau soit essuyée à l'aide d'une éponge humide afin d'enlever la pellicule d'eau superficielle retenue, sans pour autant assécher les pores de surface remplis d'eau. Finalement, le coefficient d'absorption capillaire est calculé selon l'équation suivante :

$$Ca_t = \frac{M_t - M_0}{A} \quad (2.4)$$

Où :

Ca_t est le coefficient d'absorption à l'échéance t en (kg/m^2)

M_t est la masse de l'éprouvette à une échéance donnée en (kg)

M_0 est la masse initiale de l'éprouvette en (kg)

A est la section de l'éprouvette au contact de l'eau en (m^2)

À partir des valeurs obtenues lors de la mesure du coefficient d'absorption, la sportivité peut être déterminée. Par définition, la sportivité (S) représente la cinétique avec laquelle le béton absorbe l'eau par capillarité, et elle peut être déterminée à partir de l'équation 2.5.

$$S = \frac{Ca_8 - Ca_1}{\sqrt{8} - \sqrt{1}} \quad (2.5)$$

Ca_8 est le coefficient d'absorption près 8 heures en (kg/m^2)

Ca_1 est le coefficient d'absorption près 1 heure en (kg/m^2)

3.5.2.2. Mesure de la porosité accessible à l'eau (AFPC-AFREM 1997)

L'évaluation de la porosité accessible à l'eau se fait en mesurant la proportion du volume des pores ouverts par rapport au volume total de l'échantillon. Cette porosité est exprimée en pourcentage du volume total apparent du matériau.

Pour réaliser cet essai, des éprouvettes cylindriques en béton, mesurant (11.5) cm, ont été soumises à un processus en deux étapes après une période de cure humide de 90 jours à une température de 20 °C. Dans un premier temps, les éprouvettes ont été placées dans un dessiccateur à vide (figure 2.29), où une pression de 25 mbar a été appliquée pendant 4 heures afin d'éliminer l'air contenu dans les pores. Par la suite, de l'eau a été introduite dans le dessiccateur sous vide pour immerger les éprouvettes, et cette immersion a été maintenue pendant 20 heures ± 1 h.

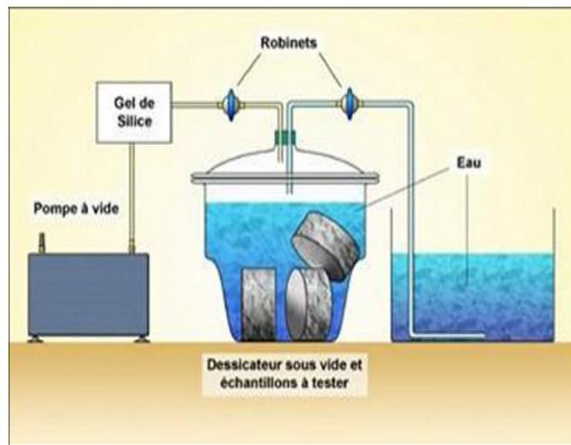


Figure 2.28 : Dispositif de mesure de la porosité accessible à l'eau

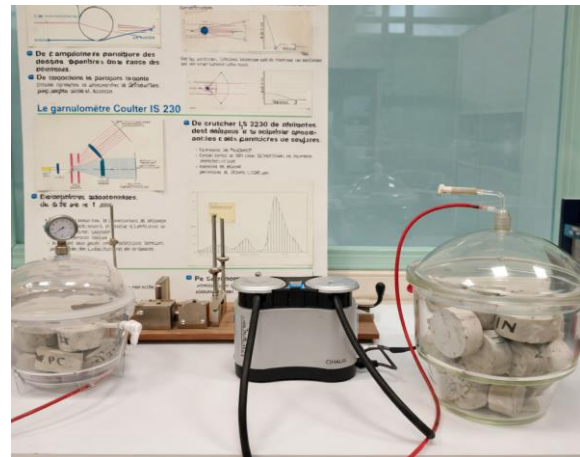


Figure 2.29 : Mesure de la porosité accessible à l'eau (IMT Nord-Europe, Lille)

Une fois ce processus terminé, les éprouvettes ont été pesées sous différentes conditions pour mesurer la porosité. Trois pesées distinctes sont effectuées :

- Une pesée de l'échantillon immergé pour obtenir sa masse sous l'eau M_{eau}
- Une pesée de l'échantillon imbibé à l'air pour obtenir sa masse hors de l'eau M_{air}
- Et enfin, une pesée après séchage dans une étuve à $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ jusqu'à ce que la masse devienne constante, pour obtenir la masse sèche de l'échantillon.

La porosité accessible à l'eau notée ε , est ensuite calculée en fonction de ces trois pesées, à l'aide de l'équation 2.6 :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (2.6)$$

Cette procédure permet ainsi d'évaluer la quantité de pores ouverts présents dans le béton en termes de pourcentage de son volume apparent.

3.5.2.3. Essai de perméabilité à l'air

La perméabilité du béton se réfère à sa capacité à être traversé par un fluide, qu'il s'agisse d'un gaz ou d'un liquide. Elle constitue un indicateur majeur de la durabilité des bétons. Conformément à la norme XP P 18-463 (11), des éprouvettes cylindriques de 15×5 cm ont été utilisées pour réaliser l'essai de perméabilité après une cure humide de 90 jours à 20 °C.

Pour cet essai, les échantillons ont été séchés à 80 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante, c'est-à-dire lorsque la différence entre deux pesées successives ne dépasse pas 0,05 %. Une fois séché, l'échantillon de béton est placé dans une chambre à air, avec une étanchéité latérale assurée à l'aide d'un film d'aluminium adhésif. La chambre à air a été ensuite pressurisée à un minimum de 8 bars (0,8 MPa) pour l'essai. Afin de garantir une mesure précise du débit, les tubes du débitmètre ont été humidifiés avec une solution savonneuse.

La pression d'essai appliquée a été soigneusement contrôlée et réglée à 2, 3, 4 et 5 bar. La figure 2,30 illustre la manipulation de l'essai au laboratoire.

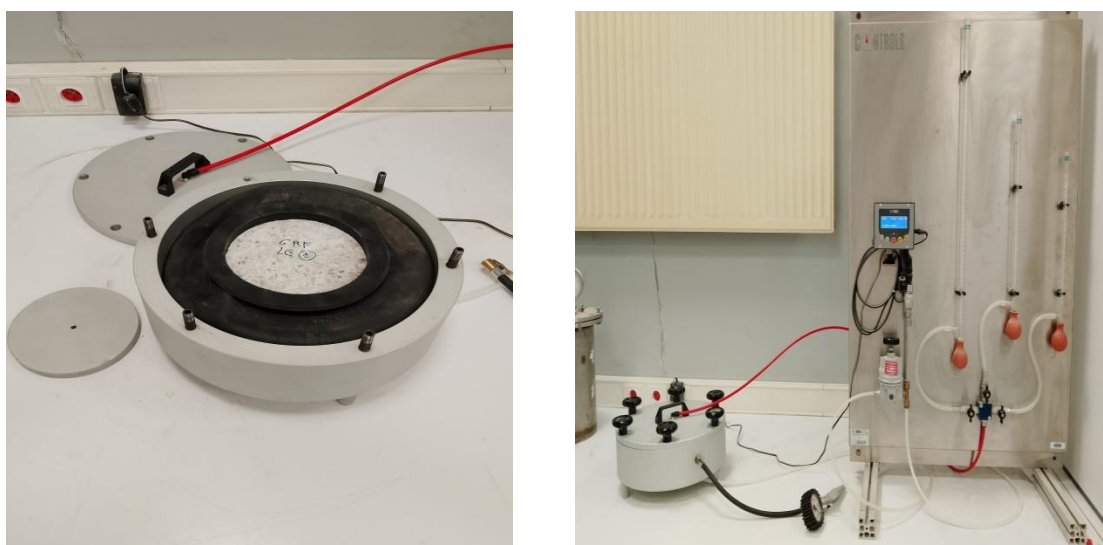


Figure 2.30 : Essai de la perméabilité à l'air (IMT Nord-Europe)

En se basant sur la loi de poiseuille, la perméabilité K_a a été calculée à partir de l'équation 2.7 :

$$K_a = \frac{Q \cdot P_{atm} \cdot L}{A \cdot (P_1 - P_{atm}) \cdot \mu} \quad (2.7)$$

Où :

Q est le débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (Pa)

P_{atm} est la pression atmosphérique (Pa)

L est l'épaisseur de l'éprouvette de béton (m)

A est la section de l'éprouvette (m^2)

P_1 présente la pression appliquée

μ est la viscosité de l'air ($1,8 \cdot 10^{-5}$ Pa.s, à 20 °C)

Enfin, les valeurs de la perméabilité sont présentées en graphique selon l'inverse de la pression moyenne d'essai ($1/P_m$). La perméabilité intrinsèque a été déterminée selon l'équation 2.8, proposée par Klinkenberg (Klinkenberg, 1941), qui est utilisée pour corriger les mesures de perméabilité, car elle prend en compte l'effet de glissement du gaz le long des parois des pores

du matériau, qui devient significatif à basse pression. Le modèle empirique de Klinkenberg est présenté sur la figure 2.31.

$$K_a = K_{int} \left[1 + \frac{\beta}{P_m} \right] \quad (2.8)$$

Où :

K_{int} est la perméabilité intrinsèque du milieu (m^2)

P_m est la pression moyenne d'essai, avec : $P_m = \frac{P_1 + P_{atm}}{2}$ (Pa)

β , le coefficient de Klinkenberg, est défini comme le rapport entre la pente des courbes ($K_{Mesuré}$) en fonction de l'inverse de la pression moyenne et leur ordonnée initiale (K_{int}).

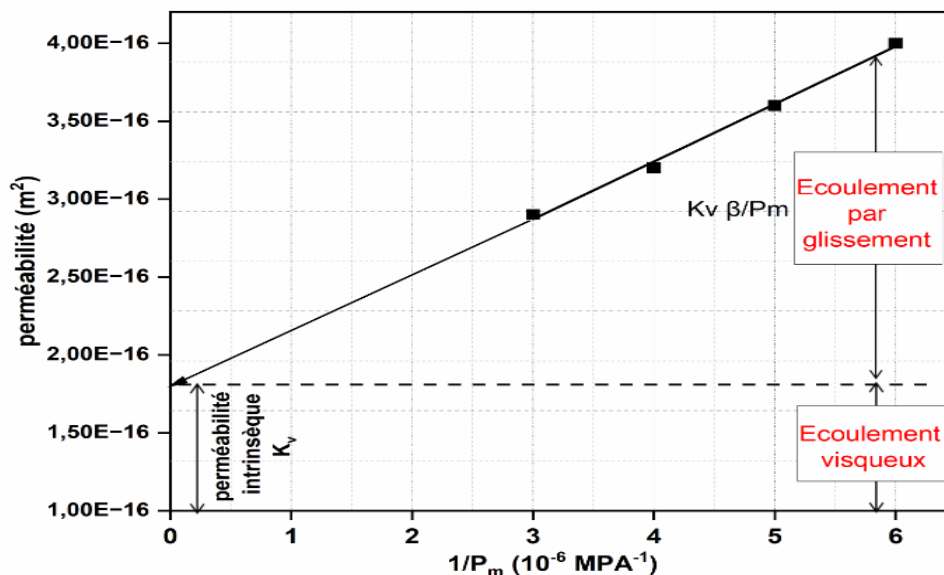


Figure 2.31. Détermination de la perméabilité intrinsèque en fonction de l'inverse de la pression moyenne, selon le modèle empirique de Klinkenberg

3.5.2.4. Essai de carbonatation accélérée (NF EN 12390-12, 2020)

La carbonatation est un phénomène bénéfique pour les bétons non armés, cependant, elle est reconnue comme une cause de détérioration des structures en béton armé. La détermination de la résistance à la carbonatation accélérée a été étudiée et réalisée selon le protocole décrit par la norme NF EN 12390-12, 2020 (NF EN 12390-12, 2020). Pour ce faire, l'essai s'est déroulé au sein d'une enceinte où l'humidité relative est réglée à $(57 \pm 3) \%$, la teneur en CO_2 à $(3 \pm 0,05) \%$ et la température à $(20 \pm 2) ^\circ C$.

Des cubes de BAP mesurant $(7.7.28)$ cm ont été coulés puis immergés dans l'eau pour une cure de 90 jours. Les échantillons utilisés pour l'évaluation de la profondeur de carbonatation ont été transformés en cubes de $(7.7.7)$ cm et séchés à l'air libre dans des conditions environnementales de laboratoire (entre $18 ^\circ C$ et $25 ^\circ C$ et entre 50% et 60% d'humidité relative)

pendant 14 jours. Après le séchage, les cubes de béton ont été imperméabilisés avec des feuilles d'aluminium adhésives, seulement une face tournée vers le cœur de l'éprouvette est laissée libre, comme montré dans la figure 2.32.



Figure 2.32. Eprouvettes destinées pour la détermination de la profondeur de la carbonatation (IMT Nord-Europe)

Après imperméabilisation, les éprouvettes sont placées dans l'enceinte de carbonatation et doivent être positionnées de manière à permettre à l'air de circuler librement autour des faces devant être soumises au mesurage de la carbonatation (figure 2.33), jusqu'aux échéances de mesures programmées à (7, 28, 70 et 365 jours). À chaque échéance, chaque cube est divisé en deux parallèlement à la face talochée, puis la pulvérisation de phénolphthaléine sur la surface coupée permet de déterminer la profondeur de carbonatation.



- a. Visualisation de la profondeur de carbonatation par pulvérisation de phénolphthaléine sur des coupes d'éprouvettes
- b. Vérification de la zone carbonatée avec un pied à coulisse

Figure 2.33. Mesure de la profondeur de carbonatation des éprouvettes

4. SYNTHÈSE

Ce deuxième chapitre décrit de manière approfondie les matériaux employés, les protocoles expérimentaux mis en œuvre ainsi que les méthodes de caractérisation adoptées dans le cadre de cette étude.

La première section a permis de décrire les matériaux constitutifs des bétons autoplaçants (BAP), tels que les granulats naturels et recyclés, ainsi que les additions minérales (FC, LG et PV). Ces composants ont été analysés en termes de propriétés physiques et chimiques, afin de mieux comprendre leur impact sur les performances des BAP.

Dans la seconde section, les protocoles expérimentaux ont été exposés, en mettant l'accent sur la préparation et le traitement des granulats recyclés, en particulier le processus de carbonatation naturelle. Par ailleurs, des analyses microstructurales, comme les observations au MEB, et l'analyse thermogravimétrique ont été présentées. Grâce à ces analyses, il a été possible d'étudier les transformations microstructurales des granulats recyclés, en mettant l'accent sur l'effet de la carbonatation, ainsi que de caractériser la morphologie des additions minérales utilisées.

Les différentes méthodes de caractérisation ont ensuite été décrites pour évaluer les propriétés à l'état frais et durci. Les essais réalisés incluent notamment les mesures de fluidité, de résistance mécanique, ainsi que les indicateurs de durabilité.

Ces éléments posent les bases expérimentales nécessaires à la suite de ce travail de recherche, qui consistera à analyser et à comparer les performances des différents BAP d'étude.

CHAPITRE II

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

AFPC-AFREM (1997). Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM (Durabilité des bétons), Toulouse.

ALI-BOUCETTA, T. (2014) Contribution du Laitier Granulé et de la Poudre de Verre sur les Propriétés D'écoulement et de durabilité des Bétons Autoplaçant Et de Haute Performances. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

ASTM C1202-2, (2012). Standard test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to resist chloride Ion Penetration

B

BELLARA, S. HIDJEB, M. MAERZI, W. MEZAZIGH, S. SENOUCI, A. (2021) Optimization of an Eco-Friendly Hydraulic Road Binders Comprising Clayey Dam Sediments and Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Buildings MDPI.

C

CONDREN, E. PAVIA, S. (2007) A comparative study of the moisture transfer properties and durability of PC and GGBS mortars, International conference Platform. M I Russel and P A M Basheer Eds. Queen's University, Belfast. p 469-478.

D

DUAN, Z., ZHAO, W., YE, T., ZHANG, Y., & ZHANG, C. (2022). Measurement of Water Absorption of Recycled Aggregate. Materials, 15(15), 5141. <https://doi.org/10.3390/ma15155141>

I

IDIR, R. (2009). Mécanismes d'Actions des Fines et des Granulats de Verre sur la Réaction Alkali-Silice et la réaction Pouzzolanique, Thèse de Doctorat en Cotutelle, Université de Sherbrooke de Canada et l'université INSA de Toulouse.

J

JAAFAR, W. (2003). Influence de la carbonatation sur la porosité et la perméabilité des bétons, rapport de stage, DEA Geomatériaux, Laboratoire Centrale des ponts et chaussés, Paris, France.

K

KLINKEBERG, L. G. (1941). The permeability of porous media to liquids and gases, API Drilling and production practices, p200-213.

L

LIANG, K., HOU, Y., SUN, J., LI, X., BAI, J., TIAN, W., & LIU, Y. (2021). Theoretical analysis of water absorption kinetics of recycled aggregates immersed in water. Construction and Building Materials, 302, 124156. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124156>

M

MEFTAH, H. (2018). Contribution à étude du Comportement à Haute Température des Bétons de Granulats Recyclés, Renforcés de Fibres de Polypropylène. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

N

NA 442 (2013) : Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

NF EN 1076-1. Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie-1: Méthode pour la détermination de la résistance à l'usure (micro Deval).

NF EN 1076-6 (2022). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: determination of particle density and water absorption

NF EN 1097-2. Essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie-2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles).

NF EN 12350-10, (2010). Essai pour bétons frais-Partie 8: béton autoplaçant- essai à la boîte en L.

NF EN 12350-11, (2010). Essai pour bétons frais-Partie 8: béton autoplaçant- essai de stabilité au tamis

NF EN 12350-6, (2012). Essai pour béton frais, Mesure de la masse volumique

NF EN 12350-7, (2012). Essai pour béton frais, Teneur en air occlus. Methode de compressibility.

NF EN 12350-8, (2010). Essai pour bétons frais-Partie 8: béton autoplaçant- essai d'étalement au cône d'Abrams

NF EN 12390-12. (2020). Essai pour béton durci, partie-12: Détermination de la résistance à la carbonatation du béton, Méthode de la carbonatation accélérée

NF EN 12390-19, (2023). Essai pour béton durci, partie-19: Détermination de la résistivité électrique

NF EN 12390-3, (2012). Essai pour béton durci- Partie 3: Résistance à la compression

NF EN 12504-4, (2005). Essai pour bétons dans les structures, Partie-4: Détermination de la Vitesse de propagation du son.

NF EN 14146, (2004). Méthode d'essai pour pierres naturelles. Détermination du module d'élasticité dynamique (par la mesure de la fréquence de résonance)

NF EN 206-9, (2010). Bétons- Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.

NF EN 933-9. (2013). Essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- partie 9 : Evaluation de la teneur en particules fines- Essai au bleu de méthylène.

NF ISO 13320, (2020). Analyse Granulométrique- Méthode par Diffraction Laser- Partie 1

NF P 18-554, NF P 18-555. (2008). Détermination des masses volumiques apparentes et absolues des granulats.

NF P 18-598. (1991). Granulats- Essai de propreté des sables.

X

XP P 18-463, (2011). Essai pour béton durci : perméabilité aux gaz.

XP P 18-540, (1997). Granulats – Détermination du module de finesse.

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES FORMULATIONS DES BAP À BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES FORMULATIONS DES BAP À BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS

Autrefois, la fabrication des bétons et des bétons autoplaçants reposait uniquement sur l'utilisation de granulats naturels. Cependant, l'exploitation excessive des ressources naturelles et la déconstruction programmée ou accidentelle de bâtiments en béton ont éveillées les intervenants dans le domaine du génie civil sur la faisabilité de convertir les déchets de béton de démolition en granulats recyclés et de les intégrer dans différents types de bétons comme substitut partiel ou total, encouragé par une situation mondiale encourageant les actions qui s'inscrivent dans le contexte de recyclage des déchets et de développement durable

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de l'évaluation de l'impact de l'utilisation des gravillons recyclés à l'état brut (frais) en remplacement partiel et total des granulats naturels sur le comportement frais et durci des BAP.

De plus, ce chapitre est consacré à l'étude comparative des effets des additions minérales, qu'elles soient inertes (filler calcaire) ou réactives (poudre de verre à bouteilles et laitier granulé) sur les propriétés des BAP

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	97
2. MÉTHODES DE FORMULATION UTILISÉES	97
2.1 Approche de formulation	97
2.2 Ajustement apporté au niveau des BAP contenant 100% GBR-F	98
3. TESTS EFFECTUÉS ET DEROULEMENTS CHRONOLOGIQUES DES ESSAIS.99	
3.1 Essais effectués à l'état frais et leur déroulement chronologique.....	99
3.2 Essais effectués à l'état durci	100
4. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS	100
4.1 Étalement au cône d'Abrams et temps d'écoulement (T500)	100
4.2 Taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX)	104
4.3 Stabilité au tamis.....	106
4.4 Masse volumique du béton frais et teneur en air occlus	108

5. RESULTATS OBTENUS À L'ETAT DURCI	111
5.1 <i>Résistance en compression</i>	111
5.2 <i>Absorpyion d'eau par capillarité.....</i>	113
6. SYNTHÈSE.....	115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	117

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES FORMULATIONS DES BAP A BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS

1. INTRODUCTION

Les granulats de béton recyclé (GBR) ont une porosité accrue et une capacité élevée à absorber l'eau, ce qui risque de limiter leur utilisation dans les bétons, en particulier dans les bétons autoplaçants (BAP), qui sont assez exigeants en termes de fluidité. Pour évaluer cet effet, cette étude suggère d'abord d'analyser l'effet du remplacement partiel et total des granulats naturels (GN) par les granulats recyclés frais (GBR-F), n'ayant subi aucun traitement spécifique, avec plusieurs taux de substitution (0 %, 25%, 50%, 75% et 100 %).

De plus, l'influence de changer le filler calcaire (FC), considéré comme l'addition minérale de référence dans les BAP, par du laitier granulé (LG) et de la poudre de verre (PV), est également examinée.

Le but essentiel de cette étape : quel serait le taux optimal d'intégration des GBR-F dans les BAP sans altérer de façon importante leur fluidité et leur résistance mécanique ?

2. MÉTHODE DE FORMULATION UTILISÉE

Au cours de cette première démarche, dix-huit variantes de BAP ont été conçues, en utilisant trois formulations de référence contenant 100% de gravillons naturels et en utilisant les trois additions (FC, LG et PV) en ajout et non pas en remplacement du ciment.

Les critères d'acceptabilité des BAP (avec granulats naturels et recyclés), ont été établis comme suit :

- Étalement au cône d'Abrams : $SF \geq 65$ cm ;
- Le taux de remplissage de la boîte en L : $PL \geq 0,8$;
- Une stabilité au tamis : $SR1 \leq 20\%$ ou $SR2 \leq 15\%$;
- La classe de résistance choisie du béton est la C30/37 MPa, correspondante à un béton de structure.

2.1. Approche de formulation

La méthode japonaise est utilisée pour déterminer les proportions des constituants, avec des ajustements effectués après la réalisation des essais empiriques en laboratoire pour satisfaire les critères d'autoplaçance préalablement définis en tenant compte des préconisations de l'AFGC (AFGC, 2008) :

- Le dosage en ciment a été maintenu fixe pour toutes les compositions, et est égal à 350 Kg/m³

En utilisant les valeurs recommandées par l'approche japonaise, les quantités d'additions minérales ont été ajustées selon la satisfaction des conditions de fluidité, en particulier lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Dont le but était d'obtenir une galette homogène, sans ségrégation ni ressuage et de même fluidité avec les trois additions. Le dosage du (FC) et de la (PV) s'élève à 180 kg/m³, et celui du (LG) à 150 kg/m³.

- Le squelette granulaire a été optimisé selon la méthode japonaise. Cependant, les pourcentages des deux sables utilisés ont été tirés à partir de la méthode d'Abrams, dont les pourcentages sont égaux à 62,9 % pour le sable siliceux et 37,1 % pour le sable de carrière, et le rapport granulats sur sable (G/S) a été maintenu constant à une valeur de 0,92. En s'appuyant sur les travaux de Kebaili et al. (2015), la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés a été effectuée sur la base du volume et non de la masse.
- L'ajustement du dosage en eau et en superplastifiant a été réalisé selon une approche empirique en se référant aux valeurs de base recommandées par la méthode japonaise. La quantité d'eau a été maintenue fixe et égale à 189 l/m³ pour toutes les compositions de BAP. Cependant, les formulations contenant 100% de GBR-F ont demandé une quantité supplémentaire d'eau, en raison de la forte absorption d'eau de ces granulats par rapport aux GN. Quant au superplastifiant, son dosage a été maintenu fixe pour toutes les compositions et égal à 1,1 % par rapport au poids du liant.

2.2. Ajustement apporté au niveau des BAP contenant 100% GBR-F

L'approche adoptée dans cette étude consiste à rajouter à la quantité d'eau d'apport, durant le malaxage, l'équivalent de la quantité d'eau absorbée par les GBR-F pendant 20 minutes (test réalisé préalablement). Car, au-delà de 20 minutes, le taux d'absorption reste faible et tend à se stabiliser (la cinétique d'absorption a été présentée en détail dans le deuxième chapitre, section 2.3.3).

Le calcul de cet ajustement a été effectué comme suit :

$$189 + 189(4,38\%) = 196 \text{ l/m}^2$$

189 = Quantité d'eau d'apport

4,4% = Quantité d'eau qui est absorbée pendant 20 minutes d'immersion des granulats dans l'eau

Le tableau 3.1 récapitule les proportions de chaque constituant de toutes les séries de BAP étudiées.

Tableau 3.1. Proportions des mélanges de BAP utilisées

Groupe	BAP	Ciment	Addition	Eau	SP	S1	S2	GN	GBR	E/L
Kg/m ³										
BAP FC	BAP 0	350	180	189	5,83	525,5	310	784,4	-	0,36
	BAP 25	350	180	189	5,83	525,5	310	588,3	177,8	0,36
	BAP 50	350	180	189	5,83	525,5	310	392,2	355,8	0,36
	BAP 75	350	180	189	5,83	525,5	310	196,1	533,7	0,36
	BAP 100	350	180	189	5,83	525,5	310	-	711,6	0,36
	BAP 100C	350	180	196	5,83	525,5	310	-	711,6	0,37
BAP LG	BAP 0	350	150	189	5,50	525,5	310	784,4	-	0,38
	BAP 25	350	150	189	5,50	525,5	310	588,3	177,8	0,38
	BAP 50	350	150	189	5,50	525,5	310	392,2	355,8	0,38
	BAP 75	350	150	189	5,50	525,5	310	196,1	533,7	0,38
	BAP 100	350	150	189	5,50	525,5	310	-	711,6	0,38
	BAP 100C	350	150	196	5,50	525,5	310	-	711,6	0,39
BAP PV	BAP 0	350	180	189	5,72	525,5	310	784,4	-	0,36
	BAP 25	350	180	189	5,72	525,5	310	588,3	177,8	0,36
	BAP 50	350	180	189	5,72	525,5	310	392,2	355,8	0,36
	BAP 75	350	180	189	5,72	525,5	310	196,1	533,7	0,36
	BAP 100	350	180	189	5,72	525,5	310	-	711,6	0,36
	BAP 100C	350	180	196	5,72	525,5	310	-	711,6	0,37

C : BAP corrigé par ajustement du dosage de l'eau d'apport

3. Tests effectués et déroulements chronologiques des essais

3.1. Essais effectués à l'état frais et leur déroulement chronologique

À la différence des bétons conventionnels vibrés, le béton autoplaçant (BAP) doit répondre au minimum à trois critères spécifiques pour être considéré comme apte à l'autoplaçance. Cette étude a portée sur ces trois essais fondamentaux pour évaluer l'effet de remplacer partiellement ou totalement les granulats naturels (GN) par des granulats recyclés frais (GBR-F), à savoir :

- L'essai d'étalement au cône d'Abrams, associé à la mesure du temps d'écoulement T500 (NF EN 12350-8, 10) ;
- L'évaluation du taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX) (NF EN 12350-10, 10) ;
- La mesure de la résistance à la ségrégation est évaluée à travers l'essai de la stabilité au tamis (NF EN 12350-11, 10).

En complément de ces trois essais de base, on a également effectué des mesures de masse volumique et de teneur en air occlus en utilisant l'aéromètre à béton. Tous les essais ont été exécutés en respectant le plan chronologique présenté dans la figure 3.1.

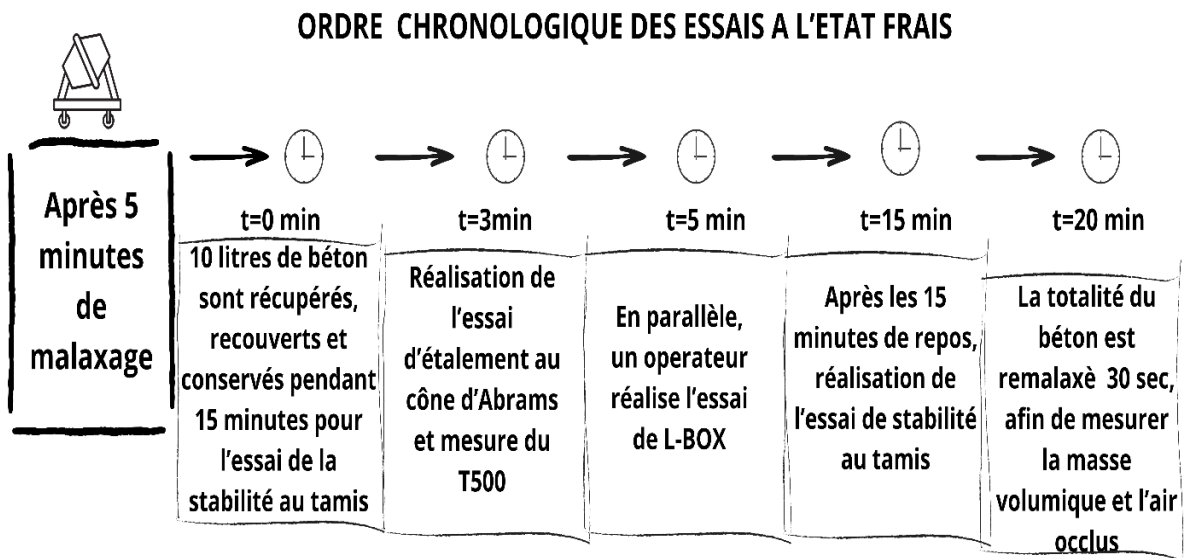


Figure 3.1. Séquence expérimentale de la réalisation des essais de caractérisation à l'état frais

3.2. Essais effectués à l'état durci

Cette première partie du travail est une étape d'initiation pour déterminer à quel taux les granulats recyclés frais (GBR-F) peuvent être intégrés dans les BAP, et pour optimiser les formulations pour introduire ensuite les gravillons recyclés carbonatés (GBR-C).

C'est dans cette perspective que nous nous sommes limités à deux essais à l'état durci : l'évaluation de la résistance à la compression et de l'absorption d'eau par capillarité.

4. RESULTATS OBTENUS A L'ETAT FRAIS

4.1. Étalement au cône d'Abrams et temps d'écoulement (T500)

La figure 3.2 présente la variation de l'étalement et du temps d'écoulement T500 selon le pourcentage de remplacement des GN par les GBR-F et la nature des additions minérales introduites. Tous les mélanges de BAP présentent des valeurs d'étalement comprises dans les plages spécifiées pour les BAP, soit entre 550 et 850 mm conformément à la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010).

Mis à part les mélanges constitués exclusivement de GBR-F sec, l'ensemble des valeurs de T500 reste supérieur à 2 secondes.

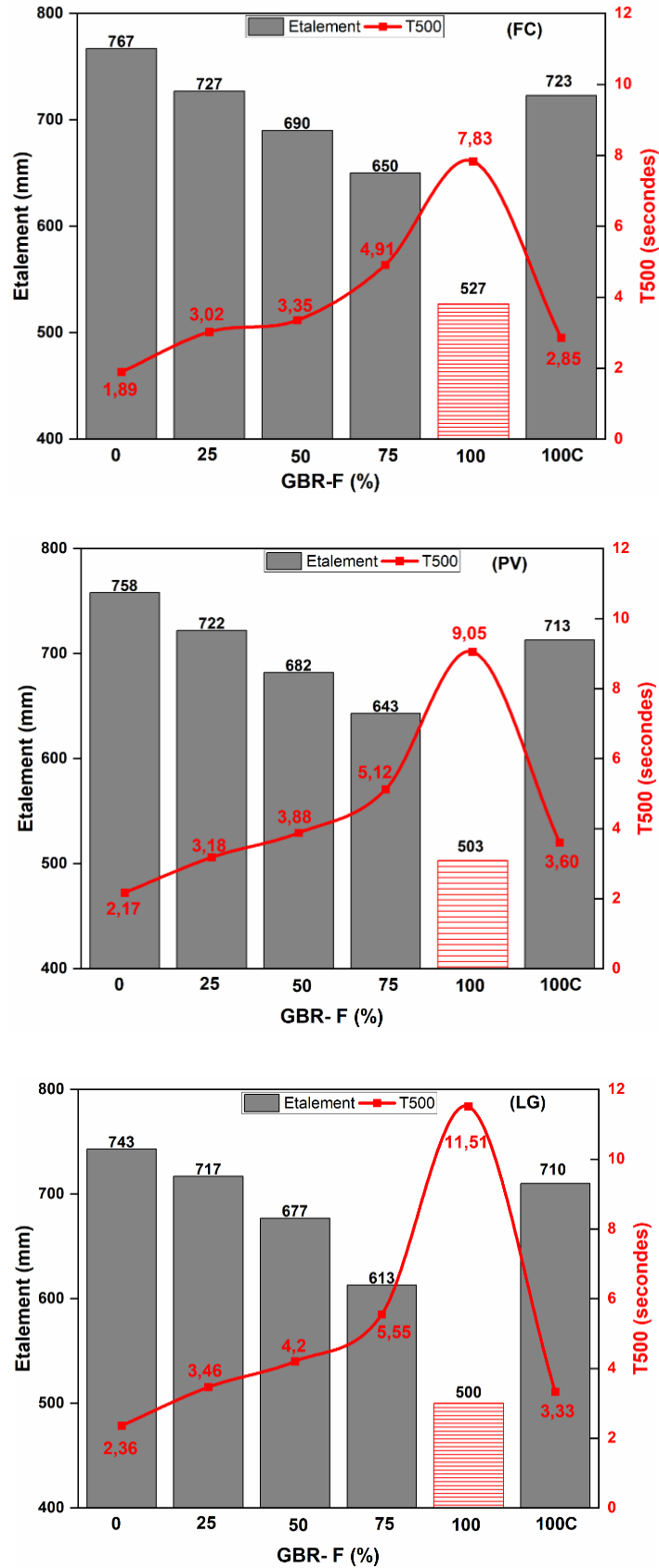


Figure 3.2. Effet du remplacement partiel et total des GN par des GBR frais sur l'étalement et le T500 des BAP

Lorsque la proportion de GBR-F augmente, l'étalement des BAP diminue progressivement, quel que soit le type d'addition minérale utilisé, jusqu'à atteindre un niveau critique de fluidité (étalement inférieur à 550 mm). En réalité, lorsque les GBR présentent une teneur en humidité nulle, leur forte capacité d'absorption d'eau entraîne une utilisation plus importante de l'eau de gâchage, ce qui réduit progressivement la maniabilité et la fluidité des mélanges. Cette diminution est proportionnelle au taux de substitution des GN par les GBR frais (Figure 3.3.).

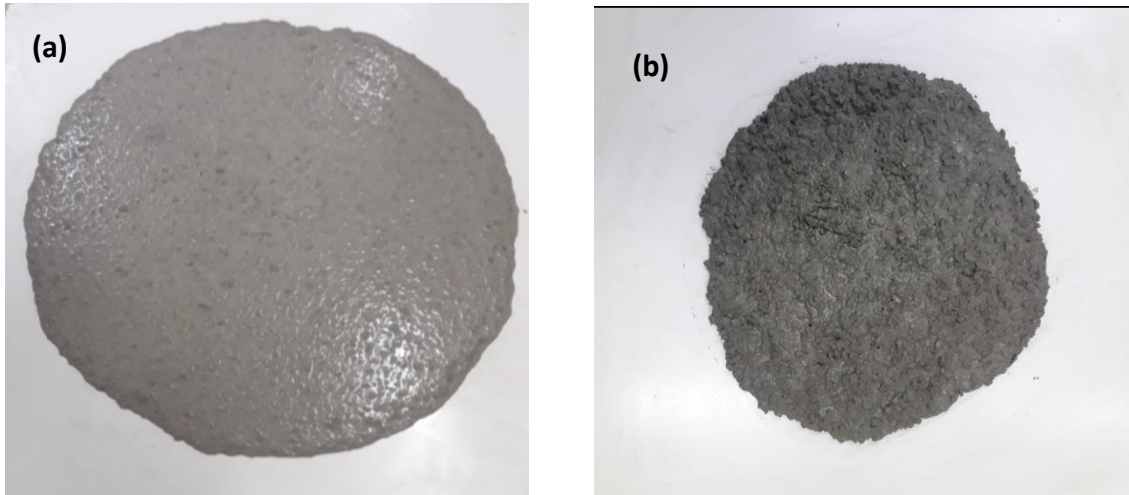


Figure 3.3. Influence du remplacement des GN par des GBR-F
(a). BAP contenant 100% GN, (b). BAP contenant 100% GBR-F

L'augmentation du rapport E/C par ajustement du dosage en eau de gâchage pour les mélanges avec 100 % de GBR-F a permis d'améliorer la fluidité des BAP. L'ajout d'environ 4,4 % d'eau a augmenté l'ouvrabilité des BAP de 37 %, 41% et 42 % respectivement pour les mélanges de FC, PV et LG. La fluidité des bétons contenant des GBR-F est étroitement influencée par la forme, l'état d'humidité et la proportion de remplacement des GBR-F (Poon et al., 2004).

De Andrade Salgado et de Andrade Silva (De Andrade Salgado et de Andrade Silva, 2022) ont rapporté l'existence de deux propriétés contradictoires liées à la forme des gros granulats : la forme arrondie, qui facilite l'écoulement mais réduit l'adhérence, et la forme angulaire, qui réduit l'écoulement mais améliore l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire.

Nos résultats sont cohérents avec plusieurs travaux, notamment, celui de Sun et al. (Sun et al., 2022) qui ont révélé qu'un état de saturation en surface sèche (SSS) des granulats recyclés entraîne une augmentation significative de l'affaissement.

De même, Zhang et al. (Zhang et al., 2022) ont conclu que l'affaissement des mélanges à base de GBR-F augmentait avec le degré de saturation du GBR pour un dosage en eau fixe. Ces constats confirment que l'ajustement du dosage en eau est une stratégie efficace pour compenser les effets négatifs des GBR sur la maniabilité des bétons.

Comme indiqué dans la figure 3.2, les valeurs d'étalement du BAP incorporant du filler calcaire (BAP-FC) se rapprochent de celles obtenues avec le BAP-PV, mais sont supérieures à celles du BAP-LG. Cette diminution de la fluidité est principalement liée à la différence des demandes en eau des additions. En effet, le LG est caractérisé par une demande en eau plus grande que celle du FC et de la PV.

Le temps d'étalement T_{500} est défini comme étant le temps nécessaire pour atteindre un diamètre d'étalement du BAP de 500 mm à partir du moment où le cône d'Abrams est soulevé. Cette valeur peut être reliée à la viscosité du béton. Le T_{500} de tous les mélanges est indiqué sur la figure 3.2 en rouge. Il en ressort que les T_{500} de tous les mélanges à base de GBR sont supérieurs à 2 secondes (deuxième classe selon la NF EN 206-9, 2010).

L'accroissement de la part des GBR dans le mélange se traduit par une augmentation du temps d'étalement, proportionnelle au pourcentage de substitution. Avec un taux de substitution total des GN par des GBR-F secs, les temps d'étalement enregistrés sont de l'ordre de 7,83 – 9,05 et 11,51 secondes respectivement pour les mélanges avec filler de calcaire, poudre de verre et laitier granulé.

Néanmoins, comme il a été évoqué précédemment dans le cas de l'étalement, la correction du dosage en eau pour tenir compte de l'absorption des GBR a réduit considérablement le T_{500} des BAP corrigés de 64 %, 60 % et 71 % respectivement pour BAP FC, le BAP PV et le BAP LG. Martínez-García et al. (2020) rapportent également des résultats similaires.

La forme angulaire et allongée peut également réduire la mobilité des GBR, ce qui entraîne l'augmentation du T_{500} selon (Kebaïli et al., 2015). Le BAP à 100 % de GBR sec est caractérisé par des valeurs de T_{500} les plus lentes en raison de l'excès de matières fines dans les GBR provoquant une demande en eau importante selon (Santos et al., 2019).

L'utilisation du laitier granulé réduit la mobilité des BAP, ce qui se traduit par des temps d'étalement plus longs. On estime l'augmentation des T_{500} suite au remplacement du FC par le LG entre 13 et 47 % pour l'ensemble des taux de substitution des GBR.

En remplaçant le filler calcaire par de la poudre de verre, on observe une augmentation des T_{500} , mais dans une moindre mesure, avec une variation comprise entre 4 et 16% ce qui est rapporté par Benjeddou et al. (Benjeddou et al., 2021) qui ont établi une relation entre le temps d'écoulement des coulis à base de filler calcaire et la finesse Blaine.

Une finesse plus élevée entraîne une augmentation du nombre de particules, réduisant les distances intergranulaires et augmentant ainsi les frottements internes, ce qui réduit l'écoulement. Le laitier granulé possède une finesse plus élevée que celle du FC et de la PV et génère davantage de frottements et donc des T_{500} plus élevés.

4.2. Taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX)

L'indice de capacité de passage (PL) caractérise la mobilité du BAP en milieu confiné en présence d'obstacles constitués, dans notre cas, de trois barres d'armature. La figure 3.4 montre les résultats de l'essai à la boîte en L conformément à la norme NF EN 12350-10 (NF EN 12350-10).

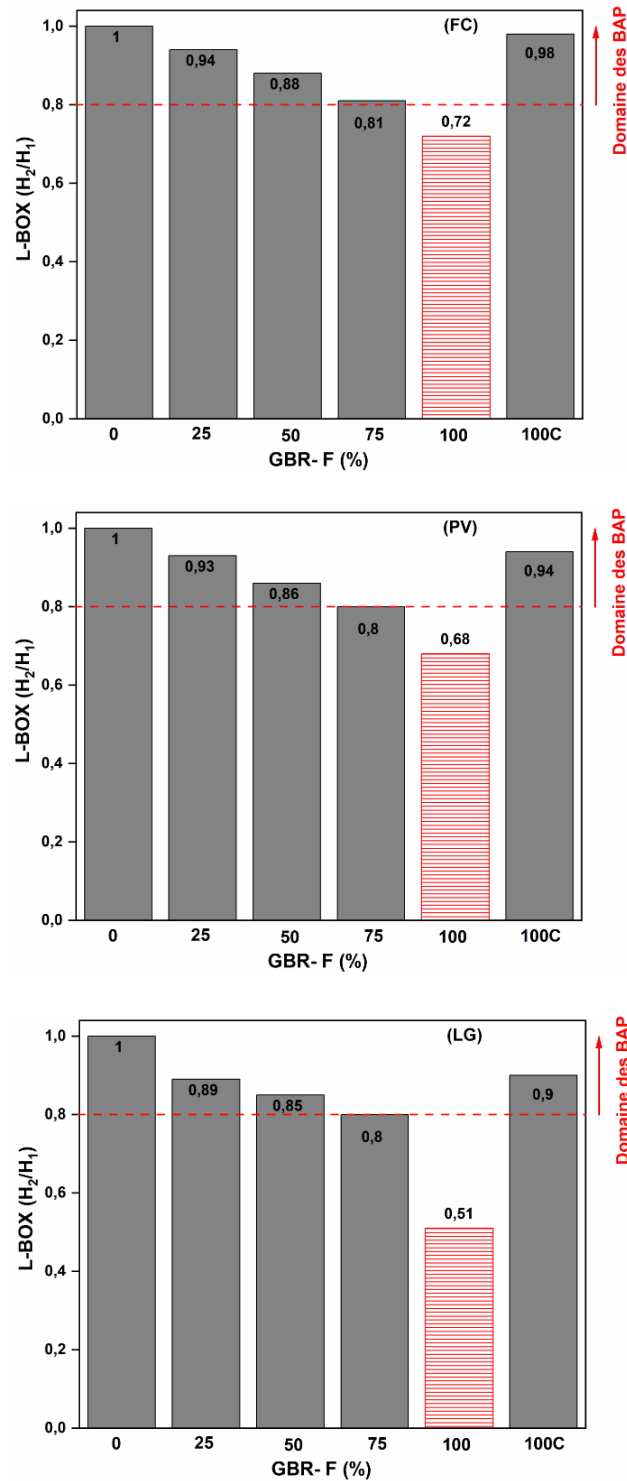


Figure 3.4. Effet du remplacement partiel et total des GN par des GBR frais sur le taux de remplissage à la boîte en L des BAP

L'indice PL tend à diminuer à mesure que la part des granulats naturels remplacés par des GBR-F augmente, tout en conservant un dosage constant en superplastifiant et un rapport E/C stable, quel que soit le type d'addition minérale.

Pour un remplacement total des GN par des GBR-F (BAP non corrigé), l'écoulement des BAP devient difficile dans la partie horizontale de la boîte en L, avec des blocages possibles au niveau des armatures (figure 3.5). Cette situation se traduit par des indices PL de 0,72, 0,68 et 0,51 respectivement pour les mélanges contenant du filler calcaire (FC), de la poudre de verre (PV) et du laitier granulé (LG).

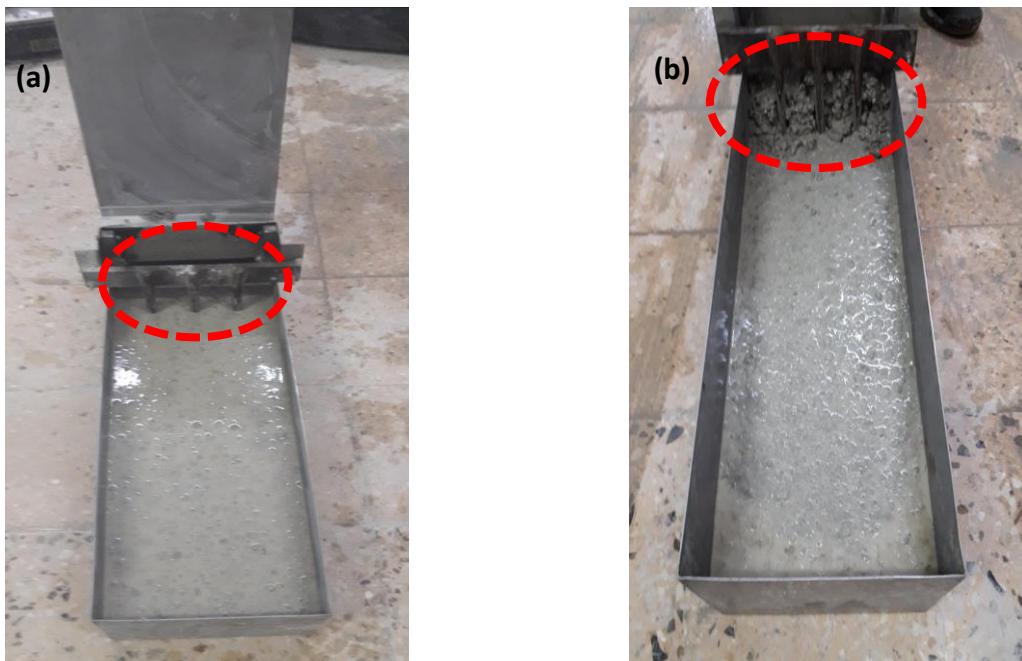


Figure 3.5. Capacité de remplissage à la boîte en L (a). BAP avec 100% GN, (b). BAP avec 100% GBR-F

Ce résultat peut être expliqué par une plus grande absorption d'eau des GBR-F en comparaison avec les GN, due à la présence d'ancien mortier. Par conséquent, plus le taux de substitution est grand, plus la demande en eau des GBR-F est importante, augmentant ainsi la viscosité des mélanges, ce qui réduit la mobilité des BAP.

En plus de leur forte capacité d'absorption d'eau, les granulats recyclés se caractérisent par une texture rugueuse et des formes anguleuses ou allongées, ce qui favorise les frottements intergranulaires, entraînant par la même occasion un effet d'encombrement des particules solides, particulièrement visible lors du passage de béton à travers les armatures, et cet effet est plus prononcé lorsque les granulats recyclés sont totalement incorporés.

Comme il a été démontré précédemment, l'ajustement du dosage en eau de gâchage pour pallier l'absorption des GBR a entraîné une amélioration de la capacité de passage des BAP à 100 % de GRF de 36 %, 38 % et 76 % respectivement pour le FC, la PV et le LG, ce qui donne des valeurs de PL largement au-dessus de la limite critique prescrite par la norme.

Plusieurs études ont montré une diminution de l'indice PL avec l'augmentation du taux d'incorporation des granulats recyclés. Barroqueiro et al. (2019) et Kebaïli et al. (2015) expliquent cette diminution par la capacité élevée d'absorption d'eau des granulats recyclés et par l'augmentation de la proportion de gros granulats.

En revanche, Santo et al (Santo et al,2019), rapportent une tendance inverse marquée par une amélioration de l'indice PL, à condition que le rapport E/C et le dosage en superplastifiant soient ajustés en conséquence.

L'emploi du laitier granulé a diminué l'écoulement des BAP dans la boîte en L par rapport au filler calcaire et à la poudre de verre. Cette réduction résulte de l'augmentation de la viscosité des mélanges, particulièrement sensible lorsque la proportion de GBR-F est élevée. Han et al. (Han et al., 2023) confirment que la forme et la surface des particules du laitier granulé augmentent la viscosité des pâtes cimentaires.

4.3. Stabilité au tamis

La résistance à la ségrégation statique des BAP a été déterminée à l'aide de l'essai de stabilité au tamis, réalisé conformément à la norme NF EN 12350-11 (2010). Le paramètre SR, exprimé en pourcentage, indique la fraction de laitance ayant traversé le tamis par rapport à la quantité totale de béton utilisée. Les résultats de l'essai de stabilité au tamis en fonction de la fraction de GBR-F sont présentés à la figure 3.6.

L'ensemble des BAP à base de GBR-F et un rapport E/C non ajusté ont des valeurs SR inférieures à 15 % (classe SR 2), tandis que les BAP 100 % GBR-F corrigés ont des valeurs SR inférieures à 20 % (classe SR 1), selon la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 2010). Les résultats ont montré une diminution de l'indice SR en fonction de l'augmentation du taux en GBR-F, estimée à 64,7 % ; 72,7 % et 82,6 % pour tous les mélanges, respectivement pour le BAP-FC, le BAP-PV et le BAP-LG.

Ces résultats peuvent être expliqués par l'absorption d'eau par les GBR qui augmente avec l'accroissement de leur concentration dans les BAP.

L'augmentation du rapport E/C lors de la correction des BAP 100 % GBR-F s'accompagne d'une augmentation de l'indice SR. Des observations similaires ont été constatées par plusieurs auteurs (Safiuddin et al., 2011 ; Rizwan et al., 2022)

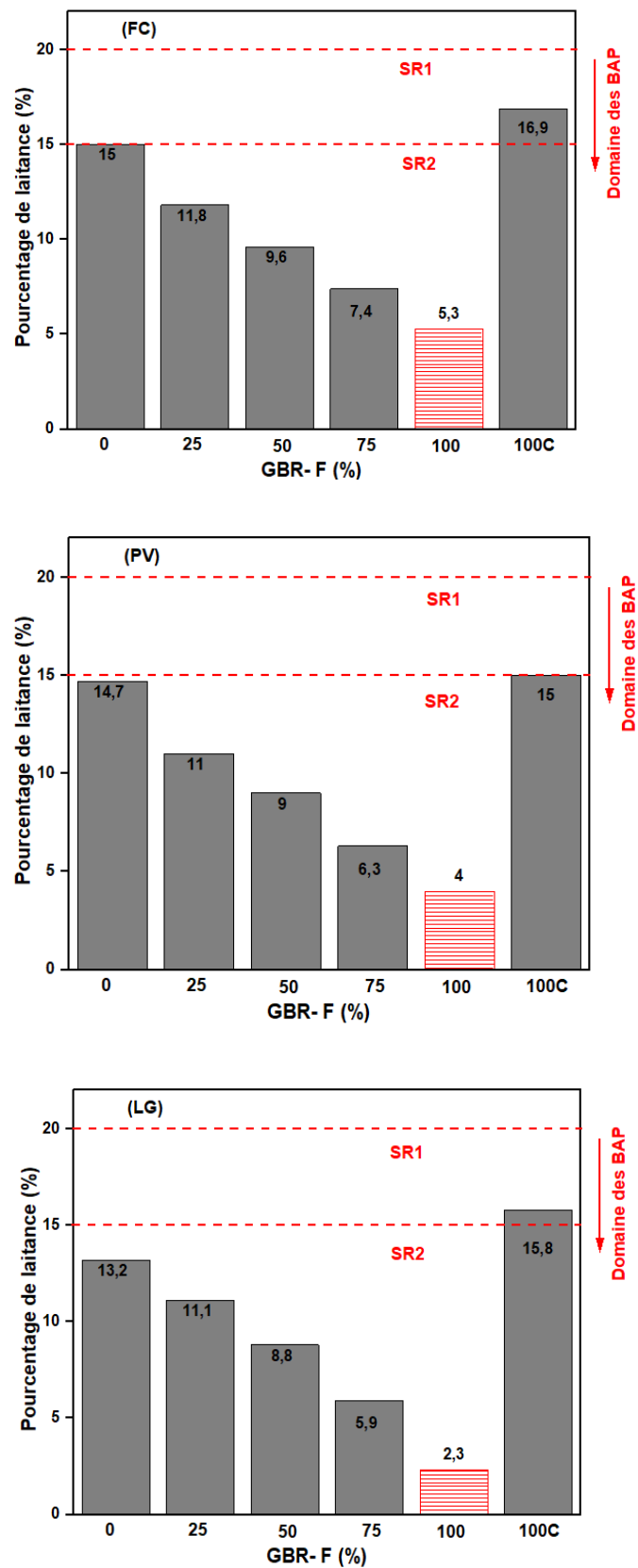


Figure 3.6. Effet du remplacement partiel et total des GN par des GBR frais sur la résistance à la ségrégation des BAP

Les BAP LG ont des indices de SR les plus faibles, suivis des BAP PV et enfin des BAP FC pour la raison déjà évoquée : Les demandes en eau présentent des différences selon la nature des additions, celle du laitier de haut fourneau (LG) se révélant la plus élevée.

4.4. Masse volumique du béton frais et teneur en air occlus

La figure 3.7 illustre la variation de la masse volumique apparente et de la teneur en air occlus pour les mélanges de BAP avec les trois types d'additions (FC, PV et LG) en fonction du taux d'intégration de GBR-F.

À mesure que la proportion de GBR-F dans les mélanges s'accroît, la masse volumique apparente des BAP diminue, tandis que la teneur en air occlus augmente, et ce, quelle que soit l'addition minérale utilisée. Les mêmes tendances ont été rapportées par plusieurs travaux antérieurs (Guneyizi et al, 2016., Santos et al, 2017).

La diminution de la masse volumique apparente des BAP s'explique principalement par la différence entre les masses volumiques des GBR et des GN. En effet, les GBR possèdent une masse volumique réelle inférieure à celle des GN, en raison de leur composition et de leur structure poreuse, conséquence de la présence du mortier adhérent résiduel.

La masse volumique apparente du béton peut également dépendre de la porosité, de la rugosité, de la forme et de la taille des granulats (Järvenpää, 2001). Mais également les pores présents dans la pâte de ciment peuvent être occupés par de l'eau ou bien de l'air, et leur présence peut ainsi diminuer la masse volumique apparente du béton frais et augmenter la teneur en air.

Lavado et al. (Lavado et al., 2020) ont constaté que la texture rugueuse et la forme moins arrondie et plus anguleuse des GBR entraînaient une augmentation du piégeage de l'air dans le mélange, ce qui influençait la teneur en air dans le béton.

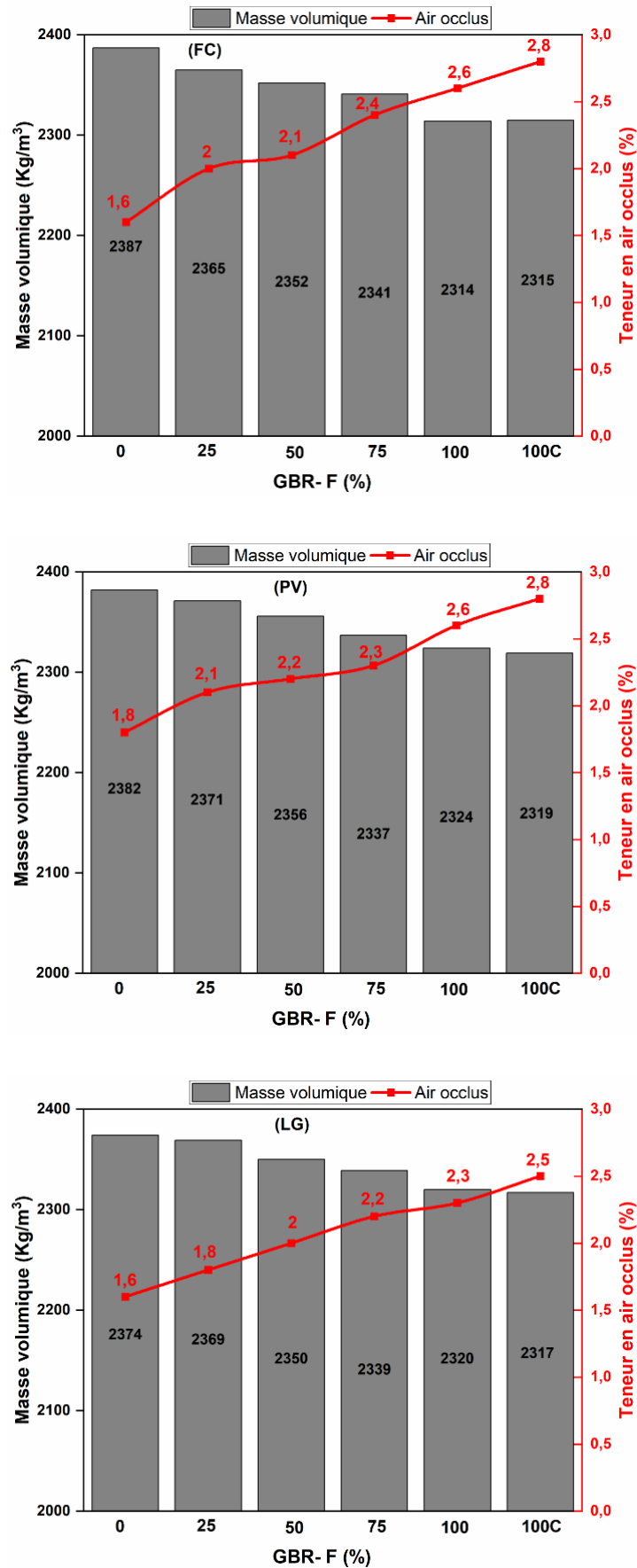


Figure 3.7. Effet de l'incorporation des GBR frais sur la masse volumique et la teneur en air occlus des BAP

La figure 3.8 illustre la corrélation entre l'augmentation de la teneur en air et la baisse de la masse volumique à l'état frais pour tous les BAP. Par conséquent, plus la teneur en GBR-F est grande, plus le béton contient de l'air. L'effet de l'addition minérale sur ces deux paramètres n'a pas été visible, car les valeurs de teneur en air sont restées similaires pour le filler calcaire, la poudre de verre et le laitier granulé.

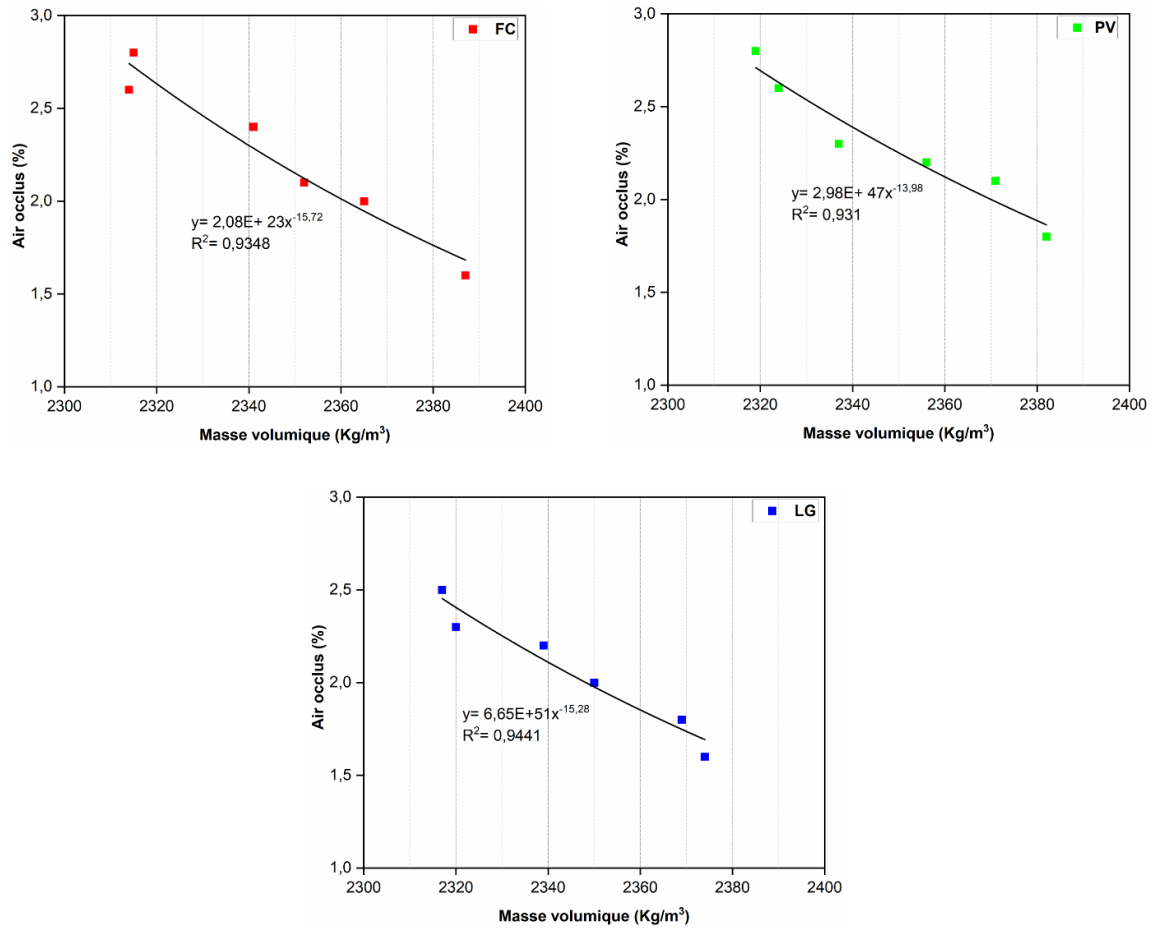


Figure 3.8. Relation entre l'augmentation de l'air occlus et la diminution de la masse volumique

5. RESULTATS OBTENUS A L'ETAT DURCI

5.1. Résistance en compression

La figure 3.9 présente l'évolution de la résistance à la compression des différents mélanges.

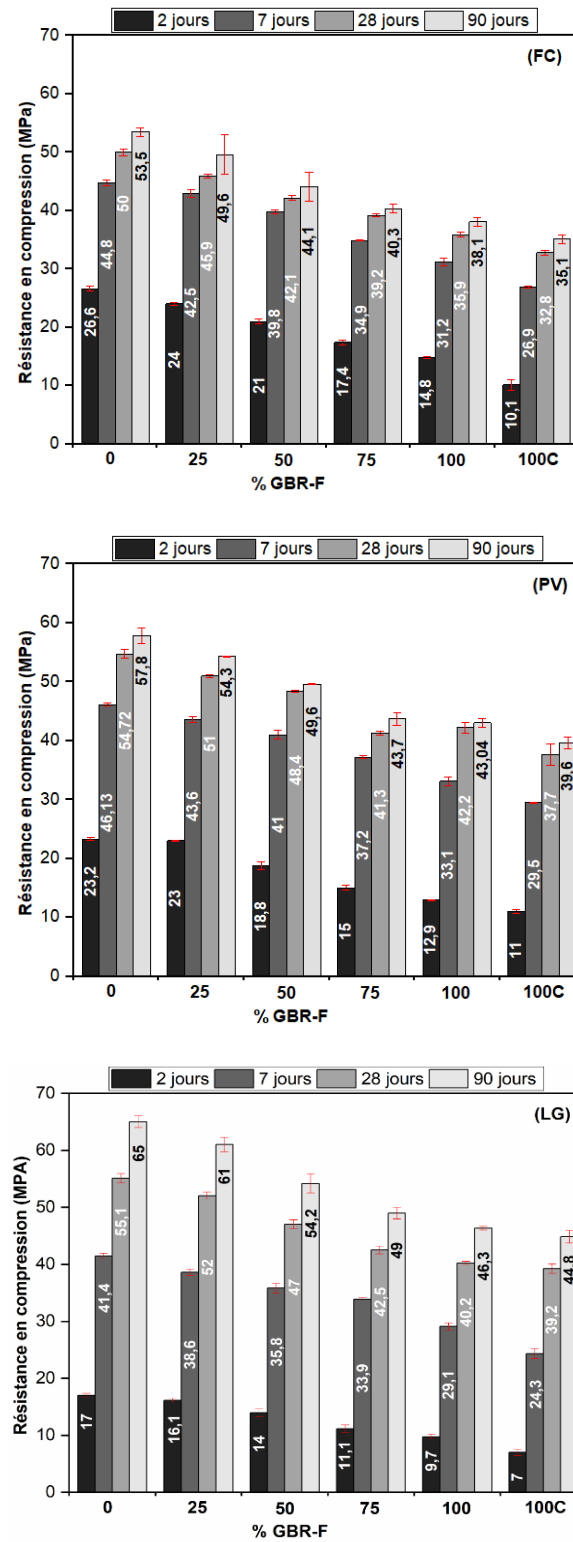


Figure 3.9. Effet de l'incorporation des GBR frais sur la résistance à la compression des BAP

Les essais sont menés sur des bétons contenant des GBR-F frais, mesurés pour des périodes de maturation de 2, 7, 28 et 90 jours, en fonction du pourcentage d'incorporation. Comme dans le cas du BAP avec GN, la résistance à la compression des BAP avec GBR-F augmente proportionnellement à l'âge du béton. Cependant, à mesure que le taux de GBR-F augmente, la résistance à la compression à un âge donné diminue, et ce, indépendamment de la nature de l'addition minérale utilisée.

Il est reconnu que la résistance des granulats constitue un facteur influençant en partie la résistance mécanique du béton. En d'autres termes, la qualité des GBR conditionne les performances du béton à l'état durci.

D'après les résultats obtenus, la diminution des résistances observées dans les BAP incorporant des GBR-F s'explique principalement par la qualité moins favorable de ces granulats. De manière plus détaillée, les propriétés du béton sont influencées par le mortier ancien restant attaché aux granulats d'origine et par la zone de transition interfaciale (ITZ) qui se développe entre ce mortier résiduel et la nouvelle pâte cimentaire. Ce vieux mortier poreux et friable constitue une zone de discontinuité qui pénalise la résistance globale du béton.

Par ailleurs, les observations post-rupture sur des éprouvettes rompues en compression ont montré que la ligne de rupture était généralement localisée autour des granulats, confirmant le rôle critique de cette interface. Les mêmes observations ont été révélées par Rashid et al (Rashid et al, 2020).

À 90 jours de conservation humide, le remplacement des granulats naturels par les GBR-F de 25% à 100%, a entraîné une diminution progressive des résistances, dont les pertes enregistrées sont respectivement de l'ordre de 7,29%, 17,57%, 24,67%, 28,78%, 34,39%, pour les BAP-FC, 6,05%, 14,18%, 24,39%, 25,53%, 31,49%, pour les BAP-PV et 6,15%, 16,61%, 24,61%, 28,76% et 31,08% pour les BAP-LG.

Un autre facteur pouvant expliquer la diminution des résistances est la forte absorption d'eau des GBR, qui nécessite une augmentation du rapport E/C pour atteindre une certaine ouvrabilité. Par conséquent, on s'attend à une réduction des résistances mécaniques, ce qui est le cas des BAP 100 % corrigés, dont l'augmentation du rapport E/C a réduit les résistances mécaniques.

La nature de l'addition minérale affecte également les résistances mécaniques. Les meilleures résistances obtenues aux jeunes âges (2 et 7 jours) correspondent aux BAP-FC et BAP-PV, principalement grâce à l'effet de remplissage et de surface (Ali Boucetta et al., 2021). En revanche, à plus long terme (28 et 90 jours), les résistances les plus élevées ont été obtenues avec les BAP LG par effet hydraulique (Behim, 2005), suivies par celles des BAP PV par effet pouzzolanique. Un effet similaire a été rapporté par une étude antérieure (Ali Boucetta et al., 2021).

5.2. Absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption d'eau correspond à la capacité du béton à absorber l'eau : plus sa structure capillaire est développée, plus l'absorption est élevée, ce qui se traduit par un coefficient d'absorption plus important.

La figure 3.10 représente les variations des coefficients d'absorption capillaire, selon la racine carrée du temps, pour les BAP FC, PV et LG. L'absorption d'eau capillaire a augmenté considérablement à mesure que le taux de substitution des GN par les GBR frais croît. En effet, les granulats de béton recyclés sont caractérisés par une importante absorption d'eau. Une fois introduits dans un béton, les GBR augmentent fortement la capacité d'absorption capillaire. Cela est sans doute lié à leur porosité élevée, due à la quantité significative de mortier ancien adhérent à la surface des granulats. De plus, l'augmentation du rapport E/C (cas des BAP 100 % corrigés) engendre une formation supplémentaire de pores et de capillaires.

Les courbes d'absorption d'eau des bétons présentent deux phases : la première phase d'absorption est rapide et correspond au remplissage des plus gros pores. La deuxième phase correspond au remplissage des plus petits pores ; elle est plus lente.

Quelles que soient les additions utilisées : les granulats naturels n'absorbent quasiment pas d'eau, donc l'eau est absorbée majoritairement par la porosité de la pâte cimentaire et la courbe d'absorption est plutôt lissée et ne présente pas de discontinuité nette et visible entre la première et la deuxième phase, c'est le cas du BAP-GN et du BAP-GBR25. Cependant, une faible discontinuité entre la première et la seconde phase de l'absorption apparaît pour le BAP-GBR50.

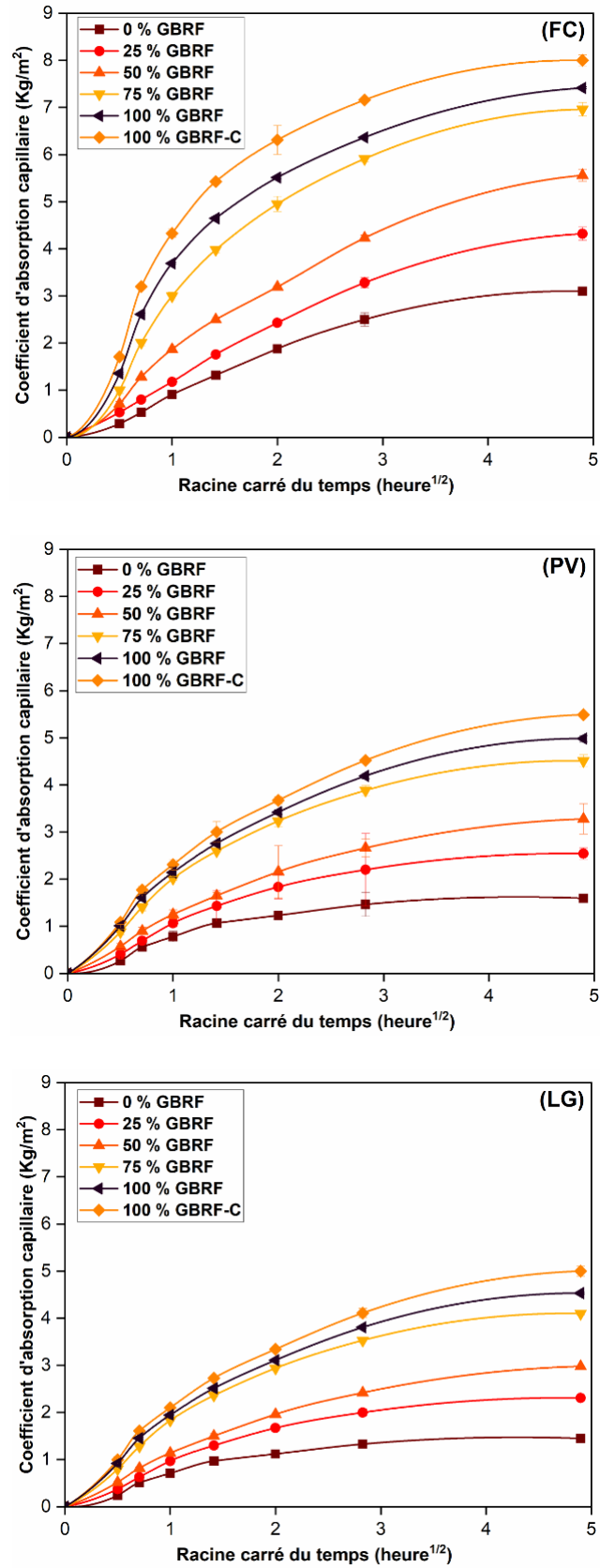


Figure 3.10. effet de la substitution partielle et totale des GN par les GBR-F, et des additions minerales sur l'absorption d'eau capillaire des BAP

Pour les BAP-GBR75, BAP-GBR100 et BAP-GBR100-C, l'absorption d'eau pendant la première étape se déroule rapidement et est liée à la porosité des GBR (présente dans l'ancien mortier) et aux microfissures (concassage du béton démolé). Alors que la deuxième phase correspond essentiellement à l'absorption de la pâte cimentaire, elle est plus lente. La transition entre les deux phases est plus marquée.

L'utilisation de la poudre de verre et du laitier granulé permet de réduire l'absorption d'eau capillaire des BAP par rapport au filler calcaire, et ce pour tous les taux de substitution. À titre d'exemple, cette diminution est estimée à 31,4 % pour les BAP contenant de la poudre de verre et à 37,6 % pour ceux contenant du laitier, pour un taux de 100% de GBR-F à 24 heures. Cette amélioration s'explique par une diminution du diamètre et du nombre de pores grâce à la formation de nouveaux hydrates. D'après les travaux antérieurs (Ali Boucetta, 2021), le laitier granulé et la poudre de verre améliorent la capacité d'absorption capillaire en favorisant la formation de C-S-H secondaires, issus des réactions hydrauliques du laitier et des réactions pouzzolaniques de la poudre de verre. Ces C-S-H secondaires participent à la réorganisation de la distribution et des dimensions des pores, en tapissant les parois internes des pores et capillaires, ce qui permet un affinage du réseau poreux et une amélioration de la microstructure.

6. SYNTHÈSE

Ce chapitre porte sur l'évaluation de la faisabilité d'intégrer des granulats de béton recyclés frais dans un béton autoplaçant. La difficulté de ce matériau résidait dans sa grande capacité d'absorption d'eau et sa faible résistance, causées par la présence d'ancien mortier adhérent.

À cela s'ajoutait le caractère extrêmement fluide des BAP. A priori, ce sont deux caractéristiques apparemment contradictoires, mais qu'il fallait fusionner dans un seul matériau, qui aurait à la fois les propriétés d'autoplaçance et une résistance mécanique suffisante. Pour cela, dix-huit compositions de BAP ont été étudiées, contenant différents taux de GBR frais (0, 25, 50, 75 et 100 %) et incorporant trois types d'additions minérales, le FC, la PV et le LG. Nous pouvons tirer les enseignements suivants :

- L'augmentation du taux de substitution des GN par les GBR-F a réduit l'écoulement libre des BAP (test d'étalement au cône d'Abrams) et l'écoulement horizontal (test du L-box), mais a augmenté le temps d'écoulement (test du T₅₀₀) et le risque de ségrégation statique (test de la stabilité au tamis).
- Pour les mélanges contenant 100% GBR-F, l'ajustement réalisé en niveau du dosage en eau pour compenser l'absorption des granulats recyclés, a permis d'améliorer efficacement les propriétés des BAP, en maintenant sa fluidité et sa stabilité malgré les défis posés par ces gravillons.
- L'emploi du laitier granulé comparé au filler calcaire, ainsi que la poudre de verre, a entraîné une tendance à la diminution des propriétés des bétons à l'état frais.

- L'importante porosité contenue dans les GBR, localisée en particulier dans l'ancien mortier, a réduit considérablement la résistance mécanique en compression des BAP proportionnellement au taux d'incorporation.
- La poudre de verre et laitier granulé ont permis d'améliorer la résistance en compression, chacune selon son pouvoir : pouzzolanique pour la poudre de verre qui a permis d'augmenter la résistance à moyen terme par rapport à la résistance développée par le BAP-FC, tandis que le pouvoir hydraulique latent du laitier granulé s'est traduit par une amélioration progressive, particulièrement notable au-delà de 28 jours des BAP-LG.
- Une absorption d'eau capillaire accrue a été constatée pour des taux croissants de GBR-F en raison d'une forte porosité de ces derniers. Néanmoins, de faibles valeurs du coefficient d'absorption d'eau ont été obtenues par le remplacement du FC par du PV et du LG.

Cette démarche expérimentale nous a permis de conclure que le remplacement des GN par des GBR-F influence les performances des BAP, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Cet effet s'accroît de manière notable lorsque le taux de remplacement dépasse les 75 %.

Les granulats de béton recyclés, après traitement par carbonatation naturelle, peuvent-ils être utilisés en remplacement total des granulats naturels, sans recours à aucun ajustement au niveau de la formulation ? C'est à cette question que nous allons apporter des conclusions dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

AFGC : Provisional recommandations for the use of SCC, Paris, 2nd edition
 aggregate concrete (RAC)—A review. *Construction and Building Materials*, 326, 126891.
 aggregate recycled from waste concrete on the performance of the prepared recycled

Ali-Boucetta, T., Behim, M., Cassagnabere, F., Mouret, M., Ayat, A., & Laifa, W. (2021). Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag. *Construction and Building Materials*, 270, 121133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133>

B

Badreddine-Bessa, A. (2004). Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

Barroqueiro, T., da Silva, P. R., & De Brito, J. (2019). Fresh-state and mechanical properties of high-performance self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry. *Materials*, 12(21), 3565. <https://doi.org/10.3390/ma12213565>

Benjeddou, O., Alwetaishi, M., Tounsi, M., Alyousef, R., & Alabduljabbar, H. (2021). Effects of limestone filler fineness on the rheological behavior of cement–Limestone filler grouts. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3569-3578. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.020>

Bigas, J. P., & Gallias, J. L. (2002). Effect of fine mineral additions on granular packing of cement mixtures. *Magazine of Concrete Research*, 54(3), 155-164. <https://doi.org/10.1680/macr.2002.54.3.155>

Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of cleaner production*, 99, 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>

Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and concrete research*, 41(10), 1037-1049. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>

compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example. *Journal of Cleaner Production*, 87, 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.077>
 concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants.

D

De Andrade Salgado, F., & de Andrade Silva, F. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104452>

Djelloul, O. K., Menadi, B., Wardeh, G., & Kenai, S. (2018). Performance of self-compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates and ground granulated blast-furnace slag. *Advances in concrete construction*, 6(2), 103. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.103>

H

Han, F., Li, Y., & Jiao, D. (2023). Understanding the rheology and hydration behavior of cement paste with nickel slag. *Journal of Building Engineering*, 73, 106724. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106724>

J

Järvenpää, H. (2001). Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects on concrete. Dissertation for degree of Doctor, Helsinki University of Technology
Journal of cleaner production, 99, 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>

K

Kapoor, K., Singh, S. P., Singh, B., & Singh, P. (2020). Effect of recycled aggregates on fresh and hardened properties of self compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*, 32, 600-607. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.753>

Kebaili, O., Mouret, M., Arabi, N., & Cassagnabere, F. (2015). Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example. *Journal of Cleaner Production*, 87, 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.077>

L

Lavado, J., Bogas, J., De Brito, J., & Hawreen, A. (2020). Fresh properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 233, 117322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117322>

M

Martínez-García, R., Jagadesh, P., Fraile-Fernández, F. J., Morán-del Pozo, J. M., & Juan-Valdés, A. (2020). Influence of design parameters on fresh properties of self-compacting concrete with recycled aggregate—A review. *Materials*, 13(24), 5749. <https://doi.org/10.3390/ma13245749>

Mindess, S. (2019). Sustainability of concrete. In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete* (pp. 3-17). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00001-0>

N

NF EN 206-9: Concrete - Part 9: additional rules for Self-Compacting Concrete (SCC), 2010

NF EN 12350-10: Testing fresh concrete - Part 10: self-compacting concrete - L box test, 2010.

NF EN 12350-11: Testing fresh concrete - Part 11: self-compacting concrete - Sieve segregation test, 2010.

NF EN 12350-8: Testing fresh concrete - Part 8: self-compacting concrete - Slump-flow test, 2019.

NF EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, 2019

P

Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and concrete research*, 34(1), 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)

R

Rashid, K., Rehman, M. U., de Brito, J., & Ghafoor, H. (2020). Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124316>

Rizwan, S. A., Irfan-ul-Hassan, M., Rahim, A., Ali, S., Sultan, A., Syamsunur, D., & Md Yusoff, N. I. (2022). Recycled Coarse Aggregate for Sustainable Self-Compacting Concrete and Mortar. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4566531>

S

Safiuddin, M. D., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2011). Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 1023-1041. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60093-4](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60093-4)

Santos, S., Da Silva, P. R., & De Brito, J. (2019). Self-compacting concrete with recycled aggregates—a literature review. *Journal of Building Engineering*, 22, 349-371. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.001>

T

Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and building materials*, 23(2), 1163-1167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007>

Y

Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L. (2007). Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>

Younsi, A., Mahi, M. A., Hamami, A. E. A., Belarbi, R., & Bastidas-Arteaga, E. (2023). High-volume recycled waste glass powder cement-based materials: Role of glass powder granularity. *Buildings*, 13(7), 1783. <https://doi.org/10.3390/buildings13071783>

Z

Zhang, H., Xu, X., Liu, W., Zhao, B., & Wang, Q. (2022). Influence of the moisture states of aggregate recycled from waste concrete on the performance of the prepared recycled aggregate concrete (RAC)—A review. *Construction and Building Materials*, 326, 126891. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126891>

CHAPITRE IV

**RÉSULTATS OBTENUS SUR LES BAP A
BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS
CARBONATÉS À L'ÉTAT FRAIS**

CHAPITRE IV

RÉSULTATS OBTENUS SUR LES BAP A BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS CARBONATÉS À L'ÉTAT FRAIS

Dans ce quatrième chapitre, deux parties distinctes sont présentées.

La première partie examine les modifications des propriétés des gravillons de béton recyclés après carbonatation.

La seconde partie propose une comparaison de l'effet des GBR carbonatés (GBR-C) sur les propriétés des BAP à l'état frais avec celles des formulations optimisées présentées dans le troisième chapitre.

Sommaire

1. INTRODUCTION	124
2. PARTIE I. CARBONTATION ET CARACTERISATION DES GRANULATS RECYCLES CARBONATES (GBR-C)	124
2.1 ETAT DE CARBONTATION	124
2.2 ANALYSES MICROSTRUCTURALES (ATG ET MEB)	125
2.3 PROPRIETES PHYSIQUES	128
2.3.1 Masses volumiques.....	128
2.3.2 Absorption d'eau	130
2.3.3 Porosimétrie par intrusion de mercure.....	131
2.4 PROPRIETES MECANIQUES	133
2.4.1 Résistances aux chocs et à l'usure.....	133
3. PARTIE II. RESULTATS OBTENUS SUR BAP A L'ETAT FRAIS	135
3.1 COMPOSITION DES BAP.....	135
3.2 RESULTATS A L'ETAT FRAIS	136
3.2.1 Etalement au cone d'Abrams	136
3.2.2 Temps d'écoulement (T500)	137
3.2.3 Taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX)	138
3.2.4 Stabilité au tamis.....	140
3.2.5 Masse volumique et teneur en air occlus	142

4. SYNTHÈSE.....	144
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145

CHAPITRE IV

RÉSULTATS OBTENUS SUR LES BAP À BASE DE GRAVILLONS RECYCLÉS CARBONATÉS À L'ÉTAT FRAIS

1. INTRODUCTION

Le traitement par carbonatation constitue une voie envisageable pour améliorer certaines propriétés des GBR-F d'une part, et pour séquestrer une quantité de CO₂ émise dans l'environnement d'autre part. Le présent chapitre est divisé en deux principales parties distinctes :

La première phase correspond à une étude préparatoire ayant pour but de comparer les propriétés des granulats recyclés avant et après carbonatation. Cette comparaison repose sur des analyses microstructurales (ATG et MEB), en complément d'essais physiques et mécaniques, afin d'évaluer les effets du traitement appliqué aux GBR en vue de leur emploi dans les bétons autoplaçants en remplacement complet des granulats naturels.

Dans la deuxième partie, des compositions optimisées de BAP contenant des granulats naturels (GN), des granulats recyclés frais (GBR-F) et des granulats recyclés carbonatés (GBR-C) avec l'emploi d'additions de FC, LG et PV seront étudiées et caractérisées à l'état frais afin de comprendre et d'apporter des conclusions sur l'efficacité de la carbonatation des GBR sur les propriétés des BAP.

2. PARTIE I. CARBONATATION ET CARACTERISATION DES GRANULATS RECYCLÉS CARBONATÉS (GBR-C)

2.1. *État de carbonatation (test à la phénolphthaléine)*

Parmi les tests utilisés pour étudier l'évolution de la carbonatation figure le test chimique à la phénolphthaléine. Le test est facile à réaliser et nous a permis de détecter l'évolution de carbonatation dès le début de l'exposition des granulats à l'air libre.

Pour la mesure du taux de carbonatation, à chaque échéance un échantillon de grains est prélevé, de façon aléatoire, du bac de conservation placé à l'air libre, nettoyé et testé à la phénolphthaléine. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 4.1.

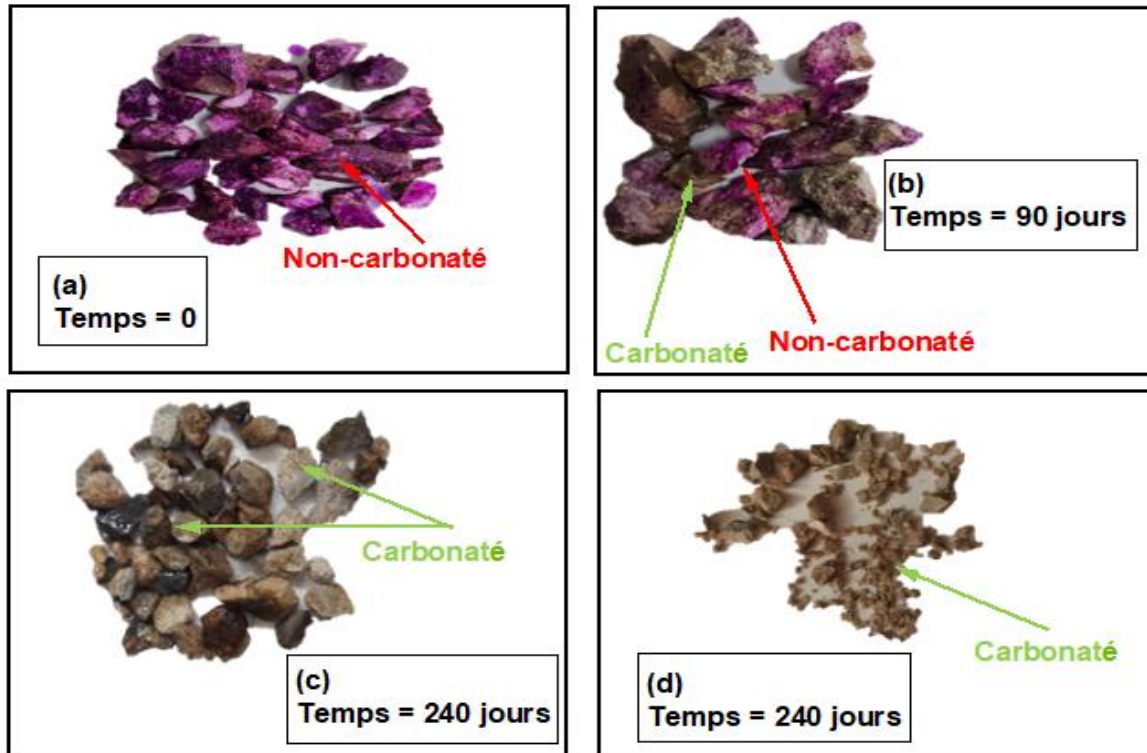


Figure 4.1. Évolution de l'état de carbonatation des gravillons recyclés

Le test à la phénolphthaléine réalisé sur les gravillons fraîchement concassés ne montre aucun signe de carbonatation (figure 4.1.a), indiqué par le virage de couleur des grains. En effet, une couleur rose indique que l'échantillon est sain (non carbonaté) et possède un pH basique ($\text{pH} > 12,5$) maintenu principalement par la présence de la portlandite. Après trois mois d'exposition, les gravillons présentent une surface partiellement carbonatée (Figure 4.1.b), marquant l'amorçage du processus de carbonatation. Alors qu'après 8 mois, tous les grains sont totalement carbonatés (figure 4.1.c). À la même échéance, les gravillons carbonatés ont été concassés en plusieurs morceaux puis examinés par coloration à la phénolphthaléine dans le but de déterminer l'avancement de la carbonatation (Figure 4.1.d). Cette méthode a été inspirée des travaux de Xiao et al (Xiao et al, 2022).

2.2. Analyses microstructurales (ATG et MEB)

L'analyse thermogravimétrique a été réalisée sur les deux gravillons recyclés (GBR-F et GBR-C), afin de déterminer les différents composants présents dans chaque échantillon et leur transformation dans chaque plage de température. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.2.

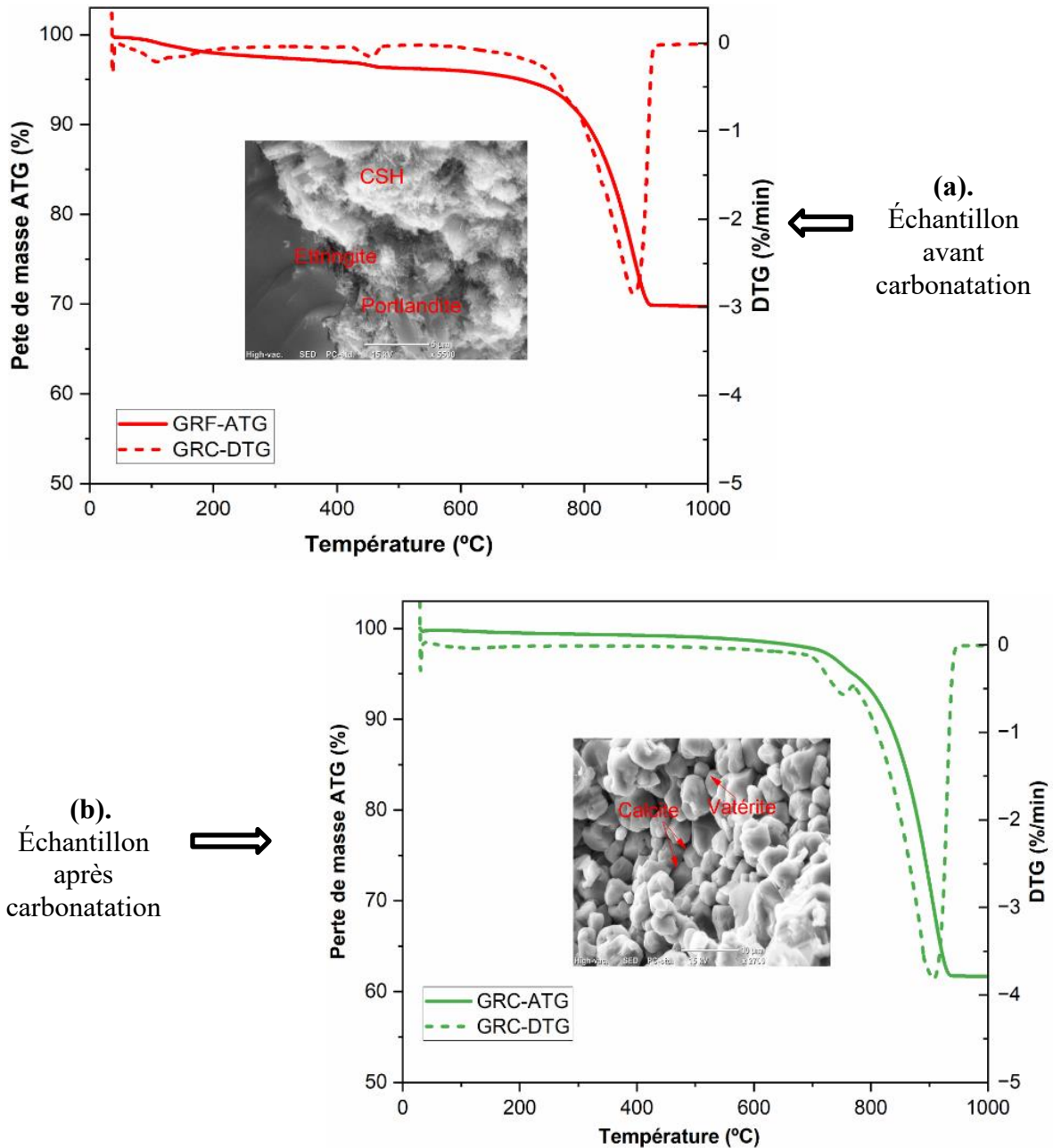


Figure 4.2. Évolutions thermiques et microstructurales des gravillons recyclés.
(a). Échantillon avant carbonatation **(b).** Échantillon après carbonatation

Sur la courbe ATG des gravillons recyclés frais, une perte de masse de 30% a été enregistrée, répartie principalement en trois phases :

- Entre 80 °C et 200 °C, le pic observé sur la courbe DTG correspond à la déshydratation du gypse, de l'ettringite et des C-S-H présents dans l'ancienne matrice cimentaire des granulats recyclés.
- Entre 425 °C et 480 °C, se produit la déshydroxylation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

- Entre 750 °C et 920 °C, La perte de masse finale observée est liée à l'élimination du dioxyde de carbone provenant de la décomposition du carbonate de calcium présent dans les granulats d'origine. En effet, à des températures comprises entre 550 °C et 990 °C se décompose le CaCO_3 .

Les mêmes observations obtenues sur l'analyse thermogravimétrique des GBR-F ont été révélées par Meftah (Meftah, 2018).

Sur le même thermogramme des GBR-F est présentée une image MEB du même échantillon qui montre la présence d'hydrates dans l'ancienne matrice cimentaire, constitués principalement de portlandite sous forme de plaquettes hexagonales, d'ettringite sous forme d'aiguilles et de gel de CSH. La présence de ces produits (issus de l'ancienne matrice cimentaire des GBR) confirme que l'échantillon de gravillon est frais et n'a pas subi de transformation chimique.

Sur la courbe ATG des gravillons recyclés carbonatés (GBR-C, Figure 4.2.b), une perte de masse totale de l'ordre de 37% est enregistrée, correspondant à deux diminutions de masse. Le premier intervalle de perte est situé entre 640 °C et 720 °C, alors que le deuxième est délimité entre 780 °C et 920 °C.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés à partir de ce thermogramme :

- L'analyse des GBR-C montre une forte diminution ou absence des pics relevés sur les GBR-F correspondants aux pertes de masse des CSH, ettringite et portlandite ce qui peut être expliqué par leur transformation durant le processus de la carbonatation.
- Le second pic, observé entre 780 °C et 920 °C, est associé à l'émission de CO_2 provenant à la fois de la décomposition des carbonates de calcium contenus dans les granulats d'origine et de la décarbonatation des phases de la matrice cimentaire, en particulier la portlandite et les C-S-H. En effet, l'intensité du pic correspondant au départ du CO_2 montré sur la figure 4.2.b est plus importante que celle du pic correspondant au départ du CO_2 des granulats parents seuls présenté sur la figure 4.2.a.

- **Commentaires**

Au début de la diffusion du CO_2 à l'intérieur de l'ancienne matrice cimentaire des granulats de béton recyclés, se produit la dissolution de la portlandite, et c'est grâce à cette dissolution que le pH de la solution interstitielle est maintenu basique. Le processus réactionnel favorise la création de calcite, reconnue comme étant la phase la plus stable parmi les polymorphes du carbonate de calcium (Thiery, 2007).

La thermogravimétrie (Figure 4.2.a) appliquée à un échantillon de GBR-F avant carbonatation confirme la présence de portlandite et de carbonate de calcium (issus de l'ancien mortier des granulats). Après carbonatation, l'analyse thermogravimétrique (Figure 4.2.b) réalisée sur un échantillon de GBR-C (carbonaté) montre l'absence de la portlandite, qui s'est transformée par

carbonatation en calcite d'une part, et l'augmentation de l'intensité du pic de la calcite d'autre part.

Dans cette étude, cette réaction est constatée par l'effacement du pic attribué à la décomposition de la portlandite ce qui explique son absence dans l'échantillon carbonaté, ainsi que par l'augmentation du pic de la décomposition de la calcite. En effet, en comparant ce dernier avec le pic identifié dans les GBR-F pour des températures de décomposition comprises entre 780 °C et 920 °C, on observe dans les GBR-C une augmentation notable. Ce phénomène peut être attribué à la décomposition de la calcite issue de la roche d'origine du granulats naturel encore liée à l'ancienne matrice cimentaire des GBR-F, mais aussi à la calcite formée au cours du processus de carbonatation. Ces résultats concordent avec les données de la littérature, qui rapportent que la décomposition de la calcite commence à partir de 720 °C (Dos Reis et al., 2020). De même, les observations microscopiques couplées avec l'analyse thermique montrent bien l'existence de particules à structure rhomboédrique, propres à la calcite.

La portlandite poursuit sa réaction avec le CO_2 , mais à mesure que le processus progresse, sa teneur tend à diminuer jusqu'à atteindre un seuil d'épuisement ou une dissolution devenue lente et limitée, en raison de la formation d'une couche de calcite autour des grains. À ce stade, le pH de la solution interstitielle décroît progressivement et les C-S-H commencent à réagir avec le CO_2 .

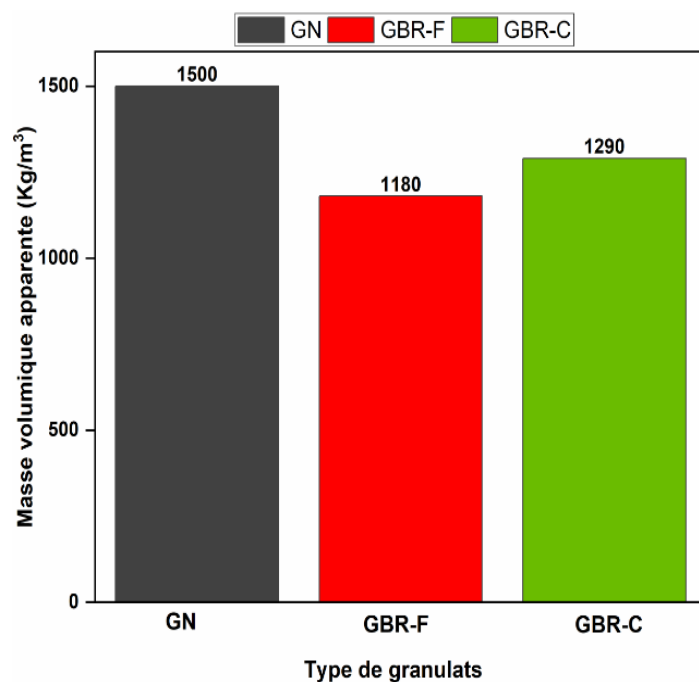
La décalcification de ces hydrates, induite par la carbonatation, conduit alors à la formation d'autres polymorphes du carbonate de calcium, tels que l'aragonite ou la vaterite. Ces deux polymorphes, généralement métastables, se décomposent thermiquement à des températures plus basses que la calcite, généralement comprises entre 550 °C et 720 °C, comme l'indiquent plusieurs auteurs (Thiery, 2007, Dos Reis, 2020, Kaddah, 2022). Les principales différences entre ces deux polymorphes sont leur concentration en calcium et leur morphologie. Pour cela et sur la base de la morphologie sphérique observée sur l'image MEB couplée à l'ATG, le polymorphe formé est la vaterite ce qui donne une indication sur la progression de la carbonatation et corrobore les résultats trouvés sur l'analyse thermogravimétrique des GBR-C en termes de consommation des CSH. Les observations trouvées dans ce travail sont en accord avec ceux révélés par plusieurs auteurs (Oral, 2018., Kaddah, 2022).

2.3. Propriétés physiques

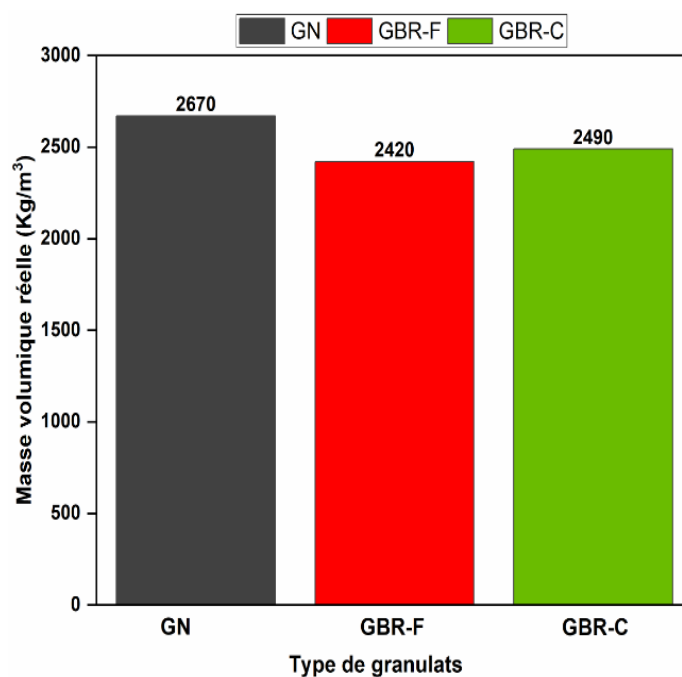
Les propriétés des bétons frais ainsi que leurs performances à l'état durci dépendent principalement des matériaux de base qui les constituent. C'est pourquoi, un bon choix et une bonne caractérisation des matériaux sont nécessaires afin de garantir la qualité du béton à la fois à l'état frais et durci.

2.3.1. Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et réelles des trois gravillons d'étude sont présentées sur la figure 4.3.



(a)



(b)

Figure 4.3. Évolution des masses volumiques des granulats recyclés après carbonatation
(a). Masse volumique apparente, (b). Masse volumique réelle

Les résultats indiquent que les GBR-F présentent les valeurs de masse volumique les plus faibles par rapport aux GN et aux GBR-C. En effet, cette différence est principalement due à la présence de l'ancien mortier collé aux granulats parents d'origine naturelle, qui est poreux et moins dense. Une augmentation de masse est observée suite au traitement de carbonatation appliqué aux granulats, de l'ordre d'environ 9 % pour la masse volumique apparente et de 3 %

pour la masse volumique réelle. Ce phénomène s'explique par la réduction de la porosité des granulats, celle-ci étant partiellement comblée par les dépôts de carbonate de calcium formés durant le processus. Des observations similaires ont été révélées par plusieurs auteurs (Xiao et al, 2022, Liang et al, 2020).

2.3.2. Absorption d'eau

Il est également important de noter que l'augmentation des masses volumiques a entraîné une diminution notable du coefficient d'absorption d'eau des GBR-C (figure 4.4).

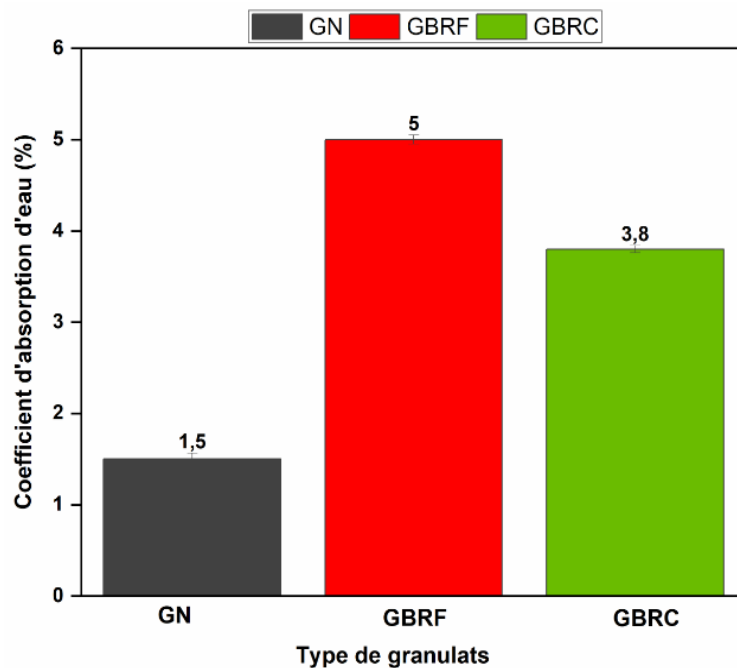


Figure 4.4. Evolution des coefficients d'absorption d'eau à 24 h des granulats recyclés après carbonatation

Vu leur origine naturelle et leur structure homogène et compacte, les GN présentent le coefficient d'absorption le plus faible, contrairement aux gravillons recyclés qu'ils soient frais ou carbonatés. Toutefois, en comparaison avec les GBR-F, le coefficient d'absorption d'eau à 24 h des GBR-C enregistre une diminution de 24 %. Cette réduction traduit une amélioration de la compacité des granulats, attribuée au processus de carbonatation qui favorise la précipitation de calcite et le comblement d'une partie de leur porosité. Cette précipitation contribue à réduire la porosité du granulat recyclé, notamment l'ancien mortier, ce qui limite considérablement la pénétration de l'eau au sein des granulats.

L'accroissement des masses volumiques, associé à une réduction de la capacité d'absorption d'eau des granulats recyclés, a été confirmé dans divers travaux de recherche (Tong et al., 2023 ; Xiao et al., 2022 ; Dos Reis et al., 2020).

2.3.3 Porosimétrie par intrusion de mercure (MIP)

La caractérisation de la porosité a été effectuée par intrusion de mercure, dans le but d'évaluer les modifications de la distribution poreuse des granulats recyclés avant et après carbonatation. L'étude a porté sur la fraction 4–6,3 mm, sélectionnée en raison de sa teneur élevée en mortier adhérent. Il est connu que plus la fraction est petite, plus la partie de mortier est dominante dans le granulat recyclé. En plus du choix de la fraction à tester, les grains ont été aussi sélectionnés à l'œil nu afin de garder des échantillons contenant plus de mortier.

Les résultats illustrés dans la figure (4.5) révèlent une baisse significative de la porosité des granulats recyclés après carbonatation, ce qui se traduit par une réduction de l'intrusion différentielle du mercure. Plus précisément, la porosité a chuté d'environ 39 %, passant de 10 % à 6,1 %. Cette évolution met clairement en évidence l'efficacité du traitement appliqué, due principalement à l'obstruction des pores par les produits issus de la carbonatation. Cette observation concorde avec la diminution du taux d'absorption d'eau mesuré après 24 h. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature (Sereng et al., 2019 ; Fang et al., 2020).

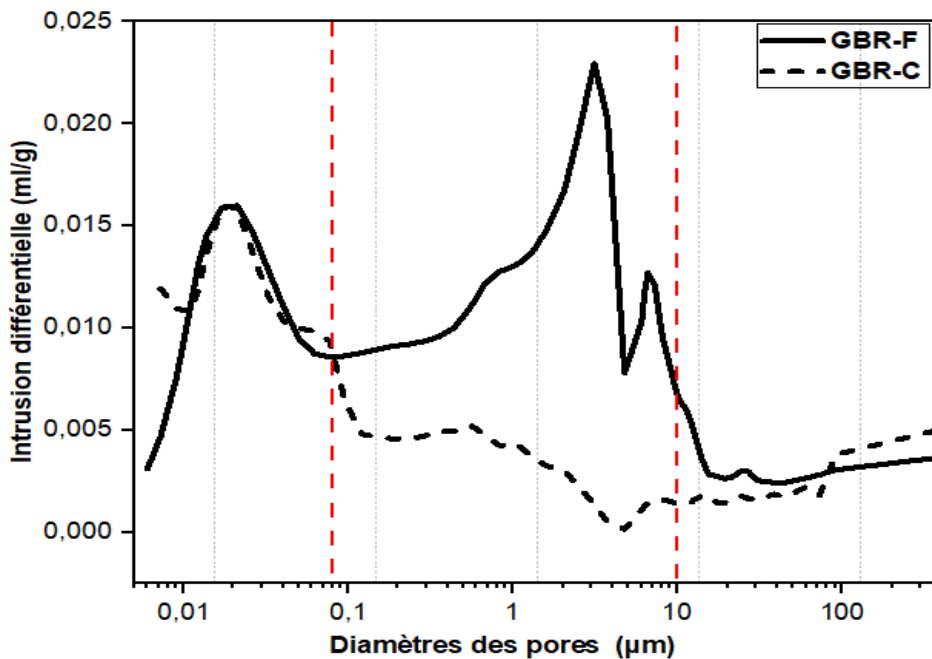


Figure 4.5. Microstructure poreuse des gravillons recyclés avant et après carbonatation

Afin d'évaluer l'effet de la carbonatation sur la modification de la structure poreuse des gravillons recyclés, la répartition de la porosité selon les différentes classes de pores a été déterminée et illustrée dans la figure 4.6.

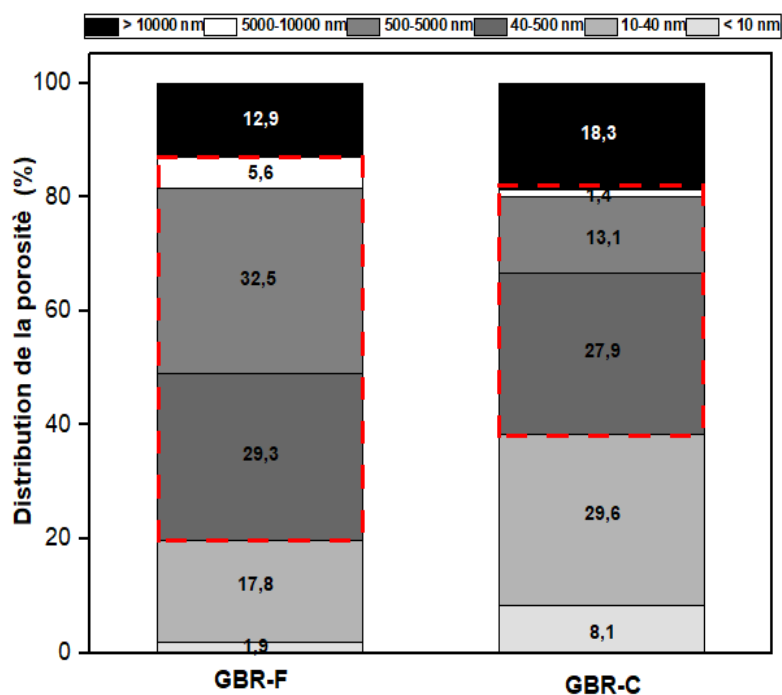


Figure 4.6. Distribution de la porosité avant et après carbonatation

L'augmentation de la quantité de pores de diamètres inférieurs à 10 nm et de ceux de diamètres situés dans l'intervalle [10 et 40] nm peut être expliquée principalement par la microfissuration dans ces intervalles formés lors de la précipitation des carbonates de calcium pendant la réaction de carbonatation. De plus, le CO_2 réagit non seulement avec la portlandite mais aussi avec les CSH, comme cela a été montré par la courbe DTG des GBR-C (figure 4.2.2.b), et c'est cette décalcification des CSH qui peut aussi augmenter la porosité dans ces plages de pores nanométriques. Des observations similaires ont été révélées dans les travaux de Miragliotta (Miragliotta, 2000), Sereng (Sereng, 2020) et Fang et Al. (Fang et al, 2020).

Une diminution notable de la porosité a été enregistrée au niveau des pores situés dans l'intervalle 40 et 10000 nm (0,04 et 10 μm), ce qui est dû principalement à leur colmatage par les carbonates de calcium formés.

La carbonatation a provoqué une hausse de la proportion de macropores dans les GBR-C par rapport aux GBR-F, en particulier pour les pores dont le diamètre excède 10 μm . Cette augmentation peut être expliquée par le largage de l'eau pendant la réaction de carbonatation.

Ainsi, lors de la précipitation du carbonate de calcium autour des cristaux de portlandite, l'eau générée durant la réaction reste piégée, car la couche de calcite formée, dense et peu perméable, limite sa diffusion vers l'extérieur. Cette différence d'humidité à l'intérieur (zone humide) et à l'extérieur (zone sèche) crée un gradient hydrique et une pression interne qui entraîne l'apparition de fissures à la surface des carbonates formés. Des résultats similaires ont été trouvés dans le travail de Kaddah (Kaddah, 2022).

2.4. Propriétés mécaniques

2.4.1. Résistance aux chocs et à l'usure

L'évaluation des propriétés mécaniques des granulats recyclés est indispensable avant leur utilisation dans les bétons, notamment lorsqu'ils sont utilisés en remplacement total des granulats naturels. Les résistances à la fragmentation et à l'usure des trois gravillons d'études (GN, GBR-F et GBR-C) déterminées par les essais Los Angeles et Micro Deval, ont été retenues comme essais fondamentaux. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.7.

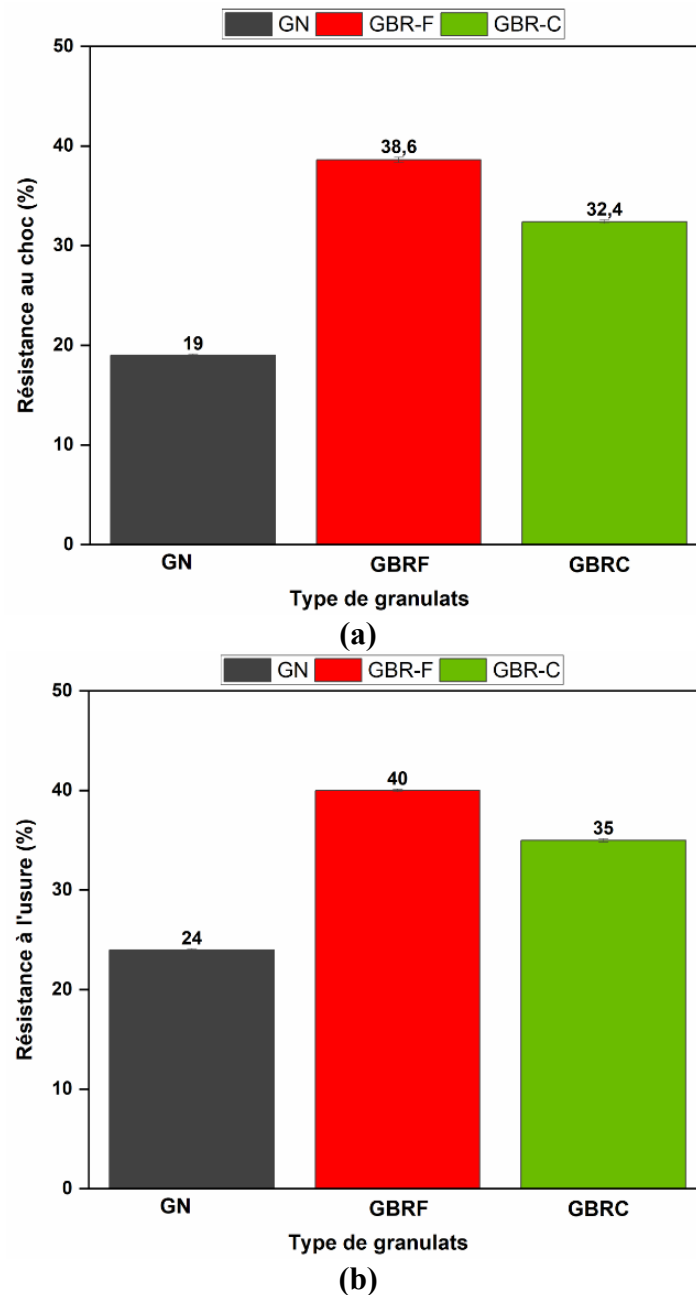


Figure 4.7. Évolution des résistances mécaniques des granulats recyclés après carbonatation (a). Résistance aux chocs (Los Angeles), (b). Résistance à l'usure (Micro Deval)

Comparés aux granulats recyclés provenant de bétons de démolition, les granulats naturels se distinguent par une résistance supérieure à la fragmentation et à l'abrasion, ce qui s'explique par leur structure compacte et uniforme. Alors que les gravillons recyclés sont moins résistants d'un point de vue mécanique, à cause de la présence de l'ancien mortier qui est poreux et moins dense, d'une part. Par ailleurs, l'interface de transition (ITZ) propre aux granulats recyclés, localisée entre le granulats naturel d'origine et le mortier ancien adhérent, représente une zone poreuse considérée comme un point de fragilité. Cette caractéristique participe également à l'affaiblissement de la résistance globale du granulats.

Après le traitement des gravillons recyclés, une amélioration notable des résistances mécaniques est estimée à 12,5 % pour la résistance à la fragmentation/chocs et 16% pour la résistance à l'usure, respectivement. Plusieurs explications peuvent être avancées pour développer cette augmentation de résistance. D'une part, la carbonatation transforme la portlandite et d'autres produits d'hydratation en carbonates de calcium, dont la formation favorise le comblement des pores. Cette réaction conduit à une densification du mortier et, par conséquent, à une augmentation de la densité des gravillons après carbonatation.

De plus, le $CaCO_3$ formé comble les vides et les fissures présents dans le gravillon et agit après précipitation à la surface des hydrates comme une couche protectrice vis-à-vis des chocs et des frottements, ce qui rend le granulats carbonaté plus résistant par rapport au granulats non traité.

Les améliorations observées concordent avec des travaux antérieurs. En particulier, Liang et al. (2019) ainsi que Zhang et al. (2015) ont mis en évidence une diminution de la valeur d'écrasement des granulats de béton de démolition soumis à la carbonatation, ce qui confirme les résultats obtenus dans la présente étude concernant l'augmentation de la résistance à la fragmentation et à l'usure des GBR-C par rapport aux GBR-F.

D'après l'analyse des résultats obtenus sur les GBR avant et après carbonatation, une relation nette entre la masse volumique et les propriétés mécaniques des granulats est mise en évidence et présentée à la figure 4.8. Celle-ci montre que l'augmentation de la masse des gravillons recyclés après carbonatation entraîne, par conséquent, une amélioration de leurs propriétés mécaniques.

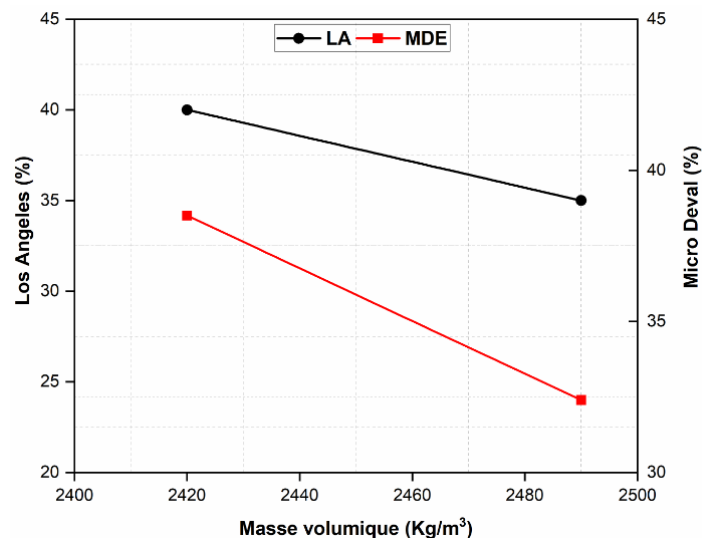


Figure 4.8. Relation entre l'augmentation de la masse volumique apparente des GBR-C et les indices de Los Angeles et de micro - Deval

3. PARTIE II. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAP À L'ÉTAT FRAIS

3.1. Compositions des BAP

Douze mélanges de BAP seront étudiés dans cette partie, neuf ont été préalablement caractérisés (chapitre III), en utilisant deux types de gravillons : le premier est d'origine naturelle (GN) et le deuxième est issu du béton démolé, utilisé à l'état frais (GBR-F) et incorporé dans les mélanges à 100%. Les trois autres formulations sont composées de 100 % de granulats recyclés carbonatés (GBR-C). Trois additions (FC, LG et PV) sont utilisées dans tous les mélanges, en conservant les proportions optimisées dans le troisième chapitre.

Les proportions de chaque constituant des BAP optimisés sont présentées dans le tableau 4.1

Tableau 4.1. Compositions des BAP optimisées

Groupe	BAP	Ciment (Kg)	Addition (Kg)	Eau (Kg)	SP (Kg)	S1 (Kg)	S2 (Kg)	GN (Kg)	GBR F (Kg)	GBR C (Kg)	E/L
BAP FC	BAP GN	350	180	189	5,83	525,5	310	784,4	-	-	0,36
	BAP GBRF	350	180	189	5,83	525,5	310	-	711,6	-	0,36
	BAPC GBRF	350	180	196	5,83	525,5	310	-	711,6	-	0,37
	BAP GBRC	350	180	189	5,83	525,5	310	-	-	731,6	0,36
BAP LG	BAP GN	350	150	189	5,83	525,5	310	784,4	-	-	0,38
	BAP GRF	350	150	189	5,83	525,5	310	-	711,6	-	0,38
	BAPC GBRF	350	150	196	5,83	525,5	310	-	711,6	-	0,39
	BAP GBRC	350	150	189	5,83	525,5	310	-	-	731,6	0,38
BAP PV	BAP GN	350	180	189	5,83	525,5	310	784,4	-	-	0,36
	BAP GRF	350	180	189	5,83	525,5	310	-	711,6	-	0,36
	BAPC GBRF	350	180	196	5,83	525,5	310	-	711,6	-	0,37
	BAP GBRC	350	180	189	5,83	525,5	310	-	-	731,6	0,36

La désignation et la description de chacun des mélanges de BAP étudiés est présenté dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2. Description des mélanges de BAP étudiés

Désignation du mélange	Description	Additions utilisées
BAP-GN	BAP contenant 100% de gravillons naturels	FC, PV, LG
BAP-GBRF	BAP contenant 100% de gravillons recyclés frais sans ajustement du dosage en eau	FC, PV, LG
BAPC-GBRF	BAP contenant 100% de gravillons recyclés frais avec ajustement du dosage en eau	FC, PV, LG
BAP GBRC	BAP contenant 100% de gravillons recyclés carbonatés	FC, PV, LG

Note : l'absorption d'eau des gravillons recyclés a diminué après leur traitement à la carbonatation, comme montré dans la première partie de ce chapitre. Grâce à cette diminution, il n'a pas été nécessaire d'augmenter le dosage en eau dans les formulations des BAP contenant 100 % GBR-C, contrairement aux formulations à base de 100 % GBR-F (BAPC-GBR-F).

3.2. Résultats à l'état frais

3.2.1. Étalement au cône d'Abrams

La figure 4.9 illustre les valeurs d'étalement des douze formulations étudiées.

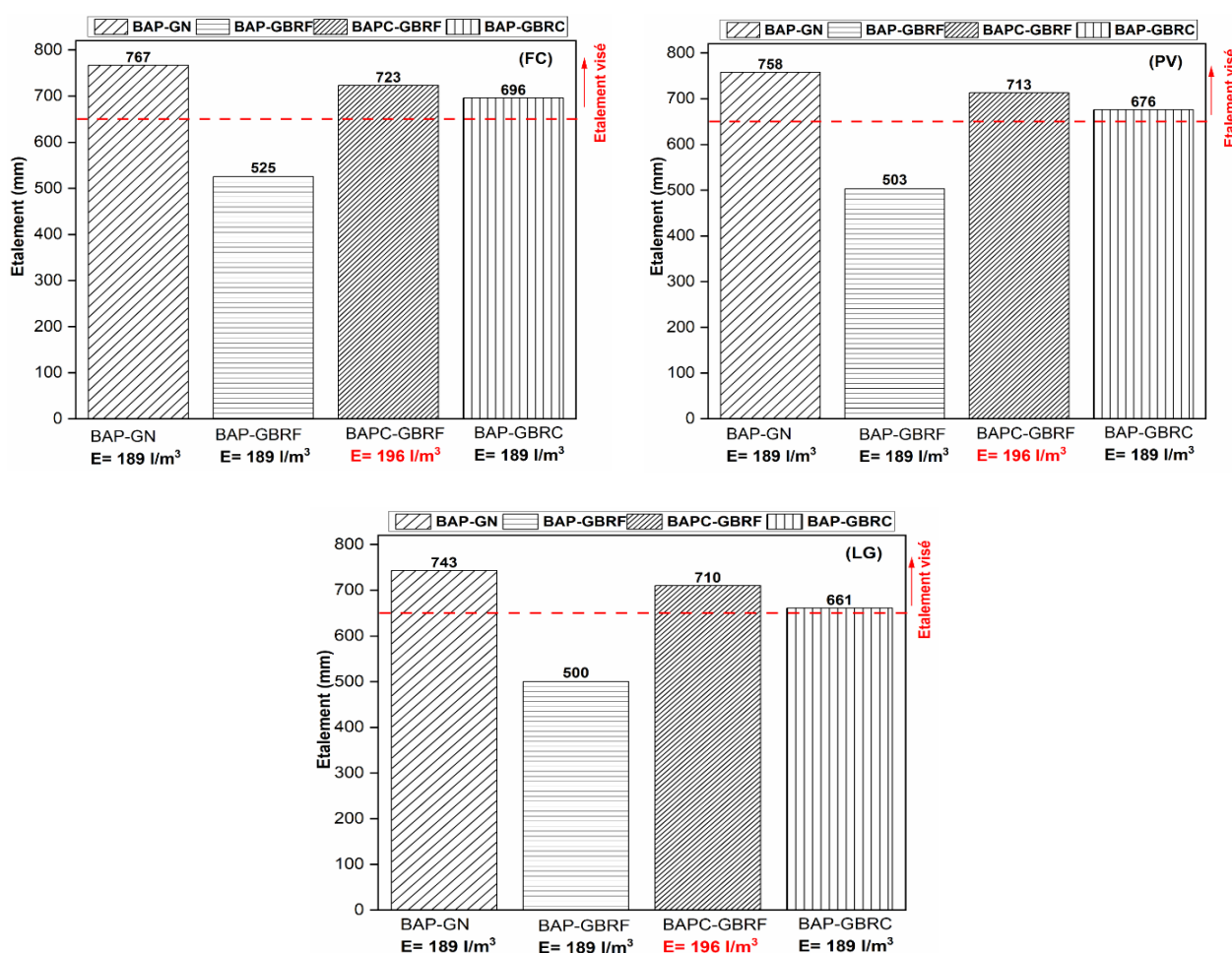


Figure 4.9. Variation de l'étalement en fonction du type de gravillon et d'addition minérale

Afin d'évaluer l'impact du traitement des gravillons recyclés à la carbonatation sur le comportement frais des BAP, les formulations de béton contenant ces gravillons ont été comparées avec celles de bétons (formulations optimales) étudiées précédemment dans le troisième chapitre de la thèse. À savoir : BAP avec 100% GN, BAP avec 100% GBR-F sans et avec ajustement au niveau du dosage en eau, et avec l'utilisation systématique des trois additions d'étude (FC, PV et LG).

L'effet du traitement des granulats recyclés par carbonatation est clairement observé sur l'amélioration de la fluidité des BAP-GBR-C par rapport aux BAP-GBR-F (formulations non corrigées). En effet, l'augmentation des valeurs d'étalement est de l'ordre de 32,6 %, 34,4 % et 32,2 %, pour les BAP additionnés avec le FC, la PV et le LG, respectivement. Ces résultats sont principalement dus aux améliorations apportées par les GBR-C, et cela a été confirmé par les essais de caractérisation, à travers l'augmentation de la masse des grains, qui traduit la réduction de leur porosité et, de ce fait, une réduction de la capacité d'absorption d'eau.

La baisse de la porosité s'est traduite par une diminution de 24 % de l'eau absorbée, ce qui a contribué à maintenir la quantité d'eau de gâchage disponible dans le mélange et, par conséquent, à améliorer la fluidité des BAP. Ce comportement est corroboré par plusieurs auteurs (Kou et Poon, 2012., Silva et al, 2014), qui soulignent que la forte absorption d'eau des granulats recyclés est due au volume élevé de pores capillaires présents dans le mortier résiduel collé au granulats d'origine. De ce fait, la réduction de cette porosité contribue fortement à la diminution de l'absorption d'eau et par conséquent le maintien de l'ouvrabilité des bétons. Des observations similaires ont été révélées par Tam et al (Tam et al, 2016), où l'utilisation des granulats recyclés carbonatés à des taux de 100%, a permis de garder une meilleure ouvrabilité des bétons, montrée par l'obtention des affaissements élevés par rapport aux bétons confectionnés avec des granulats recyclés non traités.

Indépendamment du type de gravillon utilisé, la variation des additions minérales exerce un effet non négligeable sur la fluidité des BAP. Les mêmes tendances relevées dans le troisième chapitre se retrouvent dans la série des BAP-GBR-C. Les bétons incorporant du filler calcaire ou de la poudre de verre affichent des valeurs d'étalement supérieures à celles obtenues avec les BAP contenant du laitier granulé. Cette différence s'explique par la nature du laitier granulé, qui constitue une addition réactive à caractère hydraulique latent et qui présente une demande en eau plus importante que celle du filler calcaire et de la poudre de verre.

3.2.2. Temps d'écoulement (T500)

La mesure du temps d'écoulement a été effectuée en parallèle de l'essai d'étalement. Les résultats du T500 sont présentés sur la figure 4.10.

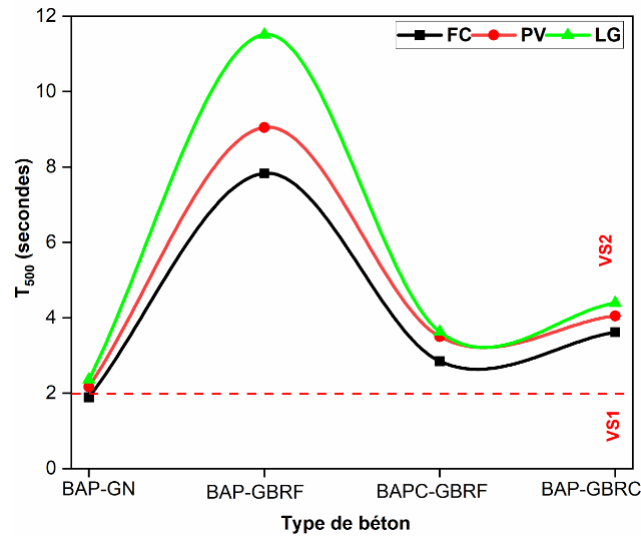


Figure 4.10. Effet des gravillons recyclés et des additions minérales sur le temps d'écoulement des BAP

Les BAP-GN ont des T_{500} très proches, quel que soit le type d'addition, même si le FC assure le T_{500} le plus faible (légèrement inférieur à 2 secondes), suivi par la poudre de verre et enfin le laitier granulé, en raison vraisemblablement de leur demande en eau différente.

L'utilisation des gravillons recyclés, qu'ils soient frais (GBR-F) ou carbonatés (GBR-C), augmente le temps d'écoulement pour l'ensemble des compositions de BAP, quel que soit le type d'addition utilisé. Les BAP-GBR-F affichent les valeurs de T_{500} les plus élevées, notamment dans le cas de l'emploi du laitier granulé, puis viennent ensuite ceux élaborés avec la poudre de verre et enfin avec le filler calcaire. L'effet des additions est le même quel que soit le type de granulat.

Après correction du dosage en eau, les T_{500} de BAPC-GBR-F ont baissé vers des valeurs inférieures à 4 secondes. Les mêmes explications avancées pour interpréter les résultats obtenus sur l'étalement peuvent être reconduites pour commenter les résultats sur le T_{500} .

La forte absorption d'eau des GBR-F est à l'origine de cette viscosité et, par conséquent, du T_{500} élevé. En réduisant l'absorption d'eau par la carbonatation des GBR, leur demande en eau diminue, et la viscosité diminue, par conséquent, les T_{500} diminuent de 53%, 55% et 61%, pour les BAP-GBRC avec FC, PV et LG, respectivement.

3.2.3. Taux de remplissage à la boîte en L (L-BOX)

Les résultats relatifs à l'aptitude au passage entre armatures, déterminés grâce à l'essai de la boîte en L, sont représentés sur la figure 4.11.

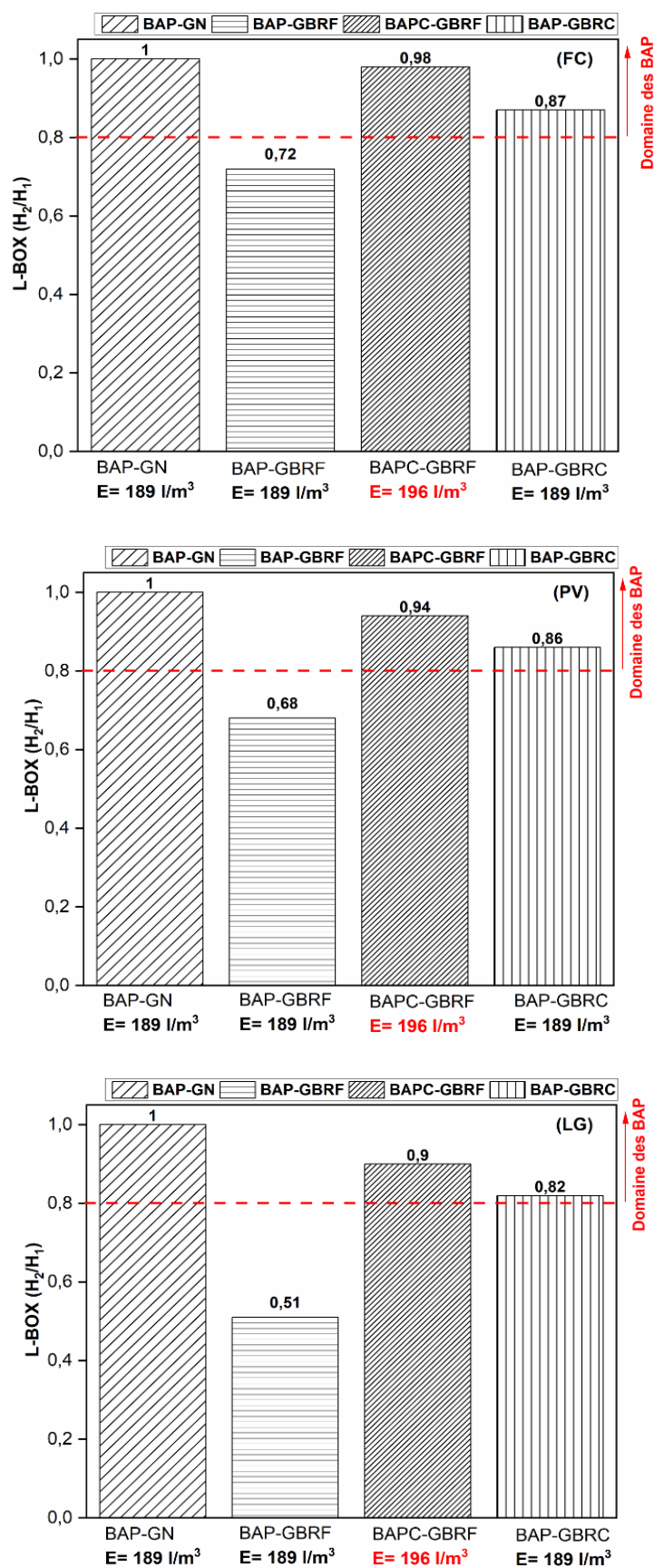


Figure 4.11. Variation du taux de remplissage à la boîte en L en fonction du type de gravillons et d'addition minérale

Les BAP-GN ont des valeurs du taux de remplissage égales et maximales quelles que soient les additions utilisées.

Les faibles taux de remplissage du BAP-GBR-F (0,72 – 0,68 et 0,51) avec l'addition de FC, PV et LG respectivement sont inférieurs aux valeurs préconisées par les normes ($H_2/H_1 \geq 0,8$). Deux facteurs peuvent expliquer l'influence des GBR sur les propriétés autoplaçantes des BAP :

D'une part, le caractère absorbant des GBR entraîne une insuffisance d'eau dans le mélange du BAP. Cet état provoque une diminution de la viscosité de la pâte, qui devient alors insuffisante pour entraîner les GBR ; c'est le cas des BAP-GBR-F.

D'autre part, l'état de surface rugueux des GBR dû au concassage provoque des frottements intergranulaires qui peuvent freiner, voire bloquer l'écoulement des BAP. Les observations que nous avons relevées sont corroborées par plusieurs auteurs (Kebaïli et al., 2015 ; Barroqueiro et al., 2019).

Dans une première approche, L'ajustement de la quantité d'eau introduite dans le mélange a permis de corriger les taux de remplissage et de les ramener à des valeurs de, 0,9 pour le BAPC(LG) et 0,94 pour le BAPC(PV) et 0,98 pour le BAPC(FC), on peut remarquer que la nature des additions influe sur le mélange selon leur besoin en eau. En effet, le laitier granulé donne le plus faible taux de remplissage, suivi par la poudre de verre et le FC qui garantit le meilleur taux de remplissage en raison de sa plus faible demande en eau.

Toutefois, si l'ajustement du dosage en eau a compensé l'eau absorbée par les GBR et a permis de rattraper la fluidité des mélanges et d'assurer l'écoulement sans blocage des BAP, cette option n'apparaît pas comme la plus appropriée en ce qui concerne les impacts sur la résistance mécanique et la durabilité des bétons.

En revanche, les granulats carbonatés ont donné de meilleurs résultats sans ajustement du dosage en eau. En effet, les BAP-GBR-C ont des taux de remplissage (H_2/H_1) bien meilleurs avec des augmentations de 20,8 %, 26,5 % et 60,7 % par rapport aux BAP-GBR-F (non corrigés) respectivement avec l'addition de FC, PV et LG.

La carbonatation a réduit la porosité des GBR et par conséquent leur pouvoir d'absorption d'eau, ce qui a permis de préserver une quantité d'eau de gâchage suffisante pour garantir une viscosité optimale de pâte.

3.2.4. Stabilité au tamis

La figure 4.12 présente les résultats de la caractérisation des bétons vis-à-vis des risques de ségrégation, telle qu'évaluée par l'essai de stabilité au tamis.

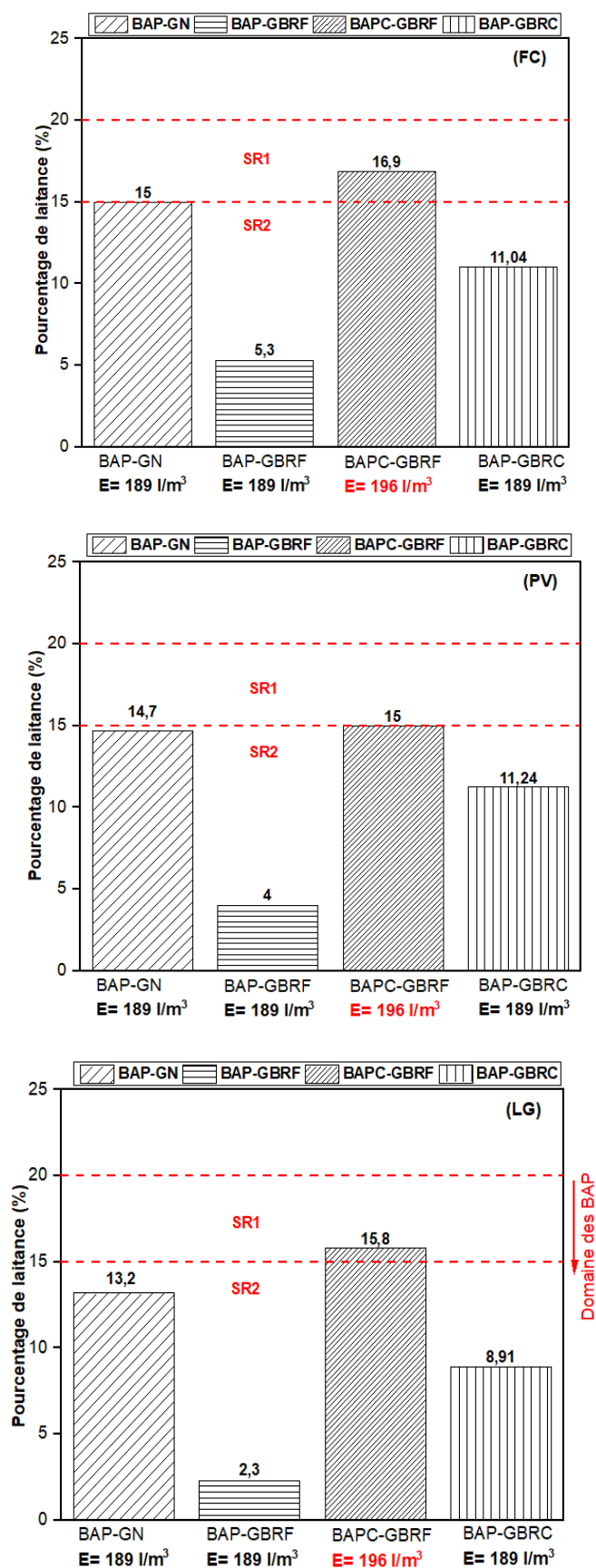


Figure 4.12. Résultats de la stabilité au tamis en fonction du type de gravillons et additions minérales

Toutes les formulations étudiées affichent des taux de laitance inférieurs ou égaux à 15 % ; cela indique que les bétons présentent une stabilité satisfaisante, sans risque de ségrégation ni de ressuage, et ce pour l'ensemble des additions considérées. Seul le BAPC-GBRF qui a subi un ajustement du dosage en eau est caractérisé par des quantités de laitance de 16,9 %, 15% et 15,8 %, avec addition de FC, PV et LG, respectivement.

Le BAP-GBRF est caractérisé par un faible taux de laitance ($SR = 2,3 \%$), ce qui peut être expliqué par un manque d'eau dans le béton, dû à l'absorption d'eau par les GBR. Ce caractère entraîne une mise en œuvre difficile et une altération de la qualité du parement après le coulage (Cussigh et al, 2003).

Les formulations à base de GBR-C présentent des résultats satisfaisants : 11,04 % (FC), 11,24 % (PV) et 8,91 % pour le LG. En effet, le processus de carbonatation a entraîné une diminution de la porosité des gravillons recyclés, réduisant ainsi leur capacité à absorber l'eau.

3.2.5. Masse volumique et air occlus

Les résultats sur la masse volumique à l'état frais des différentes compositions de BAP, en fonction du type de gravillon (GN, GBR-F et GBR-C) et des ajouts utilisés (FC, PV et LG), sont présentés sur la figure 4.13.

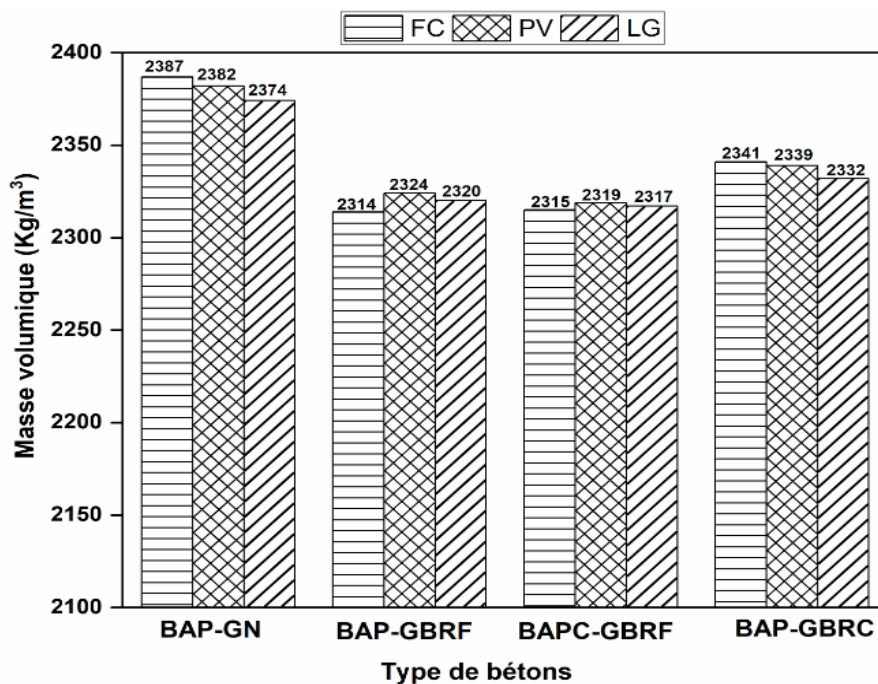


Figure 4.13. Masse volumique des BAP à l'état frais selon le type de gravillon et d'addition minérale

Les BAP-GN ont les masses volumiques les plus élevées, contrairement aux BAP-GBR, qui ont les masses volumiques les plus faibles. La masse volumique des GN est supérieure à celle

des GBR qui se caractérisent par une plus forte porosité et la présence de mortier dont la masse volumique est inférieure à celle du granulats naturel.

Toutefois, une amélioration relative est observée dans les formulations de BAP contenant des GBR-C, comparativement à celles contenant des GBR-F, et ce qu'elle que soit le type d'addition utilisée (FC, PV et LG). En effet, cette amélioration s'explique principalement par la précipitation de carbonates de calcium dans les pores du mortier résiduel des GBR, entraînant une augmentation de leur masse volumique, laquelle se répercute ensuite sur la densité des bétons. En effet, il est bien établi que la masse volumique des bétons est influencée par la porosité, la taille et la forme des granulats (Jarvenpaa, 2011).

Bien qu'une différence notable ne soit observée sur l'évolution de la masse volumique en fonction du type d'addition utilisé. Une légère diminution est remarquée sur la série des BAP contenant le laitier granulé par rapport aux deux autres additions. Cet effet peut être expliqué par le dosage optimisé du LG relativement plus faible (150 kg/m^3) que le dosage du FC et du PV (180 kg/m^3).

Les mesures de la masse volumique ont été couplées parallèlement à la mesure de la teneur en air occlus du béton frais, dont les résultats sont affichés sur la figure 4.14.

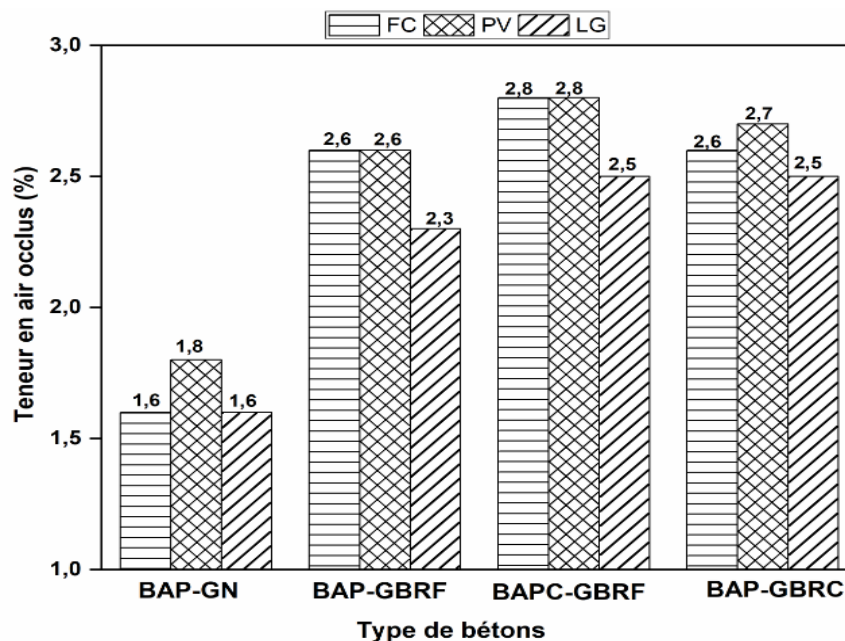


Figure 4.14. Teneur en air occlus des bétons frais en fonction du type de gravillon et des ajouts utilisés

On peut conclure que le remplacement des gravillons naturels par les granulats recyclés, qu'ils soient frais ou carbonatés, entraîne une augmentation de la teneur en air occlus.

Ce résultat s'explique par l'influence des propriétés propres des GBR : leur surface rugueuse, angulaire et poreuse, favorise la formation des espaces où l'air reste piégé. De plus, leur absorption d'eau élevée entraîne une consommation de l'eau de gâchage, entraînant une

augmentation de la viscosité de la pâte empêchant ainsi les bulles d'air formées lors du malaxage de béton de s'échapper.

L'utilisation des GBR-C n'a pas entraîné une réduction significative de la teneur en air occlus, en particulier dans les formulations contenant du LG et de la PV. Le résultat indique que malgré les améliorations apportées par le traitement en termes d'augmentation de masse, de diminution de porosité et d'absorption, l'effet sur la présence de l'air dans le béton reste limité, probablement dû au maintien de la texture rugueuse de ces derniers.

4. SYNTHÈSE

Les résultats des tests réalisés sur les gravillons d'étude, présentés dans la première partie du chapitre, font apparaître l'effet marqué du traitement de la carbonatation sur les caractéristiques des granulats recyclés.

- D'un point de vue microstructural, l'analyse thermogravimétrique couplée aux observations microscopiques met en évidence la formation de phases carbonatées (carbonates de calcium) au détriment des produits d'hydratation, notamment la portlandite et les CSH, confirmée principalement par la présence des pics de ces hydrates sur la courbe DTG des GBR-F et leur absence sur la courbe DTG des GBR-C.
- D'un point de vue physique, la précipitation des carbonates de calcium à l'intérieur de l'ancien mortier résiduel des GBR-C a entraîné une augmentation de leurs masses volumiques par rapport aux GBR-F, ce qui a engendré une diminution de leur coefficient d'absorption et de leur porosité évaluée à travers l'essai de l'intrusion de mercure.
- Sur le plan mécanique, les valeurs des indices de Micro Deval et de Los Angeles enregistrent une diminution après traitement des GBR à la carbonatation.

L'analyse de l'effet du remplacement des granulats naturels par des gravillons recyclés carbonatés dans les BAP a conduit aux conclusions suivantes :

- Une amélioration nette de la fluidité a été observée, indiquée principalement par l'amélioration des paramètres d'autoplaçance, pour les trois additions utilisées (FC, PV et LG).
- Le traitement des GBR par carbonatation a entraîné une diminution de la porosité, ce qui a engendré l'augmentation de la masse volumique des GBR et des BAP frais qui les contiennent, contrairement au BAP composé de GBR-F. Ce qui montre l'effet favorable de la carbonatation sur les GBR par l'amélioration de leur compacité.
- L'essai de mesure de la teneur en air occlus a montré que le traitement des GBR n'a pas d'effet significatif sur la présence des bulles d'air dans les bétons frais. Du fait que, les valeurs de mesure obtenues sur les BAP-GBRC sont quasiment les mêmes que les BAP à base de GBRF. Ce qui nous a permis de constater que la texture rugueuse des granulats recyclés n'est pas affectée par la carbonatation et constitue l'un des principaux facteurs qui gouvernent la teneur en air occlus des bétons.

CHAPITRE IV

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

B

Barroqueiro, T., da Silva, P. R., & De Brito, J. (2019). Fresh-state and mechanical properties of high-performance self-compacting concrete with recycled aggregates from the precast industry. *Materials*, 12(21), 3565. <https://doi.org/10.3390/ma12213565>

C

Cussigh, F., Sonebi, M., & De Schutter, G. (2003, August). Project testing SCC-segregation test methods. In *Proceedings of the third international, RILEM conference on SCC*, Reykjavik, Islande (pp. 311-322).

D

Duan, Z., Zhao, W., Ye, T., Zhang, Y., & Zhang, C. (2022). Measurement of Water Absorption of Recycled Aggregate. *Materials*, 15(15), 5141. <https://doi.org/10.3390/ma15155141>

Dos Reis, G. S., Cazacliu, B. G., Artoni, R., & Torrenti, J. M. (2020). Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process. *Journal of CO2 Utilization*, 39, 101181.

F

Fang, X., Zhan, B., & Poon, C. S. (2020). Enhancing the accelerated carbonation of recycled concrete aggregates by using reclaimed wastewater from concrete batching plants. *Construction and Building Materials*, 239, 117810.

J

Järvenpää, H. (2001). Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects on concrete. Dissertation for degree of Doctor, Helsinki University of Technology *Journal of cleaner production*, 99, 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>

K

Kaddah, F. (2022). Étude multi-échelles de la carbonatation des granulats de béton recyclé: nouvelles méthodes de caractérisation et modélisation (Doctoral dissertation, École centrale de Nantes).

Kebäili, O., Mouret, M., Arabi, N., & Cassagnabere, F. (2015). Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example. *Journal of Cleaner Production*, 87, 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.077>

Kou, S. C., & Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and building materials*, 35, 69-76.

L

Liang, C., Lu, N., Ma, H., Ma, Z., & Duan, Z. (2020). Carbonation behavior of recycled concrete with CO₂-curing recycled aggregate under various environments. *Journal of CO2 Utilization*, 39, 101185.

M

MEFTAH, H. (2018). Contribution à étude du Comportement à Haute Température des Bétons de Granulats Recyclés, Renforcés de Fibres de Polypropylène. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

Miragliotta, R. (2000). Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués: prise en compte des effets de paroi (Doctoral dissertation, La Rochelle).

O

Oral, Ç. M., & Ercan, B. (2018). Influence of pH on morphology, size and polymorph of room temperature synthesized calcium carbonate particles. *Powder technology*, 339, 781-788.

S

Sereng, M., Djerbi, A., Omikrine, M. O., Dangla, P., & Torrenti, J. M. (2019). Effet de la carbonatation sur les granulats recyclés et le coefficient d'absorption d'eau. *Academic Journal of Civil Engineering*, 37(1), 110-114

Silva, T. M., Nascimento, C. F. G., Teixeira, I. A. R., Lima, K. P. B. A., Fernandes, I. V., Oliveira, M. C. B. M., ... & Delgado, J. M. P. Q. (2024). Enhancing the physical performance of concrete containing construction and demolition waste against the effects of accelerated carbonation and chloride ingress. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(2), 84.

T

Tam, V. W., Tam, C. M., & Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82-101.

Thiery, M., Villain, G., Goyer, S., Platret, G., Clement, J. L., & Dangla, P. (2007). Exemple d'application d'un modèle de carbonatation in situ. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, (270-271), pp-29.

Tong, J., Ding, Y., Lv, X., & Ning, W. (2023). Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical properties of 3D printed recycled concrete. *Journal of Building Engineering*, 80, 107959.

X

Xiao, J., Zhang, H., Tang, Y., Deng, Q., Wang, D., & Poon, C. S. (2022). Fully utilizing carbonated recycled aggregates in concrete: Strength, drying shrinkage and carbon emissions analysis. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134520.

Z

Zhang, J., Shi, C., Li, Y., Pan, X., Poon, C. S., & Xie, Z. (2015). Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 98, 1-7.

CHAPITRE V

COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET DURABILITÉ DES BAP : EFFET DES GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS ET CARBONATÉS ET DES ADDITIONS MINÉRALES

CHAPITRE V

COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET DURABILITÉ DES BAP : EFFET DES GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS ET CARBONATÉS ET DES ADDITIONS MINÉRALES

À la fin de cette thèse, le dernier chapitre présente une étude à l'état durci, portant sur l'évaluation des propriétés mécaniques et de durabilité des BAP optimisés, réalisée à l'aide d'essais accélérés.

Cette analyse vise à déterminer leur aptitude à un usage durable dans le domaine de la construction.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	150
2. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES BAP	150
2.1 Résistance mécanique en compression	150
2.2 Module de déformation dynamique	153
3. DURABILITÉ DES BAP.....	155
3.1 Absorption d'eau par capillarité	155
3.2 Porosité accessible à l'eau	159
3.3 Perméabilité à l'air.....	160
3.4 Carbonatation accélérée.....	163
3.4.1 Profondeur de carbonatation.....	163
3.4.2 Suivi de masse	165
4. SYNTHÈSE.....	166
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	168

CHAPITRE V

COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET DURABILITÉ DES BAP : EFFET DES GRAVILLONS RECYCLÉS FRAIS ET CARBONATÉS ET DES ADDITIONS MINÉRALES

1. INTRODUCTION

L'évaluation des propriétés mécaniques et de durabilité des bétons constitue une approche qualitative pour valider leur emploi et préciser les domaines d'utilisation conformément aux exigences. Dans ce contexte, le présent chapitre de la thèse est consacré à l'étude de l'effet de la substitution totale des gravillons naturels (GN) par des gravillons recyclés (GBR) issus de la démolition d'un ancien bâtiment, utilisés à l'état frais (GBR-F) et à l'état traité par carbonatation naturelle (GBR-C). L'effet de ces gravillons est analysé, avec l'influence des additions minérales (FC, PV et LG), sur les propriétés des BAP.

Du point de vue mécanique, l'évaluation est basée sur la détermination de la résistance mécanique en compression et du module de déformation dynamique. L'évaluation de la durabilité a été réalisée par le choix de plusieurs indicateurs représentatifs du comportement des BAP à court et à long terme, notamment l'absorption d'eau capillaire, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'air et l'essai de carbonatation accéléré.

Les BAP GN, les BAPC-GBR-F et les BAP GBR-C ont été retenus pour la caractérisation, alors que le BAP-GBRF ne sera pas caractérisé car il n'a pas satisfait aux critères d'autoplaçance.

2. CARACTÉRISATION MÉCANIQUES DES BAP

2.1. Résistance mécanique en compression

La figure 5.1 montre les résultats de la résistance à la compression obtenus pour l'ensemble des formulations des BAP d'étude, aux échéances de 2, 7, 28, 90 et 365 jours.

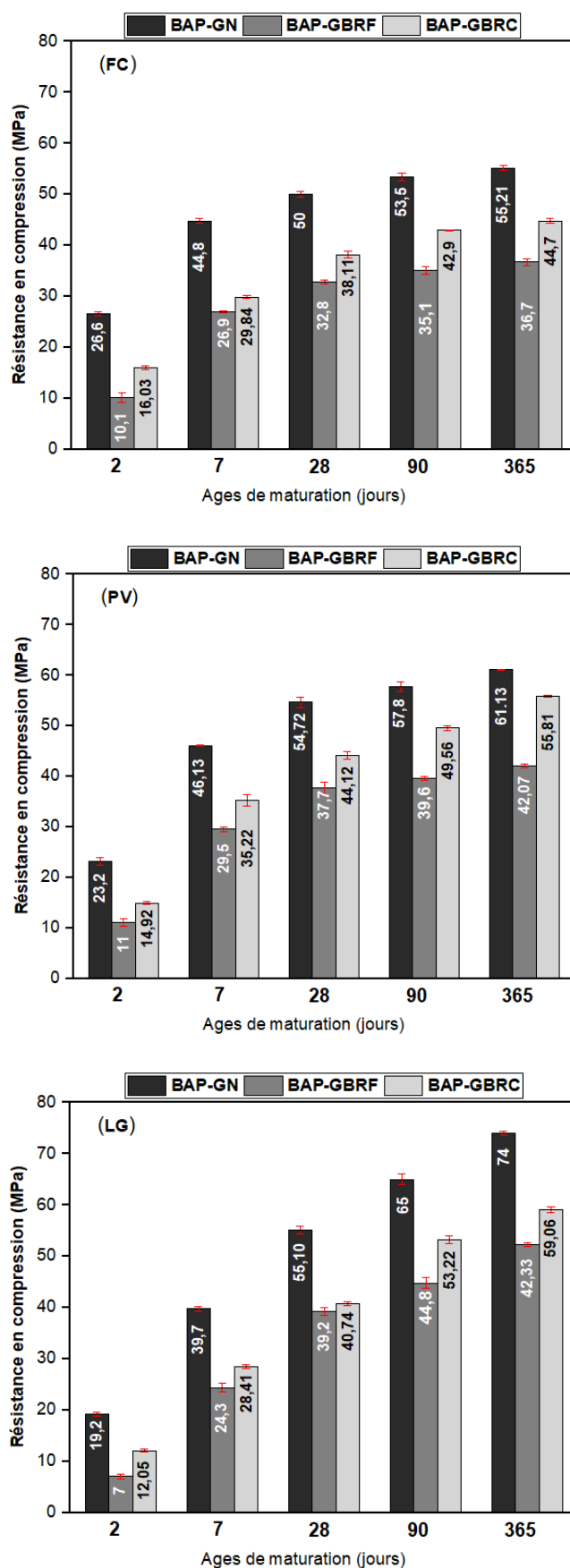


Figure 5.1. Évolution des résistances mécaniques en compression : effet du gravillon et des additions

Plusieurs enseignements peuvent être tirés en se référant aux résultats présentés ci-dessus :

Les BAP-GN formulés avec 100% de gravillons naturels présentent les meilleures résistances, et ce, pour les trois additions utilisées (FC, PV et LG), quelle que soit l'échéance de mesure.

La baisse de la résistance en compression des BAP-GBR-F s'explique essentiellement par la qualité inférieure des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels. Ces résultats sont corroborés par plusieurs auteurs (Poon et al., 2004 ; Tabsh et Abdelfatah, 2009 ; Amara, 2022).

Néanmoins, une amélioration notable des résistances est observée lors de l'utilisation des gravillons recyclés carbonatés. En effet, à 90 jours, une augmentation de la résistance de l'ordre de 22%, 25% et 19% est enregistrée pour les BAP-GBR-C par rapport à ceux contenant des GBR-F, avec les additions utilisées, le FC, la PV et le LG, respectivement.

Ces gains de résistance sont très probablement dus aux améliorations des propriétés physiques et mécaniques des GBR après leur carbonatation. La formation de carbonate de calcium ($CaCO_3$) principalement dans l'espace poreux du mortier résiduel des GBR, entraîne plusieurs effets bénéfiques, notamment, le remplissage des vides, qui accroît la masse volumique, la résistance aux chocs et à l'usure des GBR et la diminution de la capacité d'absorption d'eau, confirmée par la diminution du pourcentage des pores, mesurés par intrusion de mercure (MIP). De ce fait, le mortier résiduel initialement considéré comme le maillon faible lors des sollicitations mécaniques subit un renforcement structurel et ne constitue plus une zone de fragilité significative.

Liang et al (Liang et al, 2020) ont montré que la résistance en compression des bétons contenant des granulats recyclés carbonatés, qu'ils soient fins ou gros, est supérieure à celle des bétons formulés avec des granulats recyclés non carbonatés. De même, il a été montré par Bao Lu et al (Bao Lu et al, 2019), que l'utilisation des gros granulats recyclés carbonatés en remplacement total des GN permet d'améliorer la résistance à la compression des bétons de 32,9% par rapport à ceux contenant 100% de gros granulats recyclés non carbonatés, ce qui montre l'intérêt de la carbonatation dans l'amélioration de la qualité des GBR.

Outre l'effet du type de granulats, la nature inerte ou réactive des additions joue un rôle significatif sur l'évolution des résistances mécaniques en compression des BAP étudiés. Comme attendu, à jeune âge (2 jours), les résistances mécaniques obtenues par l'emploi du filler calcaire et de la poudre de verre sont supérieures à celles obtenues par l'emploi du laitier granulé, en raison de son caractère latent (Behim, 2005, Bellara, 2022).

À 7 jours, les résistances les plus élevées ont été obtenues par l'emploi de la poudre de verre, et ce pour les trois séries de BAP contenant des GN, des GBR-F et des GBR-C. La PV est potentiellement pouzzolanique et sa finesse est plus développée que celle du filler calcaire qui est chimiquement inerte.

En effet, en raison de sa réactivité pouzzolanique, la silice amorphe provenant de la poudre de verre réagit avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment, en présence d'eau, favorisant ainsi la naissance des produits d'hydratation secondaires, notamment les CSH.

À 28 jours, les BAP contenant la poudre de verre présentent des résistances proches de celles des BAP contenant du laitier granulé. Cependant, à long terme (90 et 365 jours), ce sont les BAP formulés avec du LG qui développent les meilleures résistances. En effet, même à un dosage inférieur aux FC et PV, le pouvoir hydraulique latent du LG est garanti. Au fur et à mesure de l'hydratation du ciment, l'activation alcaline de la solution interstitielle est assurée, principalement par la présence de la portlandite. Comme connu, cette activation est la condition principale pour déclencher la réactivité du LG avec l'eau, produisant ainsi des hydrates supplémentaires, qui comblent progressivement les pores du béton, améliorant ainsi sa compacité, et par conséquent, sa résistance mécanique à long terme. Des observations similaires ont été révélées dans le travail d'Ali boucetta (Ali boucetta, 2021).

2.2. Module de déformation dynamique

Les performances mécaniques des neuf BAP étudiés ont été également évaluées à travers la mesure des modules d'élasticité dynamique (essai non destructif). Les résultats présentés dans la figure 5.2 montrent que les valeurs des modules de déformation augmentent avec le temps de conservation, et ce, pour l'ensemble des formulations, traduisant la progression continue de l'hydratation.

Les valeurs les plus élevées sont obtenues pour les BAP à base de gravillons naturels. Leur remplacement par des gravillons recyclés non traités entraîne une diminution significative des valeurs du module de déformation, traduite par l'augmentation du temps de passage des ondes ultrasonores. Les baisses enregistrées à 28 jours de conservation humide sont de l'ordre de 40%, 21,81 % et 24,36 %, respectivement pour les séries de BAP contenant le FC, la PV et le LG.

Ces résultats peuvent être principalement expliqués par les propriétés moindres des GBR-F, notamment leur porosité et leur absorption d'eau accrues, leur faible masse volumique, ainsi que leur faible résistance mécanique. Les mêmes tendances de résultats et d'explications ont été rapportées par Meftah (Meftah, 2018), qui souligne que la diminution des valeurs des modules d'élasticité est fortement influencée par les caractéristiques mécaniques des GBR, précisant que le coefficient de Los Angeles passe de 24 % pour les GN à 35% pour les GBR.

Parallèlement aux améliorations révélées sur la résistance en compression des BAP contenant des GBR carbonatés. Des augmentations notables des valeurs du module de déformation dynamique ont également été observées pour les trois types d'additions étudiées.

De la même manière que pour l'analyse de la résistance en compression, l'amélioration des propriétés physico-mécaniques des GBR après carbonatation peut être attribuée au comblement des pores présents dans le mortier résiduel par les carbonates de calcium, ce qui a entraîné un accroissement de leur compacité.

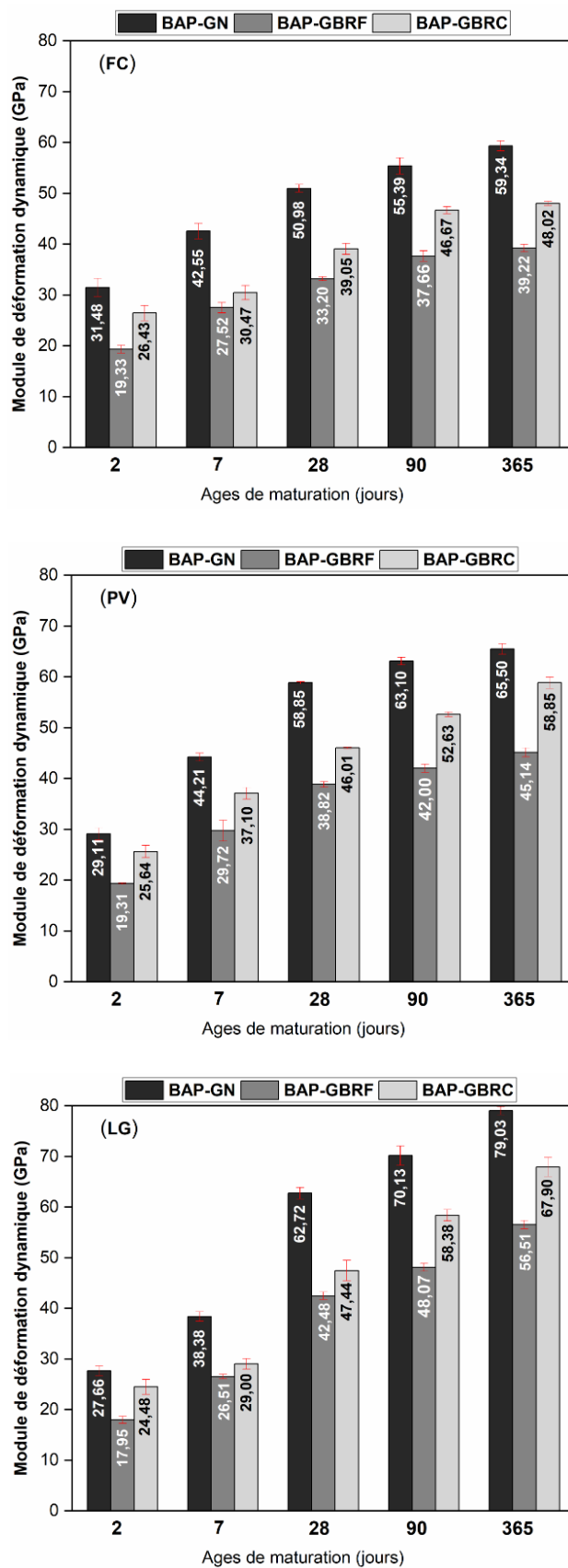


Figure 5.2. Évolution des modules d'élasticité dynamique en fonction du type de gravillons et des additions utilisés

Li et al (Li et al, 2017), ont étudiés la variation du module de déformation dynamique et ils ont conclu que, le béton contenant des granulats recyclés carbonatés présente des valeurs de module supérieure à celle du béton contenant des granulats recyclés non traités, traduisant ainsi une meilleure rigidité du béton, due principalement par les améliorations des propriétés des granulats après traitement. Également, selon l'étude menée par Wang et al (Wang et al, 2021), où les auteurs ont procédé au traitement des GBR par carbonatation accéléré et ils ont rapporté que le traitement conduit à l'obtention des valeurs du module de déformation dynamique plus élevées que ceux fabriqués avec des granulats recyclés non traités, et ils suggèrent également que ces améliorations sont principalement attribuées à la réduction de la porosité interne des granulats, provoquée par le remplissage des vides par les produits de carbonatation.

La contribution des additions minérales utilisées à l'évolution des modules de déformation dynamique suit une tendance similaire à la résistance en compression. À un jeune âge (2 jours), les meilleures valeurs sont obtenues par l'utilisation du FC et de la PV.

À 7 jours, l'activité pouzzolanique potentielle de la PV entraîne une augmentation des modules de déformation, dépassant les valeurs obtenues par l'utilisation du FC et du LG. Néanmoins, à long terme, notamment à 90 jours et à une année, l'effet hydraulique du laitier devient plus dominant, garantissant les meilleurs résultats.

3. DURABILITE DES BAP

3.1. Absorption d'eau par capillarité

L'essai vise à évaluer la capacité du béton à absorber l'eau par succion capillaire à travers sa porosité ouverte. Les résultats obtenus pour les différentes formulations de BAP sont présentés sur la figure 5.3. L'absorption a été mesurée sur des éprouvettes ayant subi des cures de 28, 60 et 90 jours, afin de favoriser l'hydratation du laitier.

Les BAP-GN ont les coefficients d'absorption les plus faibles en raison de la qualité des granulats naturels compacts, suivis par les BAP-GBR-C dont les granulats sont recyclés mais carbonatés et enfin les BAPC-GBR-F dont les granulats sont chargés de vieux mortier et poreux.

Les additions influencent aussi le pouvoir d'absorption d'eau capillaire des différents types de BAP ; ainsi, le filler calcaire, dont l'interaction avec la matrice cimentaire se limite à des effets physiques de germination hétérogène et de remplissage, présente les performances les plus faibles. En revanche, la poudre de verre et le laitier granulé, qui développent en plus des réactions chimiques pouzzolaniques pour la poudre de verre et hydrauliques latentes pour le laitier, offrent les meilleures performances. Cette amélioration est particulièrement marquée pour les BAP contenant du laitier granulé, qui présentent les meilleurs résultats à partir de 60 jours de cure.

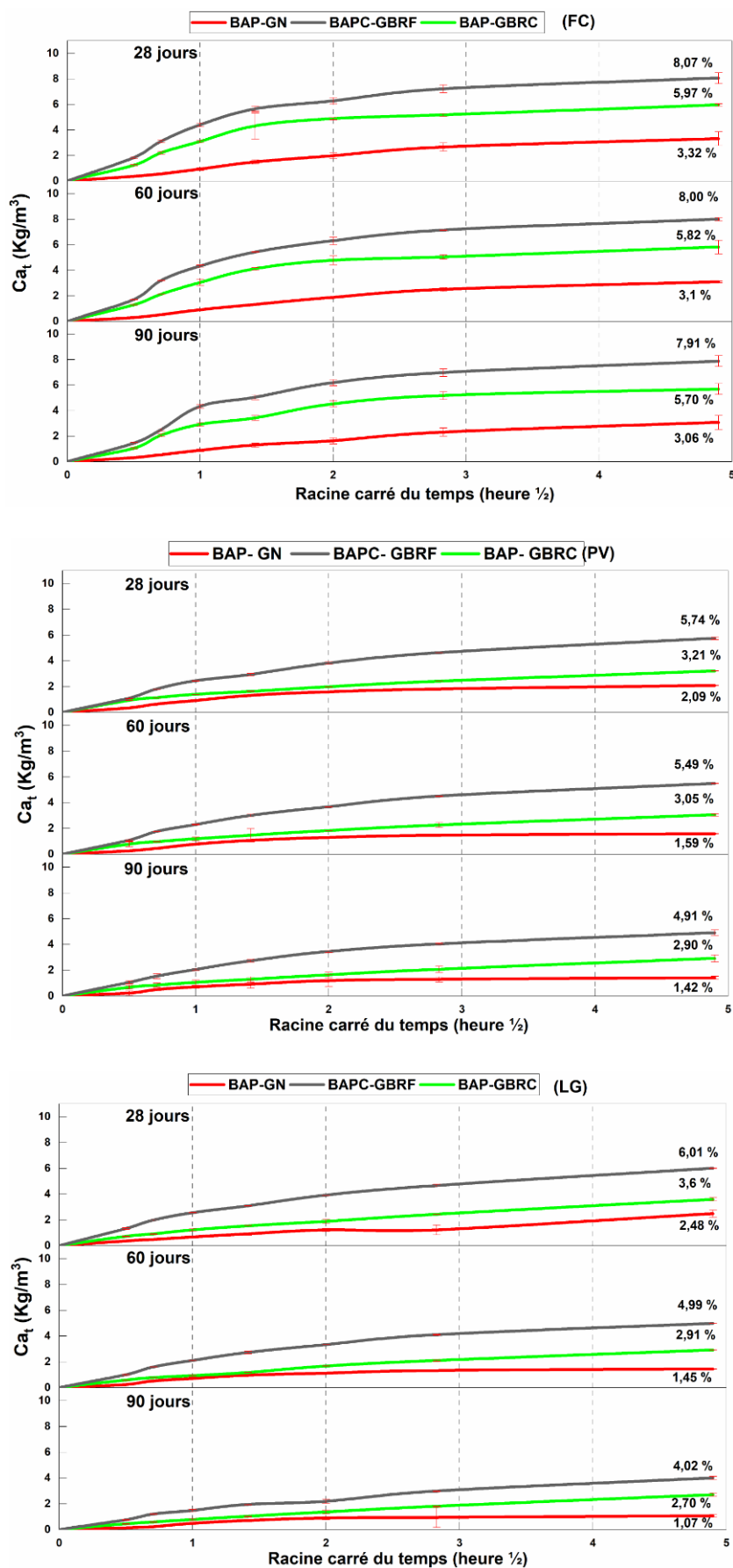


Figure 5.3. Absorption d'eau par capillarité des BAP optimisés

Les courbes d'absorption d'eau capillaire (figure 5.3) des BAPC-GBR-F-FC et des BAP-GBR-C-FC montrent deux phases d'absorption : une première phase d'absorption relativement plus rapide que la deuxième, correspondant aux plus gros pores. La deuxième phase est plus lente, regroupant les pores plus fins. Les pores sont composés de pores de la matrice cimentaire et de GBR. La courbe d'absorption d'eau du BAP-GN-FC ne montre de façon nette la présence de deux phases.

L'utilisation des GBR-C entraîne une diminution du coefficient ainsi que de la cinétique d'absorption d'eau, notamment durant la première phase située entre 1 et 8 heures. Ce résultat est principalement dû au colmatage de la porosité des gravillons par le carbonate de calcium formé lors de la réaction de la carbonatation.

À 90 jours de conservation, les diminutions enregistrées à 24 h pour les BAP-GBR-C par rapport aux BAP-GBR-F sont respectivement de l'ordre de 27,93 % pour les BAP-FC, 40,91 % pour les BAP-PV et 32,84 % pour les BAP-LG. Les travaux menés par Xuan (Xuan, 2017), Russo et Lollini (Russo et Lollini, 2022) sont en accord avec ces résultats. Les auteurs ont attribué la diminution des coefficients d'absorption du béton contenant des GBR carbonatés principalement à la densification de la structure poreuse de ces granulats.

Il est également important de noter que la différence des rapports E/C des formulations contenant les GBR-F par rapport aux BAP-GN et BAP-GBR-C contribue à l'augmentation du coefficient d'absorption d'eau (Mehta et Monteiro, 2014).

En plus de la détermination des coefficients d'absorption capillaire, la sorptivité a également été évaluée dans le but d'analyser l'influence des différents paramètres étudiés, à savoir : le remplacement des GN par des GBR-F et par des GBR-C, et la nature des additions minérales, ainsi que la prolongation de la durée la cure humide des éprouvettes, sur la vitesse d'absorption. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 5.4.

Plusieurs approches explicatives peuvent être mises en évidence à partir des résultats présentés :

Les BAP formulés avec le filler calcaire, qui contiennent des GN, des GBR-F ou des GBR-C, présentent des vitesses d'absorption plus élevées que celles des BAP contenant la poudre de verre ou du laitier granulé. Traduisant ainsi l'effet bénéfique des additions réactives, qui favorisent le développement supplémentaire des C-S-H, contribuant au raffinement de la porosité. Les mêmes constatations ont été révélées dans le travail d'Ali Boucetta (Ali Boucetta, 2014).

Par ailleurs, la porosité des GBR lorsqu'ils sont utilisés à l'état frais facilite le déplacement de l'eau par remontée capillaire. Toutefois, leur comblement par le carbonate de calcium formé lors de la réaction de carbonatation a permis de limiter ce phénomène (BAP-GBR-C), indiqué par la diminution des vitesses d'absorption pour l'ensemble des formulations (FC, PV et LG) ; ces résultats sont corroborés par ceux de Russo et Lollini (Russo et Lollini, 2022).

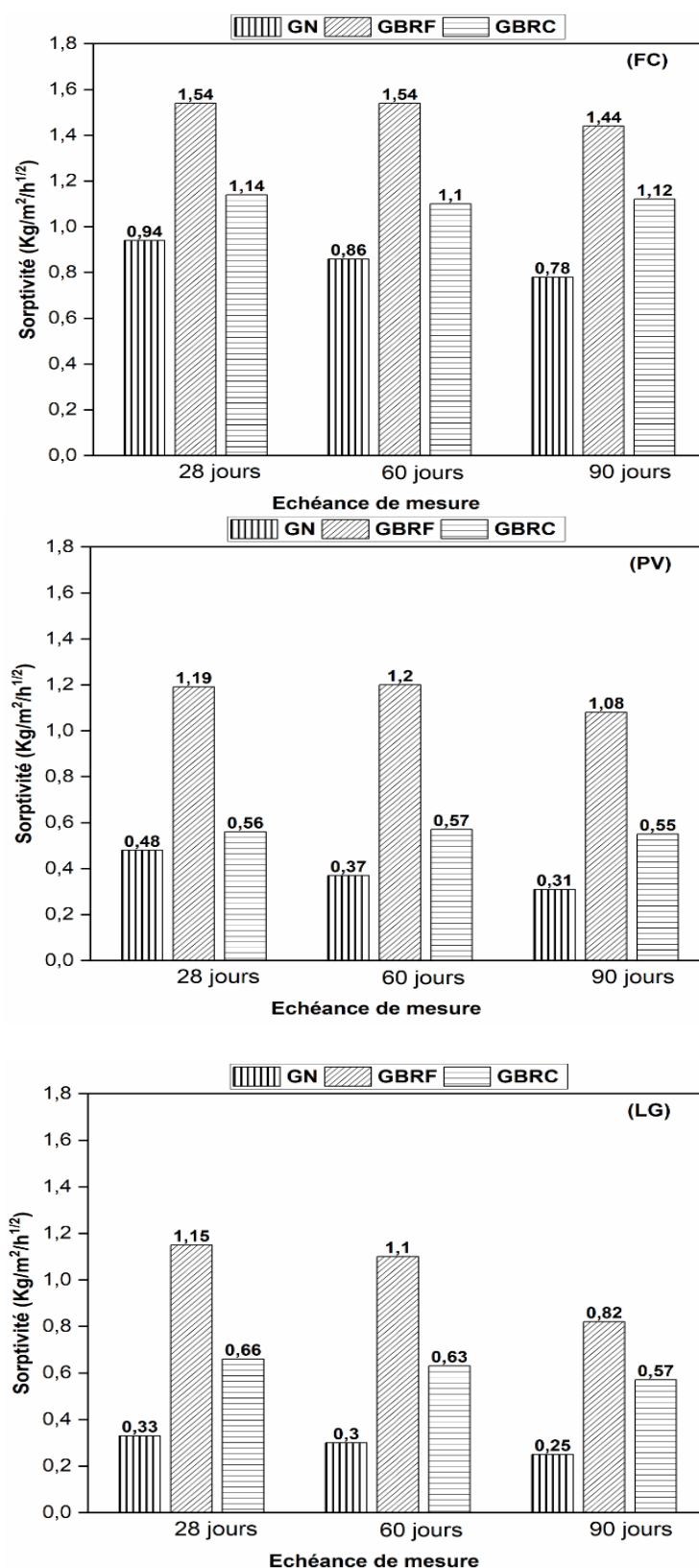


Figure 5.4. Évolution de la sorptivité en fonction du type de gravillons, des additions utilisés et des échéances de mesure

La prolongation de la cure humide présente un double avantage pour les additions réactives. Elle favorise, d'une part, la poursuite de l'hydratation du ciment et, d'autre part, celle de la poudre de verre par effet pouzzolanique et du laitier granulé par effet hydraulique latent. En effet, les réactions pouzzolaniques et hydrauliques du laitier se développent progressivement au fil du temps, ce qui renforce les performances mécaniques et la compacité de la matrice.

En revanche, cet effet demeure limité pour le filler calcaire, dont l'action se réduit à la seule poursuite de l'hydratation du ciment. Par ailleurs, la diminution de la sorptivité observée pour les BAP contenant de la poudre de verre ou du laitier granulé résulte à la fois de la poursuite de l'hydratation du ciment et de la formation de nouveaux hydrates issus de leurs réactions pouzzolaniques (PV) et hydrauliques latentes (LG).

3.2. Porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de dimensions (11.5) cm ayant subi une cure humide de 90 jours. La figure 5.5 illustre que la porosité ouverte dépend principalement du type de gravillon utilisé ainsi que de la nature des additions.

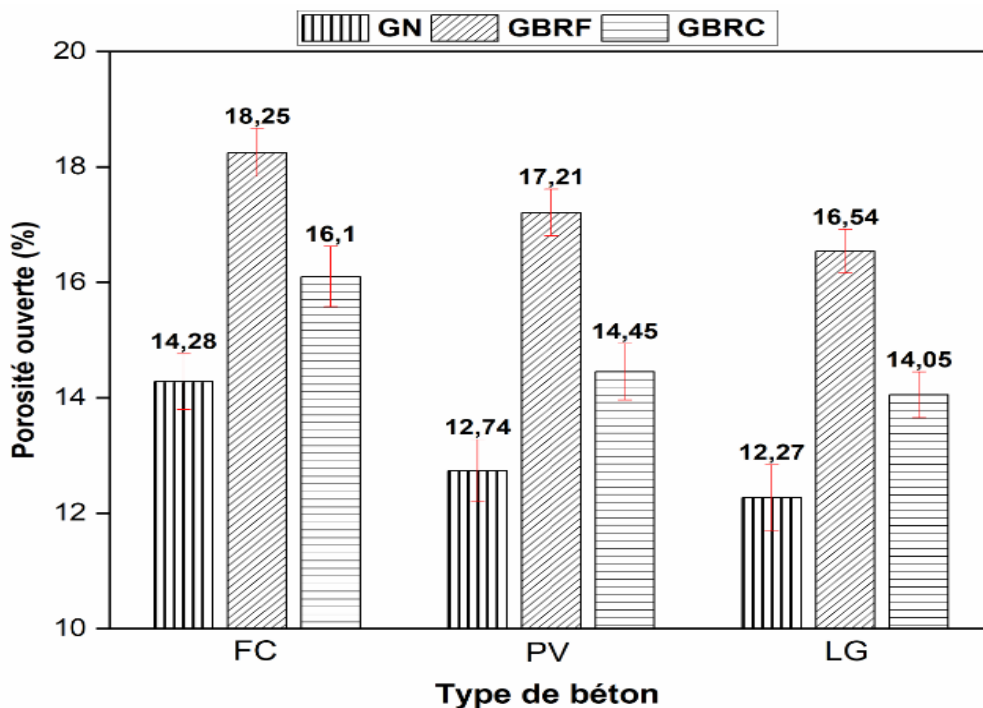


Figure 5.5. Évolution de la porosité ouverte en fonction du type de gravillons et des additions

La plus faible porosité est obtenue par l'utilisation des gravillons naturels, et ce, quel que soit le type d'addition utilisée, en raison de leur compacité en comparaison avec les granulats recyclés qui sont caractérisés par une plus grande porosité. Le remplacement des granulats naturels par des GBR-F provoque une augmentation notable de la porosité, atteignant respectivement 27,80 % pour le BAP-FC, 35,10 % pour le BAP-PV et 35,8 % pour le BAP-LG.

Des résultats similaires ont été révélés par Silva et al (Silva et al, 2016), où les auteurs ont conclu que l'utilisation de granulat de béton de déconstruction augmente le pourcentage de vides connectés dans le béton, en particulier pour un taux de substitution total. Les auteurs attribuent cette augmentation aux propriétés inférieures des granulats recyclés, notamment à la présence de fissures et de pores dans le mortier résiduel ainsi que dans les granulats eux-mêmes. Par ailleurs, l'étude menée par Tran et al (Tran et al, 2022) a montré que la porosité accessible à l'eau est fortement influencée par la porosité des granulats recyclés, mais aussi par le type d'addition minérale utilisée. D'après leurs résultats, l'utilisation des gros granulats recyclés tend à augmenter la porosité accessible à l'eau ; cependant, l'ajout du laitier granulé permet d'atténuer cet effet grâce à ses propriétés hydrauliques latentes.

La carbonatation des GBR a vraisemblablement entraîné une densification de leur microstructure, se traduisant par une réduction de la taille des pores et par l'obturation partielle des pores ouverts, transformés en pores fermés, réduisant ainsi la porosité ouverte. Ce phénomène pourrait être considéré comme la cause principale permettant d'interpréter la diminution de la porosité observée dans les formulations des BAP contenant des GBR-C. Par rapport aux BAP-GBR-F, les diminutions de porosité sont de l'ordre de : 11,78 % pour le BAP-FC, 19,10 % pour le BAP-PV et 15,05 % pour le BAP-LG.

3.3. Perméabilité à l'air

Dans cette étude, la mesure de la perméabilité à l'air a été réalisée sous quatre pressions (2, 3, 4 et 5 bars). Les éprouvettes ont subi une cure humide de 90 jours. La figure 5.6 présente la perméabilité apparente (K_{app}) des neuf mélanges de BAP étudiés.

La perméabilité apparente de tous les BAP augmente avec l'augmentation de l'inverse de la pression moyenne. Toutefois, cette hausse est plus marquée pour les BAP contenant des gravillons recyclés, notamment les GBR-F.

Cette tendance peut être principalement attribuée à la présence de vides ouverts et connectés dans le mortier résiduel, ainsi qu'à la zone de transition interfaciale plus poreuse et fissurée. Des observations similaires ont été rapportées par Tran et al (Tran et al, 2022) et par Laneyrie (Laneyrie, 2014), qui soulignent que la porosité accrue des granulats recyclés favorise le passage des fluides dans le béton.

Comme cela était attendu, le traitement des GBR par carbonatation a entraîné une diminution notable de la perméabilité des trois BAP-GBR-C, contenant respectivement le FC, la PV et le LG. En effet, lors de la carbonatation, la porosité des GBR a été partiellement colmatée par la formation du carbonate de calcium, ce qui a conduit à une densification des gravillons et à limiter la percolation de l'air à travers ceux-ci. Le même constat a été rapporté par Xuan (Xuan et al, 2017), qui ont enregistré une diminution significative de la perméabilité aux gaz des bétons contenant des GBR-C, par rapport aux GBR-F. Les auteurs attribuent cette amélioration notamment à la précipitation de carbonate de calcium à l'intérieur des pores résiduels du mortier adhérents.

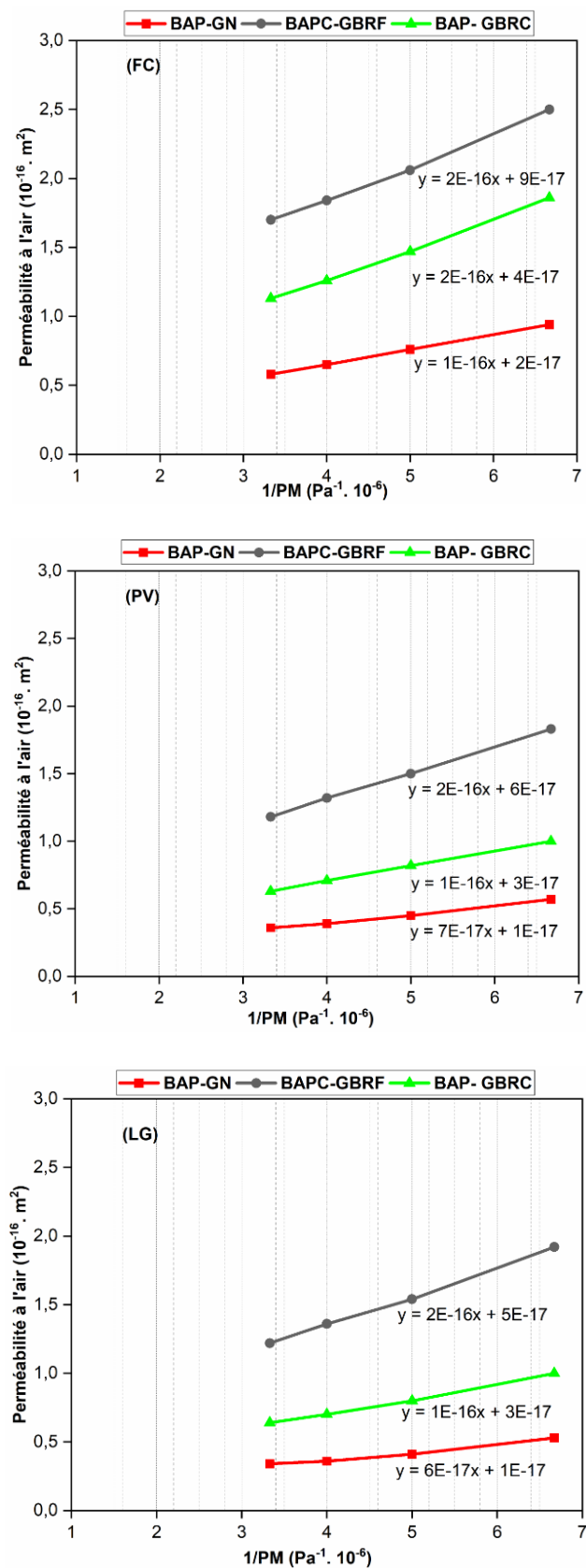


Figure 5.6. Influence du type de gravillons et d'additions sur la perméabilité apparente à l'air des BAP

En suivant l'approche de Klinkenberg et en réalisant une régression linéaire à partir des courbes de perméabilité apparente (K_{app}) présentées sur la figure 5.6, la perméabilité intrinsèque à l'état sec a été déterminée et est présentée sur la figure 5.7.

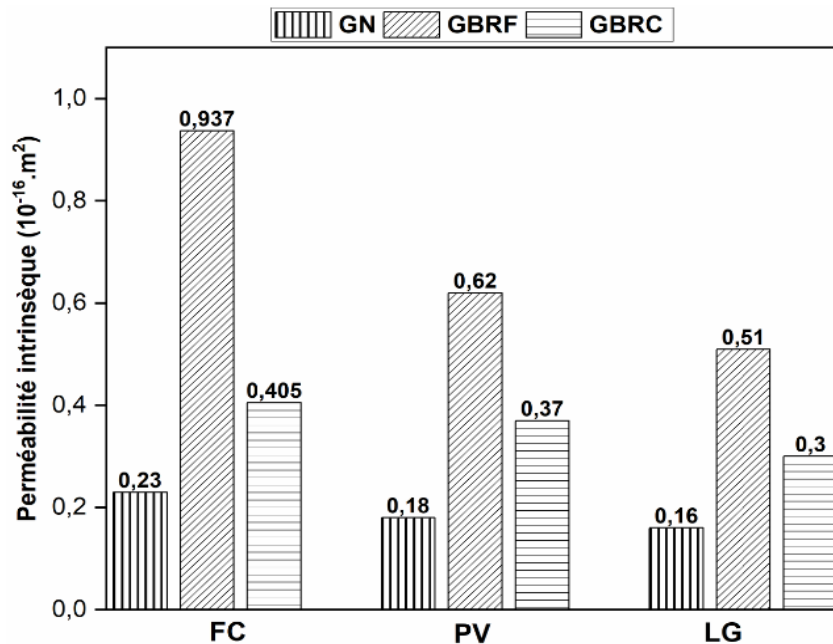


Figure 5.7. Évolution de la perméabilité intrinsèque (K_{int}) des BAP d'études

Il est clair, d'après la figure 5.7, que l'évolution de la perméabilité intrinsèque des neuf BAP étudiés suit la même tendance que celle de la perméabilité apparente. La perméabilité intrinsèque la plus élevée est observée pour les BAP contenant des gravillons recyclés frais (GBR-F), principalement en raison de la porosité élevée de ces granulats, comme l'a également montré Berredjem (Berredjem, 2018). Toutefois, ces valeurs diminuent notablement lors de l'utilisation des gravillons recyclés carbonatés, traduisant ainsi l'efficacité du traitement qui densifie la structure poreuse des granulats. Les diminutions enregistrées par l'utilisation des GBR-C par rapport aux GBR-F sont de l'ordre de 56% pour le FC, 40 % pour la PV et 41% pour le LG, respectivement.

Il est également important de noter que la nature des additions exerce un rôle significatif sur l'évolution de la perméabilité intrinsèque. En effet, les valeurs les plus élevées sont obtenues avec le filler calcaire, et ce, quel que soit le type de gravillon utilisé, principalement à cause de son caractère inerte. Contrairement à la poudre de verre et au laitier granulé, qui entraînent une diminution notable de cette propriété, notamment pour les BAP contenant des GBR-F. Les diminutions enregistrées par rapport au BAPC-GBR-F-FC sont de l'ordre de 33,80 % pour le BAPC-GBR-F-PV et 45,56 % pour le BAPC-GBR-F-LG, successivement, témoignant ainsi de l'effet bénéfique des additions réactives, principalement par le remplissage de la matrice cimentaire par de nouveaux hydrates. Les mêmes tendances ont été révélées par Ali Boucetta (Ali boucetta, 2014).

3.4. Carbonatation accélérée

3.4.1. Profondeur de carbonatation

Après une cure humide de 90 jours, la profondeur de carbonatation a été évaluée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $7 \times 7 \times 7$ cm à différentes échéances (7, 28, 70 et 365 jours) en utilisant le test chimique à la phénolphthaléine. Les résultats pour l'ensemble des bétons étudiés sont présentés dans la figure 5.8.

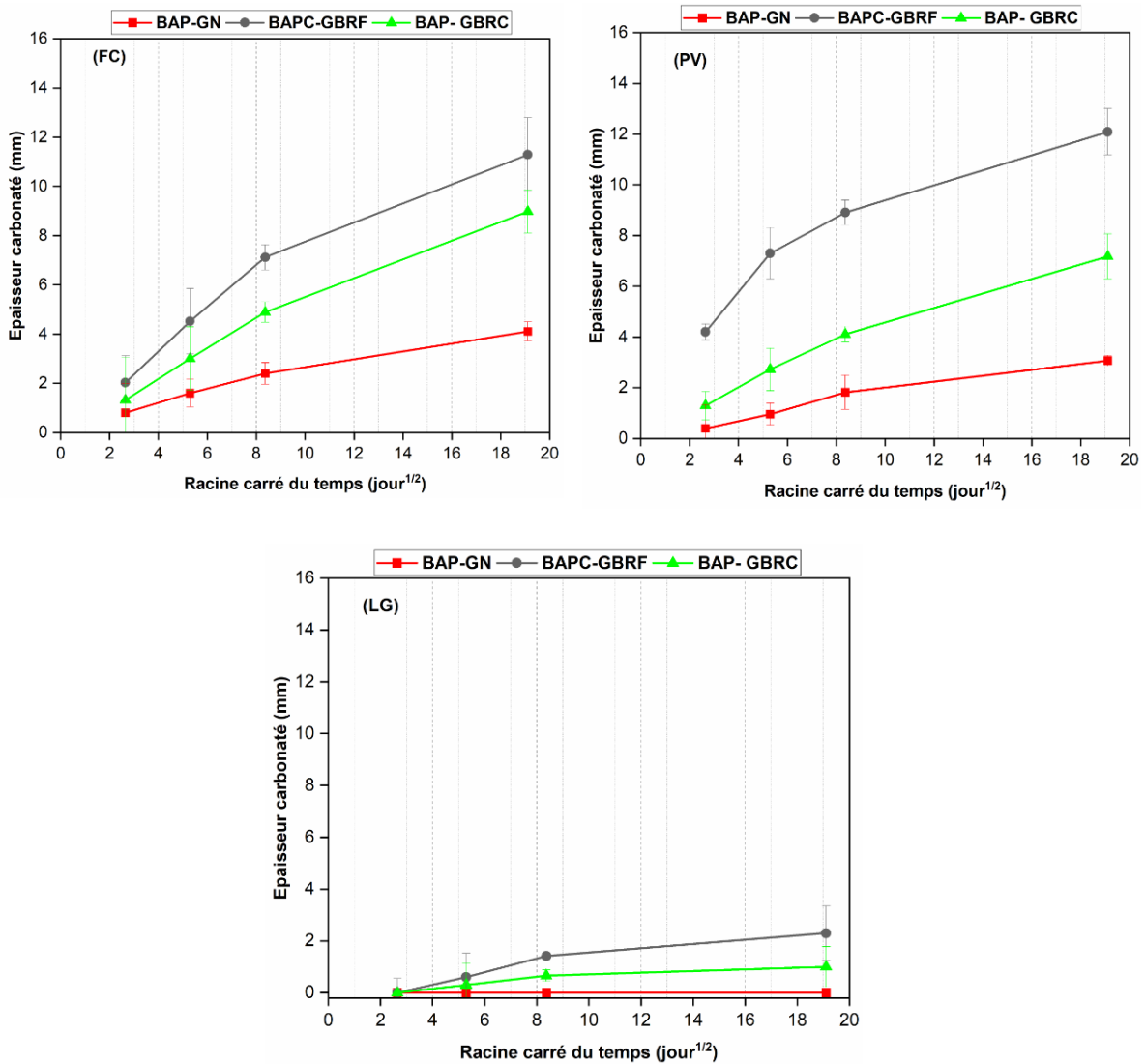


Figure 5.8. Mesure de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps

Les BAP contenant des granulats naturels (GN) et du laitier granulé ne présentent aucun signe de carbonatation (profondeur quasiment nulle), même après une année d'exposition. Les mêmes observations ont été révélées dans le travail d'Ali boucetta (Ali boucetta, 2014). Les BAP-GBR-C et le BAP-GBR-F, présentent des profondeurs de carbonatation très faibles de 1 à 2 mm.

L'effet des additions sur les profondeurs de carbonatation est similaire à leurs effets sur la perméabilité. Les BAP contenant le FC et la PV présentent les épaisseurs les plus profondes.

La carbonatation des bétons dépend de plusieurs facteurs, notamment la portlandite qui constitue une barrière diffusionnelle qui ralentit et peut même stopper la diffusion du CO_2 . Les additions à caractère pouzzolanique comme le verre, consomment une quantité de portlandite dans le cadre de la réaction pouzzolanique, entraînant deux effets antagonistes sur la profondeur et la cinétique de carbonatation : d'une part la quantité de portlandite diminue ce qui facilite la diffusion du CO_2 dans le béton et entraîne une plus grande carbonatation. D'autre part, la réaction pouzzolanique génère des produits d'hydratation de type CSH, qui densifient la microstructure du béton, réduisant ainsi la porosité.

Cependant, deux hypothèses principales peuvent être proposées pour expliquer ce résultat : d'une part, la réaction pouzzolanique de la poudre de verre consomme une partie de la portlandite, réduisant ainsi l'effet tampon et donc la barrière chimique contre le CO_2 , d'autre part, la porosité des gravillons recyclés constitue un chemin supplémentaire pour la diffusion du CO_2 à l'intérieure du béton. Cet effet n'est pas observé dans le BAPC-GBR-F-FC, en vue que le filler calcaire est une addition inerte qui ne consomme pas de portlandite. Celle-ci conserve donc son rôle de barrière chimique et limite la propagation du CO_2 . Nos résultats sont corroborés par ceux de Tran et al (Tran et al, 2022), qui rapportent que l'utilisation des additions à caractère pouzzolaniques, associé à des granulats recyclés poreux réduit la résistance du béton à la carbonatation, en particulier, ils ont observé que l'emploi du métakaolin et du laitier augmente la profondeur de carbonatation. Toutefois dans notre cas, l'impact du LG est différent, bien que Tran et al (Tran et al, 2022), ont réalisés leurs mesures après 56 jours de cure humide, notre essai a été réalisé après 90 jours, ce qui a probablement favorisé une meilleure hydratation du laitier, et cela peut expliquer les meilleures performances observées dans nos résultats, où la densification de la matrice cimentaire a compensé la réduction de la portlandite et empêcher la diffusion du CO_2 .

La densification des gravillons recyclés par le carbonate de calcium après leur traitement a permis d'améliorer la résistance des BAP à la carbonatation. Cela montre que la diminution de la porosité contribue significativement à freiner la diffusion du CO_2 . Dans ce contexte, les profondeurs de carbonatation des BAP-GBR-C (LG, PV, FC), restent intermédiaires entre celles observées pour les BAP-GN, qui présentent les plus faibles profondeurs de dégradation, et les BAP avec des GBR-F, plus poreux et donc moins résistants à la carbonatation. Nos résultats sont confirmés par ceux de Liang et al (Liang et al, 2020), qui expliquent que la diminution de la profondeur de carbonatation des bétons à base de granulats recyclés carbonatés est justifiée par le raffinement du réseau poreux des granulats ainsi que par l'amélioration de la zone de transition interfaciale (ITZ).

L'emploi du laitier granulé comme addition garantie une bonne résistance à la carbonatation y compris le BAP-GBR-F.

3.4.2. Suivi de masse

Le suivi de masse a été évalué parallèlement aux mesures des épaisseurs de carbonatation, sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7.7.28) cm, après 7, 28, 70 et 365 jours. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 5.9.

Il est à noter que tous les BAP étudiés présentent une augmentation de masse lorsqu'ils sont exposés dans l'enceinte de carbonatation ; cette augmentation initiale est liée à la mise en équilibre hygrométrique, considérée comme une première étape rapide survenant dans les premiers jours d'exposition. Toutefois, au-delà de 7 jours d'exposition, les gains de masse enregistrés sont attribués à la formation des carbonates de calcium. Ce gain de masse augmente d'une façon proportionnelle à la durée d'exposition des échantillons à l'action du CO_2 , traduisant la progression continue du processus de carbonatation.

Les BAP contenant des gravillons recyclés frais et formulés au filler calcaire présentent les gains de masse les plus élevés, traduisant ainsi leurs profondeurs de carbonatation élevées.

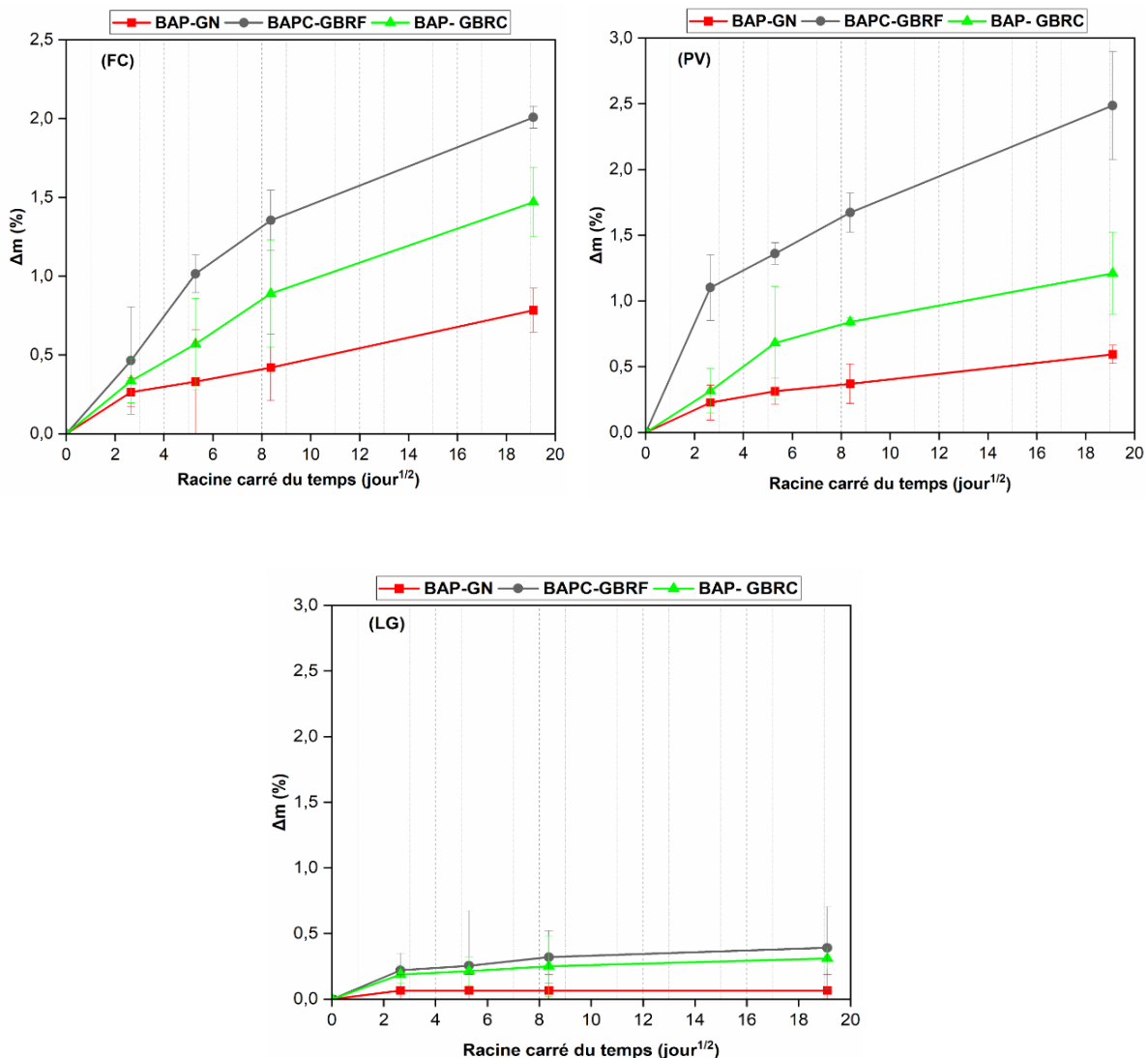


Figure 5.9. Suivi de la masse durant le processus de carbonatation accélérée des BAP étudiés

4. SYNTHÈSE

À la fin de ce dernier chapitre de cette étude, et après la caractérisation à l'état durci des neuf formulations de BAP optimisées, plusieurs enseignements peuvent être tirés des résultats obtenus :

- Du point de vue mécanique, le remplacement total des gravillons naturels par des gravillons recyclés entraîne une diminution des résistances en compression ainsi que des modules de déformation dynamique. Toutefois, une amélioration notable des performances mécaniques est observée lorsque ces granulats ont été traités par carbonatation naturelle. L'amélioration observée s'explique principalement par le comblement des pores des granulats recyclés par les carbonates de calcium, entraînant une réduction de leur absorption d'eau et une augmentation de leur densité.

Par ailleurs, la nature des additions exerce un rôle crucial sur l'évolution des propriétés mécaniques. Le filler calcaire permet d'atteindre les résistances les plus élevées à jeune âge, à 2 jours notamment, en raison de son effet de remplissage et de création de sites de nucléation (germination hétérogène). La poudre de verre, grâce à sa réactivité pouzzolanique, améliore les résistances en compression et les modules de déformation dynamique à moyen terme, notamment à 7 et 28 jours. Enfin, les meilleures performances mécaniques sont obtenues avec le laitier granulé, principalement par son effet hydraulique latent, qui est activé progressivement par l'alcalinité assurée par la portlandite issue de l'hydratation du ciment.

- L'évolution de l'absorption d'eau a été évaluée à trois échéances : 28, 60 et 90 jours. Il a été montré que quel que soit l'âge de mesure, les BAP formulés avec 100 % de GBR-F présentent les coefficients d'absorption d'eau et les pourcentages de porosité les plus élevés, en raison de la forte porosité de l'ancien mortier qu'ils contiennent. Après traitement par carbonatation, ces granulats montrent une réduction significative de l'absorption capillaire ainsi qu'un ralentissement de la cinétique, attribué au colmatage des pores par le carbonate de calcium. Par ailleurs, l'utilisation du filler calcaire, en tant qu'addition inerte, conduit à l'obtention des valeurs des coefficients les plus élevées, quel que soit le type de gravillons utilisés. À l'inverse, la poudre de verre et le laitier granulé, grâce à leurs réactivités, contribuent à réduire les capacités d'absorption. Notamment, à 90 jours, l'activation du pouvoir hydraulique latent du LG entraîne une diminution marquée des coefficients et des vitesses d'absorption, que ce soit pour les BAP contenant des GN, des GBR-C ou des GBR-F.
- L'évaluation de la porosité ouverte a montré l'influence conjointe du type de granulats utilisés ainsi que de la nature des additions incorporées. Les gravillons recyclés frais (GBR-F), en raison de la porosité élevée de leur mortier résiduel, engendrent une augmentation significative du pourcentage de vides dans le béton. Cependant, après traitement, le colmatage des pores par le carbonate de calcium formé contribue à une réduction notable de leur porosité et par conséquent de la porosité ouverte du béton.

Concernant les additions, le filler calcaire, du fait de sa nature inerte, induit les valeurs de porosité les plus élevées, indépendamment du type de gravillon utilisé. Toutefois, le recours à des additions alternatifs de nature réactives, tels que le laitier granulé et la poudre de verre, entraîne un raffinement du réseau poreux par la formation supplémentaire de produits d'hydratation, ce qui se traduit par une structure plus compacte et moins poreuse

- Le remplacement des gravillons naturels par des gravillons recyclés utilisés à l'état brut (frais), entraîne une augmentation du coefficient de perméabilité à l'air, en raison de leur caractère poreux, qui favorise le passage des fluides à travers le béton. Toutefois, la réduction de cette porosité grâce au traitement par carbonatation a permis d'atténuer cet effet, en limitant la diffusion du gaz vers l'intérieur du béton. Par ailleurs, les résultats ont montré que l'utilisation des additions à caractère réactif, qu'elles soient pouzzolaniques ou hydrauliques, contribue au raffinement du réseau poreux de la matrice cimentaire, contribuant ainsi à la réduction de la perméabilité à l'air du béton.
- L'utilisation des gravillons recyclés frais en remplacement total des gravillons naturels favorise la diffusion du CO_2 à l'intérieur du béton, comme l'indiquent les profondeurs de carbonatation plus importantes, enregistrées dans les BAP-GBR-F, notamment lorsque le filler calcaire est utilisé en particulier, suivie de la poudre de verre. Ce résultat est probablement dû à la consommation de la portlandite lors de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre. En revanche, le traitement des granulats recyclés à la carbonatation permet de densifier leur structure poreuse, améliorant ainsi la résistance des BAP vis-à-vis de la carbonatation. Finalement, le BAP formulé avec le laitier granulé et des gravillons naturels n'a présenté aucun signe de carbonatation, même après une année d'exposition, suivi par les formulations BAP-GBR-C-LG et BAP-GBR-F-LG. Ces résultats mettent en évidence l'effet bénéfique du LG sur la compacité de la matrice cimentaire, en particulier lorsque la durée de cure est prolongée, permettant l'activation de son pouvoir hydraulique latent. Contrairement à l'utilisation des GBRF, le traitement des gravillons recyclés rend leur structure plus dense et améliore par conséquent la résistance du béton à la carbonatation.

CHAPITRE V

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Ali Boucetta, T. (2014). Contribution du laitier granule et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances (Doctoral dissertation, Université Badji mokhtar, Annaba)

Ali-Boucetta, T., Behim, M., Cassagnabere, F., Mouret, M., Ayat, A., & Laifa, W. (2021). Durability of self-compacting concrete containing waste bottle glass and granulated slag. *Construction and Building Materials*, 270, 121133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121133>

Amara, H., (2022). Contribution à la valorisation des granulats recyclés dans l'élaboration de béton autoplaçant : Etude comparée du comportement de bétons BAP et de mortier MBE. Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba

B

Behim, M. (2005). Sous-produits industriels et développement durable: réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire. Doctorat d'état Université Badji Mokhtar Annaba-Algérie

Bellara, S., (2022). Ouvrage réalisé sur un sol renforcés par des mélanges Co-valorisés : Application à la valorisation des sédiments en génie civil. Thèse de doctorat, université de Skikda

Berredjem, L. (2018). Contribution à l'étude des propriétés des mortiers et bétons à base de granulats recyclés et leurs durabilités. Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba.

L

Laneyrie, C. (2014). Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des béton des granulats recyclés (Doctoral dissertation, Université de Cergy Pontoise).

Li, L., Poon, C. S., Xiao, J., & Xuan, D. (2017). Effect of carbonated recycled coarse aggregate on the dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 151, 52-62.

Liang, C., Lu, N., Ma, H., Ma, Z., & Duan, Z. (2020). Carbonation behavior of recycled concrete with CO₂-curing recycled aggregate under various environments. *Journal of CO₂ utilization*, 39, 101185.

Liu, Y. X., Ling, T. C., & Mo, K. H. (2021). Progress in developing self-consolidating concrete (SCC) constituting recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 522-537

Lu, B., Shi, C., Cao, Z., Guo, M., & Zheng, J. (2019). Effect of carbonated coars recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 233, 421-428.

M

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais, 2.

MEFTAH, H. (2018). Faculté des sciences de l'ingénierat Département de Génie Civil (Doctoral dissertation, Université Badji mokhtar, Annaba).

N

Newman, J., & Choo, B. S. (Eds.). (2003). Advanced concrete technology set. Elsevier.

P

Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., Fok, H., & Kou, S. C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and concrete research*, 34(1), 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)

R

Russo, N., & Lollini, F. (2022). Effect of carbonated recycled coarse aggregates on the mechanical and durability properties of concrete. *Journal of Building Engineering*, 51, 104290.

S

Silva, Y. F., Robayo, R. A., Matthey, P. E., & Delvasto, S. (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639-644.

T

Tran, D. L., Mouret, M., Cassagnabère, F., & Phung, Q. T. (2022). Effects of intrinsic granular porosity and mineral admixtures on durability and transport properties of recycled aggregate concretes. *Materials Today Communications*, 33, 104709.

W

Wang, X., Yang, X., Ren, J., Han, N., & Xing, F. (2021). A novel treatment method for recycled aggregate and the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1389-1401.

X

Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2017). Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 84, 214-221.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Face aux défis environnementaux et afin de répondre à l'importante demande en granulats pour la construction, le présent travail s'inscrit dans une approche d'économie circulaire, basée principalement sur l'amélioration des propriétés des gravillons de béton de démolition, à travers leur traitement par carbonatation naturelle, en vue de leur utilisation dans la composition de béton autoplaçant (BAP), en remplacement total des gravillons naturels. Par ailleurs, l'effet de la poudre de verre et du laitier granulé, employés en remplacement du filler calcaire considéré comme addition de base couramment utilisé dans la formulation des BAP, a été étudié tant à l'état frais qu'à l'état durci.

Pour atteindre les principaux objectifs, initialement définis, un protocole expérimental a été mis au point et réalisé étape par étape. À chaque phase, plusieurs conclusions ont été apportées :

- Conclusions relatives à la caractérisation des matériaux :

D'après les analyses microstructurales réalisées sur les trois additions minérales utilisées dans ce travail, il a été clairement démontré que le filler calcaire (FC) et le laitier granulé (LG) disposent d'une morphologie angulaire et rugueuse, contrairement à la poudre de verre (PV), qui présente des particules lisses et allongées. La diffraction aux rayons X a montré que le FC possède une structure cristalline, dominée par la présence de la calcite, et une structure vitreuse pour le LG et la PV. Du point de vue physique, et d'après l'analyse granulométrique des fines étudiées, a été clairement montrée la finesse la plus élevée du LG, suivie de celle de la PV et du FC, et enfin du ciment. Par ailleurs, l'essai de la demande en eau, réalisé selon la méthode de Vicat, a révélé une demande en eau plus importante pour le LG, ensuite la PV et le FC.

Les gravillons recyclés frais (non traités), notés (GBR), présentent les masses volumiques apparentes et réelles les plus faibles, une absorption d'eau élevée (rapide pendant les 20 premières minutes), ainsi que les valeurs Micro Deval et Los Angeles les plus élevées, par rapport aux granulats naturels. Toutefois, après leur traitement à la carbonatation, il a été mis en évidence la carbonatation des produits d'hydratation, notamment la portlandite et les CSH, montrée par l'ATG et les observations microscopiques. Également, il a été révélé d'après la caractérisation physique et mécanique des GBR après carbonatation une augmentation des masses volumiques, ainsi qu'une diminution notable de l'absorption d'eau et de la porosité, évaluée à travers l'essai MIP (porosimètre par intrusion de mercure). Une diminution des indices MDE et LA a également été enregistrée.

- Conclusions relatives à la caractérisation des BAP contenant des GBR-F et des GBR-C à l'état frais :

La substitution des granulats naturels (GN) par les gravillons de béton recyclés frais (GBR-F) entraîne une diminution de l'écoulement en milieu non confiné, évalué à travers l'essai de l'étalement au cône d'Abrams, ainsi que l'écoulement en milieu confiné, mesuré à travers le test horizontal à la boîte en L. en revanche, elle induit une augmentation du temps d'écoulement (T500) et du risque de ségrégation statique (essai de stabilité au tamis). De plus, une diminution notable de la masse volumique du béton frais a été enregistrée avec l'utilisation des GBR-F,

accompagnée d'une augmentation de la teneur en air occlus. Il est également important de noter que cette altération des propriétés à l'état frais des BAP est plus prononcée lorsque les GBR-F sont incorporés dans le BAP avec un taux de substitution des GN de 100%. Néanmoins, une amélioration notable de la fluidité des BAP contenant les gravillons recyclés carbonatés (GBR-C), évaluée principalement par les essais d'étalement, du temps d'écoulement, de la boîte en L et de la stabilité au tamis. Le traitement des GBR par carbonatation a entraîné une diminution de la porosité, ce qui a engendré l'augmentation de la masse volumique des GBR et des BAP frais qui les contiennent. Toutefois, l'essai de mesure de la teneur en air occlus a montré que le traitement des GBR n'a pas d'effet significatif sur le volume d'air dans les bétons frais. Du fait que les valeurs de mesure obtenues sur les BAP-GRC sont quasiment les mêmes que les BAP à base de GRF.

Par rapport au filler calcaire et à la poudre de verre, le laitier granulé a montré un effet de diminution de la fluidité des BAP, quel que soit le type de gravillons utilisés (GN, GBR-F ou GBR-C). Cet effet s'explique principalement par sa demande en eau élevée par rapport aux deux autres additions, le FC et la PV.

- Conclusions relatives à la caractérisation des BAP contenant des GBR-F et des GBR-C à l'état durci :

Du point de vue mécanique, l'utilisation des GBR-F en remplacement partiel ou total des GN entraîne une diminution significative des résistances mécaniques en compression, principalement causée par leur porosité élevée, localisée en particulier dans l'ancien mortier. Cependant, une amélioration notable des performances mécaniques (résistance en compression et module de déformation dynamique) est observée lorsque ces gravillons ont été utilisés à l'état carbonaté. Cette amélioration est principalement attribuée à la densification de la structure des GBR par la formation de carbonate de calcium dans l'espace poreux des granulats recyclés, réduisant ainsi leur porosité et limitant aussi leur absorption d'eau. Outre l'effet des gravillons, les additions jouent un rôle important dans l'évolution des performances mécaniques des BAP. Qu'elles soient inertes ou réactives, les additions améliorent les propriétés mécaniques par effets de remplissage et de germination hétérogène. Cependant, lorsqu'elles sont réactives comme la PV (caractère pouzzolanique) et le LG (pouvoir hydraulique latent), elles génèrent des CSH supplémentaires qui améliorent sensiblement les résistances mécaniques à moyen et long terme.

En ce qui concerne l'évaluation de la durabilité des BAP, nous pouvons conclure que :

- L'utilisation des GBR à l'état frais augmente le coefficient d'absorption d'eau par capillarité des BAP, notamment lorsque leur taux d'incorporation dépasse 75 %. Tandis que, lorsqu'ils sont utilisés à l'état carbonaté (GBR-C), une réduction significative de l'absorption capillaire ainsi qu'un ralentissement de la cinétique d'absorption ont été enregistrés, attribués au colmatage des pores par le carbonate de calcium. Toutefois, le remplacement du FC par la PV ou le LG entraîne une diminution significative de ce paramètre, principalement par l'effet pouzzolanique de la PV et l'effet hydraulique latent du LG. Notamment, à 90 jours, l'activation du pouvoir hydraulique latent du LG

entraîne une diminution marquée des coefficients et des vitesses d'absorption d'eau, que ce soit pour les BAP contenant des GN, des GBR-C ou des GBR-F.

- Lors de l'évaluation de la porosité ouverte et de la perméabilité à l'air des séries des BAP optimisés, à savoir : BAP-GN, BAPC-GBR-F et BAP-GBR-C, avec les trois types d'additions d'étude, le FC, la PV et le LG. Il a été révélé que les BAP formulés avec 100% de GBR-F sont les BAP qui disposent du pourcentage de vides connectés et, par conséquent, ce sont les BAP les plus perméables, principalement en raison de la porosité du mortier résiduel qui entoure les grains. Néanmoins, après leur traitement à la carbonatation, le colmatage des pores par le carbonate de calcium formé a entraîné une diminution notable de leur porosité et, par conséquent, de la porosité ouverte et de la diffusion de l'air à travers le béton. De plus, l'ajout des additions à caractère réactif, telles que la poudre de verre et le laitier granulé, engendre un raffinement et une segmentation du réseau poreux par la formation supplémentaire de produits d'hydratation (notamment les CSH), ce qui se traduit par une structure plus compacte et moins poreuse.
- La substitution des GN par les GBR-F favorise la diffusion du CO_2 à travers le béton, et augmente les profondeurs carbonatées, notamment pour les séries des BAP contenant le FC et la PV. Contrairement à l'utilisation des GBR-F, le traitement des gravillons recyclés rend leur structure plus dense et améliore par conséquent la résistance du béton à la carbonatation.

En somme, nous pouvons conclure d'après les résultats obtenus de ce travail de recherche que les gravillons recyclés frais issus des déchets de déconstruction, présentant des résistances entre 20 et 25 MPa, ne peuvent pas remplacer totalement les gravillons naturels dans les BAP. Toutefois, leur traitement par carbonatation naturelle s'est révélé prometteur et a permis leur incorporation totale. Les trois additions étudiées : le FC, la PV et le LG garantissent la fluidité du BAP, mais seulement le LG et la PV donnent les meilleures performances mécaniques et de durabilité. Ces deux additions, écologiques et accessibles, constituent une alternative intéressante au filler calcaire d'origine naturelle.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

Comme tout travail de recherche, cette thèse ouvre la voie à des nouvelles idées et prolongements intéressants :

- Réaliser le traitement des GBR à la carbonatation d'une manière plus intense en exposant systématiquement les GBR dans des zones choisies selon la concentration élevée de CO_2 , telles que les cimenteries. Ce qui permet de disposer de stocks de granulats recyclés et carbonatés, tout en absorbant partiellement le CO_2 généré par certaines industries.
- Élargir le recyclage et le traitement non seulement aux gravillons, mais également à la partie sableuse.
- La formulation des BAP nécessite un volume de pâte élevé. Dans cette étude, l'utilisation des additions a été optimisée en complément et non en remplacement du ciment. Il serait donc pertinent de remplacer partiellement le ciment par des additions écologiques, telles que le LG et la PV. Et de formuler un BAP contenant 100% de granulats (sables et graviers) recyclés et carbonatés, avec un faible dosage en ciment, dans le but d'obtenir un béton à faible *empreinte carbone*.
- Continuer la caractérisation des BAP à l'état durci, notamment en étudiant leur comportement vis-à-vis de la résistance à la migration des ions chlorure, leur résistivité électrique, ainsi que leur comportement à haute température.
- Finalement, compte tenu du climat algérien où les températures estivales atteignent les 45 °C dans certaines régions, il serait intéressant donc d'évaluer l'effet de la température de coulage sur le comportement à l'état frais et durci des BAP contenant des granulats recyclés, frais et carbonatés, ainsi que des matériaux alternatifs, tels que le LG et la PV.

ANNEXES

Annexe – A : Fiche technique du ciment



FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5R

CIMENT PORTLAND

CEM I 42.5R Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid

CEM I 42.5R :
Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

👉 DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté



✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

	ciment 	Sable (sec) 0/5 	Gravillons ^(sec) 8/15mm 15/25mm 	Eau (litre)
Dosage pour béton	50k X1 	+ X7 	+ X5  + X4 	+ 2
	ciment 	Sable Correcteur 0/1mm 	Sable (sec) 0/4mm 	Eau (litre)
Mortier de briquetage	50k X1 	+ X6 	+ X9 	+ 3
Mortier de finitions	50k X1 	+ X9 	+ X6 	+ 3

Remarque: un bidon

🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES


Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₂ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



SPA BISKRIA CIMENT
Adresse : Djar Belahrache
Branis , Biskra Algerie

Tel : +213 (0) 560 753 424
Fax : +213 (0) 33 62 73 92
contact@biskriaciment-dz.com
www.biskriaciment-dz.com

Annexe – B : Fiche technique du filler calcaire



SNC BEXCAR
SNC BENBRAHIM ET ASSOCIES

SNC BEXCAR BENBRAHIM ET ASSOCIES
Siège Social : BORDJ EL KADI SECTION 07 ILOT 18 OULED RAHMOUN – BP 71 BOUNOUARA
EL-KHROUB, 25 100 Constantine, Algérie

E-mail : bexcarb.dz@gmail.com contact@bexcar.co www.bexcar.co

Fiche Technique : Bexcarb 10N

Usine de Production : El-Khroub, Constantine.

Description de Production : Carbonate de Calcium naturel de la région d'El-Khroub, du Djebel Oum Settas, il est constitué par des calcaires du Cénomaniens d'une grande blancheur, c'est un calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique.

Analyse chimique du Produit :

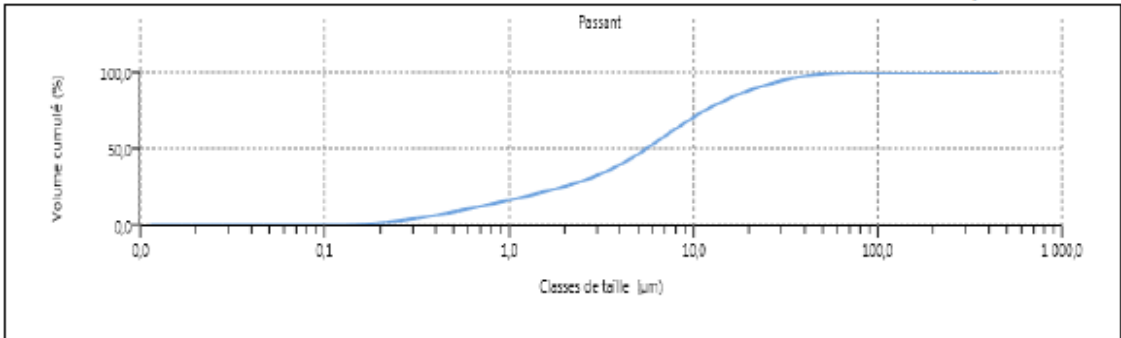
CaCO_3	MgO	Fe_2O_3	SiO_2
≥ 99 %	0,16 %	0,18 %	0,13 %

Propriétés Physique du Produit :

Coupe d97	45 μm
Diamètre médian d50	7 μm
Particules % < 2 μm	22
Blancheur (Elrepho) L*,a*,b*	95,50 / 0,33 / 2,07
Dureté (Mohs)	3
Humidité Maximum	0.4 %

Spécifications de Production :

Particles size distribution checked by Mastersizer 3000



Ces spécifications sont des valeurs moyennes résultantes de plusieurs mesures de production.

Principales Applications :

- * Plastique : PVC
- * Colles.
- * Mastics.
- * Enduits.

December 2022

Annexe – C : Fiche technique du superplastifiant

Notice technique
Edition Octobre, 2013
Version 01,2013
POLYFLOW® LSR 8800



POLYFLOW® LSR 8800

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934.2 tab. 1.3.1 3.2

Présentation	POLYFLOW® LSR 8800 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylate. POLYFLOW® LSR 8800 ne présente pas d'effet retardateur.
Domaines d'application	<p>POLYFLOW® LSR 8800 permet d'obtenir des bétons de très haute qualité</p> <ul style="list-style-type: none"> ☞ POLYFLOW® LSR 8800 permet la fabrication de bétons plastiques à auto plaçants transportés sur de longues distances et pompés. ☞ Dans les bétons auto plaçants, POLYFLOW® LSR 8800 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants. ☞ POLYFLOW® LSR 8800 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).
Caractères généraux	<p>POLYFLOW® LSR 8800 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ☞ Longue rhéologie (>3h), ☞ Robustesse à la ségrégation, ☞ Qualité de parement.
Caractéristiques	
Aspect	Liquide brun clair
Condit	<ul style="list-style-type: none"> ☞ Fûts de 220 kg ☞ Conteneur perdu de 1100 kg ☞ Vrac

Construction



Construction

Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. POLYFLOW® LSR 8800 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact
Données techniques	
densité	1,07 ± 0,02
pH	5 à 5.5
Teneur en ions Cl-	≤ 0,1%
Teneur en Na ₂ O éq.	≤ 1%
Extrait sec	29% à 2%
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,3 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	POLYFLOW® LSR 8800 est ajouté, soit en même Temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Mentions légales	les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils et ne constituent pas une garantie de performance .L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Toutes nos fiches techniques sont mises à jour régulièrement, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

SOLU EST ®
Zone Industrielle Sidi Salem
ANNABA 23000-ALGERIE
Tél/Fax : +213(0)38 88 38 01
Tél : 0560 91 53 30 /31 -32
E.mail : solu-est@hotmail.fr
www.soluest-DZ.com