

جامعة محمد

خيضر - بسكرة

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Réf : **PG/D/LMD/GC/20**



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع: **PG/D/LMD/GC/20**

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de

DOCTORAT LMD

Spécialité (Option) : Matériaux

**CARACTÉRISATION ET AMÉLIORATION DE LA
DURABILITÉ DES BÉTONS À GRANULATS
RECYCLÉS (ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET
MODÉLISATION)**

Présentée par :

ALLAL Meftah

Soutenue publiquement le : 27/04/ 2025.

Devant le jury composé de :

Mr. MELLAS Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
Mme. ZEGHICHI Leila	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mr. SILINE Mohammed	Professeur	Co- Rapporteur	Université de M'sila
Mr. BELAGRAA Larbi	Professeur	Examineur	Université de M'sila
Mr. TAALLAH Bachir	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Mr. GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Mr. MEZGHICHE Bouzidi	Professeur	invité	Université de Biskra

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciement

Remerciement

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu ALLAH Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever cette thèse.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une codirection entre l'Université de Biskra et le Laboratoire de Mécanique des Matériaux et Structures (LMMS)

Tout d'abord, je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à Mme Zeghichi Leila, ma directrice de thèse, pour la confiance qu'elle m'a accordée et pour la direction bienveillante et exigeante qu'elle a exercée tout au long de mes recherches. Sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien constant ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Mr. Siline Mohammed, mon Co-encadrant, pour son soutien constant, son accompagnement et ses encouragements tout au long de cette thèse, Son expertise et sa rigueur scientifique ont grandement contribué à la qualité de cette recherche.

Je remercie chaleureusement les membres du jury, à savoir Mekki. Mellas pour avoir accepté de présider ma soutenance, ainsi que à messieurs : Taallah Bachir, Guettala Abdelhamid, et Belagraa Larbi Professeurs à l'université de Biskra et M'sila successivement pour l'honneur qui m'ont fait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail. Je tiens à remercier l'ensemble du corps administratif de l'Université de Biskra, en particulier le chef du laboratoire LRGC, M. Mabrouki, Mme Selma Haouara le chef du département de Génie Civil, pour leur soutien tout au long de mes recherches ; sans oublier le personnel du laboratoire de recherche CRAPC - BISKRA.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude au laboratoire en Turquie, qui m'a accueilli chaleureusement et m'a soutenu tout au long de mon stage à l'Université de Bartin. Je remercie tout particulièrement le Professeur Osman Gençel, avec qui j'ai partagé un bureau et échangé des discussions enrichissantes, ainsi que pour son aide précieuse et ses précieux conseils. Je tiens également à remercier Ibrahim Calis, chef de laboratoire (technologie), pour son accompagnement lors des essais MEB/EDX.

Un grand merci à l'ensemble du personnel administratif de l'Université de M'sila et aux responsables des laboratoires de recherche, en particulier les professeur Mr. Titom Massoud et M. Beddar Miloud, pour leur accueil et leur soutien. Je tiens également à remercier chaleureusement la doctorante Karima Larkat pour sa disponibilité et son aide précieuse dans la mise en place des différentes expérimentations au sein du laboratoire LMMS de M'sila. Son soutien a été déterminant, notamment pour les essais ATG DRX réalisés dans le laboratoire de chimie.

Je tiens également à remercier le groupe LCTP et BERM de M'sila qui m'a fourni des éprouvettes de béton pour mon travail de recherche en particulier : Mr. Hammani Abdelmajid et Mr. Ilyes Daloum.

Je remercie également chaleureusement les responsables de la cimenterie Hammam Dallaa pour leur collaboration, ainsi que pour m'avoir permis de réaliser nos essais chimiques et physiques sur le GBR, ainsi que la préparation des matériaux dans leur établissement, ainsi que les essais DRX et FRX.

Enfin, et surtout, je tiens à remercier profondément ma famille pour leur amour, leur soutien inébranlable et leurs encouragements tout au long de cette thèse. Leur présence m'a donné la force de surmonter les difficultés et de mener à bien ce travail. Je remercie également mes collègues, mes amis et toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, leurs encouragements et leurs précieux conseils.

Dédicace

À mon très cher père,

Aucune dédicace ne saurait rendre hommage à la profondeur de la sagesse et du soutien que tu m'as toujours offert. Merci pour ta présence constante, pour tes conseils avisés et pour l'exemple de force et de bienveillance que tu es pour moi chaque jour.

À ma très chère mère,

Aucune parole ne pourra jamais exprimer tout le respect que j'ai pour toi. Merci d'être toujours à mes côtés, par ton soutien inébranlable, ta tendresse infinie et ton dévouement sans faille. Aucune dédicace ne saurait exprimer tout le respect et l'amour que j'ai pour vous. Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre soutien inconditionnel.

À mon cher frère : TaQuiyeddine,

À mes chères sœurs ; et les maris de mes sœurs,

À mes nièces et neveux ; et la femme de mon frère

A ma chère Karima LARKAT

À mes chères amies

À toute la famille Allal

À tous les gens qui m'ont aidé de près ou de loin.

Mr. Allal Meftah

Résumé

Le remplacement des (GN) par les (GBR) est limité à des taux réduits à cause des défauts majeurs des caractéristiques de ces derniers: une porosité élevée, une forte absorption, une faible densité et une faible ITZ. Cette étude vise à remplacer totalement les GN par les GBR en résolvant leurs défauts par un traitement qui vise la fraction 16/25 mm des GBR via son revêtement par un coulis de ciment avec un rapport (E/C) de 0,5. Cette méthode innovante a été mise en œuvre pour améliorer les propriétés des GBR et la durabilité des bétons à base de GBRT.

Une première optimisation du traitement est faite en utilisant un plan factoriel complet 2^3 , en considérant trois facteurs indépendants, à savoir l'état du GBR: sec, pré-saturé (GR), le temps de trempage dans le coulis (DT) et le temps de durcissement des (GBR) (A). Les réponses retenues sont la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau du béton incorporant les GBRT après 28 jours de cure. Les résultats ont été analysés à l'aide du logiciel statistique JMP Trial 16. La résistance à la compression des BGRTi a montré une augmentation entre 20,5% et 21,04% par rapport au (BGN). Cependant, la porosité des bétons a montré une baisse par rapport au BGR. Selon les caractéristiques physiques des GBRTi, l'encapsulation conduit à une augmentation de l'absorption d'eau et de la densité absolue. L'analyse microstructurale par MEB –EDX et DRX, ATG du GBRT semble être en faveur du (GBR sec) trempé dans le coulis pendant 10 min où l'adhérence est plus forte et l'ITZ est plus dense.

Les conditions optimales (GBR sec, 10min) sont retenues pour effectuer un traitement complémentaire en ajoutant 5 % de fumée de silice (5%FS) et 2 % d'adjuvant hydrofuge (2%HF) au coulis d'encapsulation. Deux séries de béton ont été élaborées : (BGRT-5%FS) et (BGRT-2%HF), Les résultats obtenus ont montré l'effet positif de la (BGRT-5%FS) sur les aspects généraux de la durabilité des bétons soit à court ou à long terme (28, 180j, 545j), La qualité des (ITZ_n, ITZ₁ et ITZ₂) est largement améliorée. Les aspects spéciaux de la durabilité des BGRT-5%FS dans les milieux agressifs : (HCl) et (H₂SO₄) sur une période de trois mois sont évalués, Les résultats montrent que ces bétons présentent une perte de masse minimale et gardent une résistance à la compression élevée dans le milieu (HCl) en comparaison avec le milieu (H₂SO₄). Des analyses chimiques et minéralogiques indiquent que les composants essentiels de la matrice cimentaire (hydrates, quartz) sont préservés après l'exposition. Ces résultats sont corroborés par diffraction des rayons X (DRX) et la fluorescence X (FRX). De plus, les mesures de pH confirment la stabilité de l'alcalinité du béton.

Mots clés : granulats recyclés, Béton à granulats recyclés, Encapsulation, pré-saturation, Optimisation, Propriétés physiques et mécaniques, Analyse microstructurale, micro dureté, durabilité.

Abstract

The replacement of natural aggregates (NA) with recycled concrete aggregates (RCA) is limited to low proportions due to major defects in the characteristics of the latter: high porosity, high water absorption, low density, and weak (ITZ). This study aims to fully replace NA with RCA by addressing these drawbacks through a treatment prés-coating the 16/25 mm fraction of RCA, involving coating with a cement slurry having a water-to-cement ratio (W/C) of 0.5. This innovative method was implemented to enhance the properties of RCA and the durability of (RACT).

An initial optimization of the treatment was conducted using a full factorial design (2^3), considering three independent factors: the condition of RCA (GR): dry or pre-saturated), the soaking time in the slurry (DT), and the Harding time of RCA (A). The selected responses were the compressive strength and water-accessible porosity of concrete incorporating RACT after 28 days of curing. Results were analyzed using the JMP Trial 16 statistical software. The compressive strength of treated recycled aggregate concrete (RACTi) showed an increase between 20.5% and 21.04% compared to natural aggregate concrete (NAC). However, the porosity of (RAC) concrete decreased compared to untreated recycled aggregate concrete (RACTi). According to the physical characteristics of treated recycled aggregates, coating led to increased water absorption and absolute density. Microstructural analysis using SEM-EDS, XRD, and TGA supported the use of (dry RCA) soaked in the slurry for 10 minutes, where stronger adhesion and denser ITZ were observed.

The optimum conditions (RCA dry, 10min) are retained to carry out a complementary treatment by adding 5% silica fume (5%SF) and 2% water-repellent admixture (2%HF) to the coating grout. Two series of concrete were developed: (BGRT-5%SF) and (RACT-2%HF), the results obtained showed the positive effect of (RACT-5%SF) on the general aspects of the durability of concretes either in the short or long term (28, 180d, 545d). The quality of ITZ (ITZn, ITZ1, and ITZ2) was significantly improved.

The specific durability aspects of RACT-5%SF in aggressive environments (HCl and H₂SO₄) over three months were evaluated. Results showed minimal mass loss and high compressive strength retention in HCl compared to H₂SO₄. Chemical and mineralogical analyses indicated that essential components of the cement matrix (hydrates, quartz) were preserved after exposure. These findings were corroborated by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF). Furthermore, pH measurements confirmed the stability of concrete alkalinity.

Keywords: Recycled aggregates, Recycled aggregate concrete, pre-coating, Pre-saturation, Optimization, Physical and mechanical properties, Microstructural analysis, Micro hardness, Durability.

ملخص

يقترص استبدال الركام الطبيعي (GN) بالركام الخراساني المعاد تدويره (GBR) على معدلات منخفضة بسبب العيوب الرئيسية في خصائص الأخير، مثل المسامية العالية، والامتصاص المرتفع، وانخفاض الكثافة، وضعف منطقة الانتقال البيئي (ITZ). تهدف هذه الدراسة إلى استبدال GN بـ GBR بالكامل من خلال معالجة تهدف إلى تصحيح عيوبه، حيث يتم استهداف الجزء 16/25 من GBR عبر طلاءه بملاط أسمنتي بنسبة ماء/أسمنت. ($W/C = 0.5$) تم تنفيذ هذه الطريقة المبتكرة لتعزيز خصائص GBR وتحسين متانة الخرسانة القائمة على GBRT.

تم إجراء أول تحسين للمعالجة باستخدام تصميم عملي كامل (2^3)، مع الأخذ في الاعتبار ثلاثة عوامل مستقلة: حالة [GBR جاف/مشبع مسبقاً (GR)]، ووقت النقع في الملاط (DT)، ووقت المعالجة (A). تم تقييم تأثير هذه العوامل على مقاومة الضغط والمسامية التي يمكن الوصول إليها عبر الماء في الخرسانة المتضمنة GBRT بعد 28 يوماً من المعالجة، وقد تم تحليل النتائج باستخدام البرنامج الإحصائي JMP Trial 16. أظهرت مقاومة الضغط لـ GBRT زيادة تتراوح بين 20.5% و 21.04% مقارنةً بـ (BGN). ومع ذلك، سجلت الخرسانة انخفاضاً في المسامية مقارنةً بـ BGR.

وفقاً للخصائص الفيزيائية لـ GBRT، أدى التغليف إلى زيادة امتصاص الماء والكثافة المطلقة. كما أظهرت التحاليل المهجرية باستخدام MEB-EDX و DRX و TGA أن أفضل النتائج تحققت عند استخدام GBR الجاف المنقوع في الملاط لمدة 10 دقائق، حيث أظهر التصاقاً أقوى ومنطقة ITZ أكثر كثافة.

تم اعتماد الظروف المثلى (GBR) المشبع لمدة 10 دقائق لإجراء معالجة إضافية عبر إضافة 5% من دخان السيليكا و 2% من مادة الهيدروفيج السائلة (HF) إلى الملاط التلغيفي. تم تطوير سلسلتين من الخرسانة (BGRT-5%FS) و-(BGRT2%HF) أظهرت النتائج التأثير الإيجابي لـ (BGRT-5%FS) على الجوانب العامة لمتانة الخرسانة سواء على المدى القصير أو الطويل (28، 180، 545 يوم)؛ تم تحسين جودة (ITZn و ITZ1 و ITZ2) بشكل كبير.

تم تقييم متانة BGRT-5%FS في البيئات العدوانية (HCl) و H_2SO_4 لمدة ثلاثة أشهر، حيث أظهرت الخرسانة أقل فقدان في الكتلة مع احتفاظها بمقاومة ضغط عالية في وسط HCl مقارنةً بـ H_2SO_4 . كما أشارت التحاليل الكيميائية والمعدنية إلى الحفاظ على المكونات الأساسية للخليط الأسمنتي: الهيدرات، الكوارتز بعد التعرض للوسط العدواني. تم تأكيد هذه النتائج باستخدام حيود الأشعة السينية (XRD) و مضان الأشعة السينية (FRX). بالإضافة إلى ذلك، أكدت قياسات الرقم الهيدروجيني ثبات قلوية الخرسانة.

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره، الخرسانة بالركام المعاد تدويره، التغليف، التشبع المسبق، تحسين النمذجة، الخواص الفيزيائية والميكانيكية، التحليل البنيوي الدقيق، الصلابة الدقيقة، الاستدامة.

Tableau des matières

Tableau des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
Tableau des matières	
Liste des nomenclatures	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	17

Partie I : Revue littérature

PREMIER CHAPITRE

LES BÉTONS À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS- PROPRIÉTÉS ET DURABILITÉ	24
I. 1. INTRODUCTION	24
I. 2. CONTEXTE DE L'INDUSTRIE DU BÉTON ET L'IMPORTANCE DE la VALORISATION DES DÉCHETS CIMENTAIRES DANS LE MONDE	25
I. 2. 1. Valorisation des déchets issus de la (C&D)	26
I. 2. 2. Statistiques sur les déchets de C&D à travers le monde	26
I. 2. 3. Gestion des déchets de C&D	28
I. 3. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS DES BÉTON RECYCLÉS	29
I. 3. 1. processus de Production	29
I. 3. 2. Usage et normes d'utilisation	30
I. 3. 3. Propriétés des GBR	31
I. 3. 3. 1. Présentation des GBR à l'échelle macro	31
I. 3. 3. 2. Présentation des GBR à l'échelle micro	32
I. 3. 3. 3. Morphologie, texture et taille	32
I. 3. 3. 4. Distribution granulométrique	33
I. 3. 3. 5. Masse volumique	33
I. 3. 3. 6. Absorption d'eau et porosité	33
I. 3. 3. 7. Résistance à la fragmentation	34
I. 3. 3. 8. Caractéristiques minéralogiques	34
I. 3. 3. 9. Valeur de pH	36
I. 4. PROPRIÉTÉS DES BÉTONS INCORPORANT LES GBR	36
I. 4. 1. Propriétés à l'état frais	36
I. 4. 1. 1. Comportement rhéologique du BGR	36
I. 4. 1. 2. Méthodes de préparation du BGR et teneur en eau des GBR	37
I. 4. 1. 2. 1. Méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau	39
I. 4. 1. 2. 2. Méthode de L'approche du mélange en deux étapes (TSMA)	39
I. 4. 1. 2. la densité	40
I. 4. 1. 3. Compacité	41

Tableau des matières

I. 4. 1. 4. Principaux problèmes majeur liés aux GBR dans le BGR	41
I. 4. 1. 4. 1. L'influence de la teneur en mortier attaché	41
I. 4. 1. 4. 2. La zone de transition interfaciale (ITZ)	42
I. 4. 1. 4. 3. La réaction alcali-silice (RAS).....	43
I. 4. 2. Propriété à l'état durci.....	45
I. 4. 2. 1. Mécanisme du béton à base de (GBR)	45
I. 4. 2. 2. Propriétés mécaniques et physiques du BGR	47
I. 4. 2. 2. 1. Propriétés mécaniques du BGR.....	47
I. 4. 2. 2. 2. Propriétés physiques du BGR durci.....	52
b) Absorption par immersions:	52
d) Gonflement	53
I. 5. DURABILITÉ DU BÉTON A BASE DE GRANULATS RECYCLÉ	54
I. 5. 1. Les indicateurs de durabilité	55
I. 5. 1. 1. Les indicateurs généraux propres à tous les bétons	55
I. 5. 1. 1. 1. Porosité ASTM (Désignation : C (642 – 06).....	55
I. 5. 1. 1. 2. La perméabilité aux gaz (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 463).....	56
I. 5. 1. 1. 3. L'absorption capillarité (AFRM [AFPC97]).....	57
I. 5. 1. 1. 4. Diffusion des ions chlorures (NT Build492)	57
I. 5. 1. 1. 5. La teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (LCPC M48).....	58
I. 5. 1. 2. Les indicateurs spécifiques propres à une dégradation particulière	58
I. 5. 1. 2. 1. Carbonatations dans les BGR.....	58
I. 5. 1. 2. 2. Résistance au gel et dégel.....	59
I. 5. 1. 2. 3. Durabilité du béton vis-à-vis des environnements chimiques agressifs	60
a) Durabilité du béton au contact d'un milieu acide.....	60
b) Durabilité du béton au contact des chlorures	62
I. 6. CONCLUSION.....	63
DEUXIÈME CHAPITRE	
TRAITEMENTS DES GBR ET LEURS EFFETS SUR LE BÉTON BGRT	65
II. 1. INTRODUCTION	65
II. 2. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE TRAITEMENT.....	65
II. 2. 1. Élimination du mortier adhésif	67
II. 2. 1. 1. Traitements thermiques, mécaniques et chimiques	67
II. 2. 2. 1. 1. Traitement thermique.....	69
II. 2. 2. 1. 2. Traitement chimique	69
II. 2. 2. 1. 3. Traitement mécanique et chimique	70
II. 2. 2. 1. 4. Traitement thermomécanique (micro-ondes).....	71
II. 2. 2. Le renforcement du mortier adhésif	72
II. 2. 2. 1. Carbonatation	72
II. 2. 2. 1. 1. Carbonate de calcium.....	72
II. 2. 2. 1. 2. Carbonatation accélérée	73

Tableau des matières

II. 2. 2. 2. Méthode d'auto-guérison, autogène et autonome (micro -encapsulation)	76
II. 2. 2. 3. Méthode de bio-précipitation (précipitation microbienne de carbonate).....	77
II. 2. 2. 4. Méthode de géo polymérisation	80
II. 3. TECHNIQUE DE REVÊTEMENT CIMENTAIRE (Méthode d'encapsulation)	81
II. 3. 1. Revêtement cimentaire pendant le malaxage.....	82
II. 3. 2. Revêtement antérieur des GBR (pré-encapsulation)	84
II. 3. 2. 1. Technique de revêtement cimentaire des GBR (méthode d'encapsulation).....	85
II. 3. 2. 2. Performance physique de la méthode d'encapsulation de GBR en fonction de différentes immersions E/C	85
II. 3. 2. 3. L'effet de l'incorporation du (GBR encapsulé) sur la résistance mécanique	87
II. 3. 2. 4. L'effet de la pré-encapsulation : analyse microstructurale	88
II. 4. L'EFFET DU TRAITEMENT PAR ENCAPSULATION DES GBR SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON DURCI	90
II. 4. 1. L'effet de la BGRT sur l'attaque chimique dans un environnement agressif	90
II. 4. 2. Perte de résistance à la Mécanique du BGRT soumis à diverses charges et actions environnementales	93
II. 4. 2. 1. La perte de résistance à la compression sur l'impact d'action cycles de gel-dégel.....	94
II. 4. 2. 2. L'Effet de la qualité de GBR (Modèle de panne Pendant).....	95
II. 4. 2. 3. La perte de résistance à la compression sur l'impact de action cycles de gel/dégel / chargement mécanique	96
II. 5. CONCLUSION	97

Partie II : Démarche expérimentales

TROISIÈMES CHAPITRE

MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	99
III. 1. INTRODUCTION.....	99
III. 2. LES CONSTITUANTS DES BÉTONS FABRIQUÉS.....	99
III. 2. 1. Le ciment	99
III. 2. 2. Fume de silice(FS) :	99
III. 2. 3. L'Adjuvant.....	100
III. 2. 4. L'Eau:[EN 1008].....	100
III. 2. 5. Le Sable et Les Granulats:[EN 933-1]	100
III. 3. LES PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX UTILISÉS	102
III. 3. 1. Les caractéristiques physiques du sable	102
III. 3. 1. 1. Analyse granulométrique : [NF EN 933-1] [251]	102
III. 3. 1. 2. Module de finesse : [EN12620] [252].....	103
III. 3. 2. Les caractéristiques physiques du gravier	104
III. 3. 2. 1. Définition des granulats et Origine du gravier utilisé	104
III. 3. 2. 2. Analyse granulométrique du GN et GBR : [EN 933-5] [253]	104
III. 3. 2. 3. Échantillonnage et prélèvement	104
III. 3. 2. 4. la Masse volumique [EN 1097-6] [254]	105
III. 3. 2. 5. La porosité : [EN 1097-6]	107
III. 3. 2. 6. La compacité : [EN 1097-6]	108

Tableau des matières

III. 3. 2. 7. L'indice des vides [EN 1097-6].....	108
III. 3. 2. 8. Résistance à la fragmentation et à l'usure [EN 1097- 2] [255].....	109
III. 3. 2. 9. Degré d'absorption d'eau et teneur en d'eau: [EN 1097-6].....	110
III. 4. FORMULES ET FABRICATION DU BÉTON DE RÉFÉRENCE (BN, BGR).....	113
III. 4. 1. Formulations adoptées (Données de calcul).....	113
III. 4. 1. 1. Formulation de bétons de référence.....	113
III. 4. 2. Fabrication des bétons.....	114
III. 4. 2. 1. Identification des mélanges des bétons.....	114
III. 4. 2. 2. Préparation des mélanges et procédure de malaxage des bétons.....	114
III. 4. 2. 2. 1. Méthode de pré-saturation des GBR.....	114
III. 4. 2. 2. 2. Malaxeur [EN 196-1] [260].....	116
III. 4. 2. 2. 3. Confection des éprouvettes.....	116
III. 5. PROCÉDURES EXPÉRIMENTAL.....	117
III. 5. 1. Essais à l'état frais.....	117
III. 5. 1. 1. Essais de cône d'Abrams [NF P 18 451].....	117
III. 5. 1. 2. la masse volumique a l'état frais [EN12390-7].....	118
III. 5. 1. 3. Mode de conservation des éprouvettes [EN 12390-2].....	118
III. 5. 2. Essais à l'état durci.....	119
III. 5. 2. 1. Les essais mécaniques.....	119
III. 5. 2. 1. 1. essais de Résistance à la compression EN 12390-3.....	119
III. 5. 2. 1. 2. Résistance à la traction par fendage [EN 12390-6].....	120
III. 5. 2. 2. La Masse volumique a l'état durci [EN12363].....	122
III. 6. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES DES INDUCTEUR DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX.....	123
III. 6. 1. Absorption capillaire.....	123
III. 6. 2. porosité accessibles à l'eau [ASTM C09].....	125
III. 6. 3. Les indicateurs de durabilité spécifiques aux attaques chimiques.....	127
III. 7. CONCLUSION.....	128
QUATRIÈME CHAPITRE	
TRAITEMENT DES GBR PAR REVÊTEMENT CIMENTAIRE ET CARACTÉRISATION DES GBRT ET DES BGRT.....	
(MODÉLISATION PAR LE LOGICIEL JMP).....	129
IV. 1. INTRODUCTION.....	130
IV. 2. ÉLABORATION DU COULIS D'ENCAPSULATION.....	130
IV. 3. GÉNÉRALITÉS SUR LES PLANS D'EXPÉRIENCES (PLAN FACTORIEL COMPLET).....	130
IV. 3. 1. PLANS FACTORIELS COMPLETS A DEUX NIVEAUX.....	130
IV. 3. 2. Notion de modélisation mathématique.....	131
IV. 4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	132
IV. 4. 1. Optimisation du traitement des GBR par PFC.....	132
IV. 4. 2. Réponses choisies.....	133
IV. 5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS GBR ET GBRT.....	133

Tableau des matières

IV. 5. 1. Caractéristiques préliminaires	133
IV. 6. FORMULATION DE BÉTONS À BASE DE GBRT	134
IV. 7. RÉSULTATS ET DISCUSSION	136
IV. 7. 1. L'affaissement	136
IV. 7. 2. Masse Volumique à l'État Frais [EN12390-7]	136
IV. 7. 3. La résistance à la compression des BGRTi	137
IV. 7. 3. 1. Principaux facteurs	138
IV. 7. 4. Porosité accessible à l'eau (BGR)	140
IV. 7. 4. 1. Principaux facteurs	141
IV. 7. 5. Absorption et densité du BGRTi	143
IV. 8. CARACTÉRISTIQUES MICROSTRUCTURALES	144
IV. 8. 1. protocole expérimental	145
IV. 8. 1. 1. Analyse par Diffractométrie des Rayons X (DRX)	145
IV. 8. 1. 2. analyse Thermogravimétrique (ATG)	146
IV. 8. 2. Analyse au microscope électronique à balayage (MEB)	147
IV. 8. 3. Analyse de caractérisation ITZ par Micro-dureté	148
IV. 9. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	149
IV. 9. 1. Composition chimique et minéralogique	149
IV. 9. 2. Diffraction des rayons X	150
IV. 9. 3. Analyses thermogravimétriques	151
IV. 9. 4. Microstructure du GBRTi	153
IV. 9. 5. micro-dureté	156
IV. 10. CONCLUSION	158
CINQUIÈME CHAPITRE	
IMPACT DE L'ENCAPSULATION CIMENTAIRE SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON	161
V. 1. INTRODUCTION	161
V. 2. CARACTERISATION DES ADDITIONS	161
V. 2. 1. préparation du coulis de ciment	161
V. 3. CARACTÉRISTIQUES (PHYSICOCIMIQUES) DES GRANULATS ÉLABORÉS	162
V. 4. FORMULATION DU BÉTON ET PROTOCOL EXPÉRIMENTAL	163
V. 5. LES INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX DES BÉTONS BGRT	164
V. 5. 1. Résistance à la compression	164
V. 5. 2. Résistance à la traction par fendage	166
V. 5. 3. Porosité accessible à l'eau	167
V. 5. 4. L'absorption par immersion	168
V. 5. 6. Analyse microstructurale (MEB-EDX) des GBRT	171
V. 6. INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUE VIS A VIS DES ATTAQUES CHIMIQUES	174
V. 6. 1. L'inspection visuelle	175
V.6.2. Perte du poids	178
V. 6. 3. EVALUATION DE LA PERTE DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION	181

Tableau des matières

V. 6. 4. Composants Minéralogiques	183
V. 6. 5. Mesure de l'alcalinité.....	185
V. 6. 6. Analyse de la micro durté.....	187
V. 7. CONCLUSION	189
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	191
CONCLUSION GÉNÉRALE	191
Références bibliographies	195

Liste des abréviations

Liste des nomenclatures

GN : granulats naturels.

GBR : granulats de béton recyclés.

GBRTi : granulats de béton recyclés traités, tel que (i) : Types de granulats traités de (1 à 8).

(GBRT sec) : granulats de béton recyclés secs traités.

(GBRT pré-saturation) : granulats de béton recyclés pré-saturés traités.

BGN : béton de granulats naturels.

BGR : béton de granulats recyclés.

BGRTi : béton de granulats recyclés traités, tel que (i) : Numéro de mélange de béton de (1 à 8).

(BGRT sec) : béton de granulats recyclés secs traités.

(BGRT pré-saturation) : béton de granulats recyclés pré-saturés traités.

GBRT-5%FS : GBR traité avec 5 % de fumée de silice dans le coulis.

BGRT-5%FS : béton à base de GBRT-5%FS

GBRT-2%HF : granulats de béton recyclés traités avec 2% hydrofuge dans le coulis.

BGRT-2%HF : béton à base de GBRT-2%HF

(GR) : État de la GBR (sec ou pré-saturé).

(DT) : Temps de trempage

(A) : le temps de durcissement du (GBR)

ITZ : zone de transition interfaciale.

LISTE DES TERMES CHIMIQUES

Encapsulation : procédé technique de traitement des (GBR), consistant en un pré-enrobage de la fraction 16/25 des GBR avec une pâte à base de matériaux cimentaire.

L'acide sulfurique

C-S-H : Silicate de Calcium Hydraté.

HCl : Acide chlorhydrique

H₂SO₄ : l'acide sulfurique

Liste des figures

Figure. I. 1. Les pays comptant la plus grande production (C&D) dans le monde en 2018 (*les données de l'Inde et de la Russie datent de 2016 ; les données du Brésil et de l'Australie datent de 2017 : (a) production (C&D) totale et (b) génération (C&D) par population [53-55].	27
Figure. I. 2. La Consommation mondiale de GBR (par régions). New York, États-Unis, 2016 [58].	28
Figure. I. 3. Comparaison de la valorisation des déchets de construction et de démolition dans le monde [14].	29
Figure. I. 4. Le processus de production du GBR et d'après Pellegrin et al. C&D désigne les déchets de construction et de démolition [59][59].	30
Figure. I. 5. Granulat du béton recyclé [60].	31
Figure. I. 6. Analyse DRX des granulats : de rivière (A) et du GBR (B, C, D), de fraction (0–0.250 mm) [73].	35
Figure. I. 7. Valeurs de pH des différents types de solutions (AFR) [1].	36
Figure. I. 8. Procédé de mélange pour la technique de pré-saturation [89].	39
Figure. I. 9. processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale [85].	40
Figure. I. 10. la relation linéaire entre le taux remplacement des GBR et densité à l'état frais pour les différentes types de BGR [93].	41
Figure. I. 11. Relation entre la teneur en mortier et : [(a) l'absorption. (b). l'abrasion de Los Angeles] [94].	42
Figure. I. 12. différents types des GBR (MA : mortier attaché) [103].	43
Figure. I. 13. Réaction alcali-silice dans les granulats recyclés [91].	45
Figure. I. 14. Illustration du GBR dans BGR [41].	46
Figure. I. 15. MEB et EDX de l'ITZ dans (a) le béton de GN (b) le béton de GBR [113].	46
Figure. I. 16. Réduction de la résistance à la compression des mélanges par rapport au mélange de référence [121].	48
Figure. I. 17. Résistance à la traction par fendage des différents mélanges à 28 jours [121].	49
Figure. I. 18. Variation de la déformation due au fluage en fonction de différents taux de substitution [136].	51
Figure. I. 19. Densité (a) et absorption d'eau (b) du BGR multiples.	52
Figure. I. 20. Organigramme des différentes causes de détérioration du béton [145][146].	54
Figure. I. 21. Notion de la perméabilité d'un milieu poreux selon Darcy [Darcy, 1856].	56
Figure. I. 22. Porosité accessible à l'eau en fonction des mélanges de béton.(2) Variation de la perméabilité apparente aux gaz des mélanges de béton.	57
Figure. I. 23. Variations de poids (perte et / ou gains) des échantillons en béton conservés dans 5% H ₂ SO ₄ et 5% HCl [166].	61
Figure. II. 1. Techniques de traitement des GBR.	66
Figure. II. 2. À gauche : Schéma montrant le mécanisme d'affaiblissement de ITZ et la séparation du mortier de l'agrégat [196]. À droite : Facteurs d'atténuation des micro-ondes des agrégats grossiers et des mortiers humides et secs [182].	72
Figure. II. 3. Principales morphologies de CaCO ₃ [201].	73
Figure. II. 4. Illustration des processus physiques et chimiques de carbonatation du BGR [212].	75
Figure. II. 5. Bio-dépôt de calcite (CaCO ₃) pour combler les pores du béton [43].	77
Figure. II. 6. Amélioration de la qualité des granulats mixtes recyclés par la méthode de bio dépôt de carbonate de calcium [230].	78
Figure. II. 7. Précipité de CaCO ₃ sur la surface de l'agrégat (gauche). Précipité de CaCO ₃ dans les pores de l'agrégat (à droite) [230].	78
Figure. II. 8. Précipité de CaCO ₃ avec une activité bactérienne élevée (gauche). Précipité de CaCO ₃ avec faible activité bactérienne (droite) [230].	79
Figure. II. 9. Image MEB, spectres EDX et composition des éléments du précipité de CaCO ₃ sur le GR bio traité.[230].	79
Figure. II. 10. Précipitation de CaCO ₃ dans les pores et les microfissures de gravillons recyclés, avant et après d'être traités par bio-précipitation [233].	79
Figure. II. 11. Structure du GBR après l'adoption de différentes approches de mélange (i) NMA, (ii) TSMAs and (iii) TSMAsc. [240].	84
Figure. II. 12. Mélangeur incliné avec pulvérisateur de liquide portatif [97].	85
Figure. II. 13. Corrélation entre les performances physiques du GBR pré-encapsulé et le rapport E/C de la pâte de revêtement.[67]	86
Figure. II. 14. Résistance à la compression et à la flexion du différence mélange[67].	88

Liste des figures

Figure. II. 15. Microstructures SEM de GBR non traité et de GBR traité par pulvérisation de 3% de Nano-Silice avec méthode de séchage à l'air [97].....	89
Figure. II. 16. Résultats de la résistance à l'attaque des sulfates pour le mortier [67].	91
Figure. II. 17. Perte de poids du mortier immergé dans (a) 3% H ₂ SO ₄ et (b) 1% HCl[244].	92
Figure. II. 18. Échantillons de béton immergés dans 3% H ₂ SO ₄ pendant 180 jours [244]......	93
Figure. II. 19. Échantillons de béton immergés dans 1% HCl pendant 180 jours [244].....	93
Figure. II. 20. Perte de résistance à la compression du BGR soumis à diverses charges et actions environnementales. [266] 95	
Figure. II. 21. Modèles de dommages du béton recyclé modélisé sous compression [250].	96
Figure. II. 22. Résistance à la compression et perte de résistance à la compression du BGR après des actions couplées de charges mécaniques et de cycles de solution saline [250].	97
Figure. III. 1. différentes étapes et procédure de concassage des blocs de béton	101
Figure. III. 2. Stockage des différents fraction du Gravier recyclé(3/8),(8/16),(16/25).....	102
Figure. III. 3. Analyse granulométrique de Sable de dune.	102
Figure. III. 4. Courbe d'analyse granulométrique du sable de Boussaâda.	103
Figure. III. 5. Courbe d'analyse granulométrique présentant la distribution des différents types et fraction de granulats étudiée.	105
Figure. III. 6. L'échantillon et les boules avant l'essai et après l'essai.	109
Figure. III. 7. Essais de la tenue en eau et l'absorption du GN et GBR.....	111
Figure. III. 8. méthode de pré –saturation des GBR Après 24 heure.....	115
Figure. III. 9. Évolutions de l'absorption(%) par la méthode de pré –saturation durant la 24 heure des GBR.....	115
Figure. III. 10. Malaxeur planétaire à axe vertical.	116
Figure. III. 11. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	117
Figure. III. 12. Préparation des échantillon du (BGR et BGN).	118
Figure. III. 13. conservation des éprouvettes de béton.	118
Figure. III. 14. Dispositif pour l'essai des résistances à la compression EN [12390-4].	119
Figure. III. 15. dispositif de l'essai de traction par fendage.	120
Figure. III. 16. Faciès des ruptures. Et Apparence des béton de GBR et GN à l'état durci lors de l'essai de fendage.	122
Figure. III. 17. Dispositif de détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité.....	124
Figure. III. 18. Conservation des éprouvettes dans l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation du poids.	125
Figure. III. 19. conservation de l'éprouvette dans l'eau 48 h.	126
Figure. III. 20. Appareille de ébullition des éprouvette après(b) : Dispositif de la Pesée hydrostatique de l'échantillon.	126
Figure. IV. 1. Étapes du dispositif expérimental choisi.....	132
Figure. IV. 2. Schéma représentatif du processus d'élaboration et d'encapsulation des GBR.	133
Figure. IV. 3. Protocole pour l'élaboration et la confection des BGRTi.....	135
Figure. IV. 4. La masse volumique à l'états frais de différents Mélange(BGN),(BGR) et (BGRTi).	137
Figure. IV. 5. Effet du GBRTi sur la résistance à la compression des bétons étudiés.	138
Figure. IV. 6. Graphique de l'effet principal pour différents BGRTi.	139
Figure. IV. 7. Effet du GBRTi sur la porosité accessible à l'eau des bétons étudiés.	141
Figure. IV. 8. Graphique de l'effet principal pour différents BGRTi.	142
Figure. IV. 9. Facteurs influents (a) : Résistance à la compression, (b) : Porosité.	142
Figure. IV. 10. Surfaces d'iso-réponse, (a) : Résistance à la compression, (b) : Porosité.....	143
Figure. IV. 11. Densité et absorption après immersion du BGRTi.....	144
Figure. IV. 12. Préparation des échantillons de granulats pour leur analyse ATG, FTIR, et DRX.	145
Figure. IV. 13. Appareil Dispositif utilisé pour l'analyse DRX.	146
Figure. IV. 14. Appareil Dispositif utilisé pour l'analyse ATG (a) et FTIR (b).	147
Figure. IV. 15. Préparation d'un GBRT pour son analyse par MEB.....	147
Figure. IV. 16. Préparation des échantillons. (a) : échantillon découpé à la tronçonneuse(b) : échantillon enrobé, (c) : porte échantillon de la polisseuse, (d) : processus de polissage	149
Figure. IV. 17. Résultats de l'analyse DRX pour les agrégats étudiés.....	151
Figure. IV. 18. Résultats d'analyse thermogravimétrique (ATG) pour les agrégats étudiés.....	152
Figure. IV. 19. Observations MEB - Microstructure de (GBR sec), avec temps de trempage (DT = 10 min) et ITZ (encapsulation/GBR sec).	153
Figure. IV. 20. Observation MEB : Microstructure du (GBRT sec, avec temps de trempage (DT= 3min) et ITZ (encapsulation/GBR sec).	154
Figure. IV. 21. Observations SEM : Microstructure de (GBR pré-saturé), avec temps de trempage (DT = 10 min) et ITZ (encapsulation/GBR pré-saturé).	154

Liste des figures

Figure. IV. 22. Observations et résultats EDX : Analyse microstructurale des GBRT sélectionnés : (a) (GBR sec), (b) : (GBRT pré-saturé) et ITZ (encapsulation/GBR).	154
Figure. IV. 23. Observations et résultats EDX : Analyse microstructurale des GBRT sélectionnés : (a) (GBR sec), (b) : (GBRT pré-saturé) et ITZ (encapsulation/GBR).	155
Figure. IV. 24. Comportement de la micro-dureté des ITZ.	157
Figure. V. 1. Encapsulation des GBR.	162
Figure. V. 3. Profil des Échantillons de $10 \times 10 \times 10$ cm sous la presse, après la rupture.	165
Figure. V. 4. Évaluation de la résistance à la compression des bétons après une cure de 28j et 180j.	165
Figure. V.5. Profil des Échantillons de $(10 \times 10 \times 10)$ cm sous l'action de traction par fendage après une cure de 28j et 180j.	166
Figure. V. 6. Évaluation de la résistance à la traction par fendage des bétons après une cure de 28j et 180j.	167
Figure. V. 7. Évaluation de la porosité accessible à l'eau des différents bétons	168
Figure. V. 8. Évaluation de l'absorption par immersion des différents bétons.	169
Figure. V. 9. Absorption d'eau par capillarité des différents bétons après 28j.	170
Figure. V. 10. Absorption d'eau par capillarité des différents bétons après 545j.	170
Figure. V. 11. Préparation de BGRT-5%FS et BGRT-2%HF pour (MEB).	171
Figure. V. 12. Images MEB : (a) - GBRT-5%FS, contact homogène ; (b) - GBRT-2%HF, contact hétérogène, illustrant la morphologie de la microfissuration de l'ITZ1 et de la matrice d'encapsulation	173
Figure. V. 13. Résultats EDX de (ITZ1) : (a) - GBRT-5%FS, (b) - GBRT-2%HF.	173
Figure. V. 14. Vérification instantané de la valeur de pH.	175
Figure. V. 15. État des éprouvettes des bétons étudiée dans la solution 5% H_2SO_4 en fonction du temps d'immersion.	176
Figure. V. 16. État des éprouvettes des bétons étudiée dans la solution 5% HCl en fonction du temps d'immersion.	177
Figure. V. 17. Variations de poids des échantillons de béton conservés dans 5% H_2SO_4	180
Figure. V. 18. Variations de poids des échantillons de béton conservés dans 5% HCL.	180
Figure. V. 19. Essai de compression après 90 jours de conservation en milieu agressif.	181
Figure. V. 20. Évaluation de la perte de résistance à la compression après 90 jours de conservation en milieu agressif.	182
Figure. V. 21. la configuration du test d'alcalinité.	186
Figure. V. 22. Alcalinité des bétons étudiés dans divers milieux après 90 jours.	186
Figure. V. 23. la micro-dureté des différentes zones (ITZn, ITZ1 et ITZ2) des bétons en fonction du milieu agressif.	187

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau. I. 1. Pourcentage massique des GBR autorisés par la norme	31
Tableau. I. 2. Granulométrie & proportion d'ancien mortier suivant la qualité du béton d'origine [65].....	32
Tableau. I. 3. Comparatif des masses volumiques de GN et GBR.	33
Tableau. I. 4. Absorption et porosité des GN et GBR.	34
Tableau. I. 5. Coefficient de Los Angeles (LA) des GN et GBR.	34
Tableau. I. 6. Type d'environnement influençant l'attaque chimique [164] (EN206-1, 2004).....	60
Tableau. I. 7. Classifications des attaques chimiques et la Méthode d'essai utilisée [164].	60
Tableau. II. 1. Techniques employées pour éliminer le mortier adhésif	67
Tableau. II. 2. Performance physique du GBR pré- encapsulé [67].	86
Tableau. II. 3. Effet de GFR pré-encapsulé sur la résistance aux attaques de sulfate mortier de ciment ASTM C452-2006 [243].	90
Tableau. III. 1. compositions chimiques et les propriétés physiques du ciment utilisé.	100
Tableau. III. 2. Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage.	100
Tableau. III. 3. Caractéristiques physiques de sable d'oued M'aiter: Boussaâda (0/5) mm.	103
Tableau. III. 4. La masse volumique apparente (γ) du granulats étudiée.	106
Tableau. III. 5. La masse volumique absolue (ρ) du granulats étudiée.	107
Tableau. III. 6. Porosité, compacité et indice des vides du granulats étudiée.	108
Tableau. III. 7. Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient LA.	110
Tableau. III. 8. Résultats d'essai de Los Angeles du GBR et GN.	110
Tableau. III. 9. Degré d'absorption et teneur en eau du GN et GBR.	112
Tableau. III. 10. Composition du béton dosé à 350 Kg / m ³ de ciment.	114
Tableau. III. 11. caractéristiques rhéologique des BGN et BGR.	117
Tableau. III. 12. Caractéristiques mécanique et physiques des BGN et BGR.	120
Tableau. III. 13. Coefficient d'absorption C_u à l'échéance (t) dans les différents mélanges après (28 j) en kg/m ²	124
Tableau. III. 14. Le résultat est la moyenne de la mesure sur trois éprouvettes, pour chaque composition. son récapitulés.	127
Tableau. IV. 1. La configuration de la matrice de codage.	131
Tableau. IV. 2. Matrice d'expérience.	132
Tableau. IV. 3. Propriétés physiques des granulats traités GBRTi, GBR, et GN.	134
Tableau. IV. 4. Composition de (BGN) et (BGR).	135
Tableau. IV. 5. Présenté la valeur d'affaissement au cône d'Abrams des mélange BGRTi	136
Tableau. IV. 6. Proportion chimique (%) des différents agrégats.	150
Tableau. IV. 7. Composition minéralogique (%) des granulats.	150
Tableau. IV. 8. Perte de masse relative à chaque phénomène, selon les résultats de l'ATG.	153
Tableau. V. 1. Les caractéristiques physicochimiques des divers types d'agrégats étudiés.	163
Tableau. V. 2. Les caractéristiques physiques des bétons	163
Tableau. V. 3. La perte de poids en (%) des éprouvettes des bétons étudiée conservées dans milieu 5% HCl, 5% H ₂ SO ₄ et H ₂ O, au cours du temps.	178
Tableau. V. 4. Composition minéralogique (%) des bétons étudiée.	183

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Il est largement admis que le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde entier en raison de ses caractéristiques mécaniques fonctionnelles telles que la résistance à la compression et la durabilité requises dans diverses structures de génie civil comme les barrages, les ponts, les bâtiments et autres infrastructures [1]–[3]. De plus, en raison de ses variétés, les architectes d'aujourd'hui peuvent utiliser le béton pour réaliser les formes les plus audacieuses, avec les conceptions architecturales les plus complexes [3]–[6]. Mais Les progrès technologiques et la demande croissante de structures de construction complexes nécessitent des matériaux de construction plus robustes, capables de résister à des conditions environnementales difficiles (durabilité) [7]. Sa facilité de mise en œuvre et son faible coût, par rapport aux autres matériaux, font du béton le matériau de construction le plus consommé par l'homme après l'eau. À cet égard [1], [8]–[11], la consommation de béton a été estimée à 21 milliards de tonnes en 2007 et à plus de 30 milliards de tonnes (2021) [12]–[14].

Les granulats sont les principaux composants du béton car ils représentent environ 75 % de son volume total, et par conséquent, ils influencent ses propriétés à l'état frais ou durci. Ils peuvent être naturels, recyclés ou artificiels ayant une faible densité et un potentiel isolant élevé. L'utilisation excessive des granulats naturels, tels que les graviers de carrière et les sables de rivière qui sont généralement utilisés pour la construction et les revêtements routiers, peut constituer une menace sérieuse pour l'équilibre environnemental et écologique [11], [15]–[17]. De plus, les granulats naturels ont tendance à disparaître au fil du temps étant donné la demande croissante de l'industrie du bâtiment pour la formulation du béton [11], [15], [16], [18]. De plus, le besoin croissant en granulats est directement lié aux tendances démographiques de tout pays. En effet, cette demande dépend principalement de la croissance de la population et du niveau d'urbanisation [11], [18]. Il a été constaté que, dans les pays émergents, entre 2 et 6 tonnes de granulats sont nécessaires par an et par habitant, pour la construction de logements et d'infrastructures [11][18][19]. En revanche, dans les pays développés, cette demande est comprise entre 6 et 10 tonnes par habitant et par an [11][18][19].

Il est à noter que l'Asie consomme la moitié des granulats produits dans le monde. Par conséquent, la volonté de préserver les ressources naturelles et de minimiser leurs impacts environnementaux doit être prise au sérieux par les responsables de l'industrie des granulats. Il a été démontré que la récupération et le recyclage des déchets peuvent leur donner une nouvelle valeur. Cette opération permet d'importantes économies de matières premières et peut contribuer à un meilleur développement environnemental durable.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Certains chercheurs ont constaté que les granulats issus de béton valorisé semblent être une solution de recours prometteuse aux granulats naturels (GN) pour la fabrication de béton vert respectueux de l'environnement.

Il a été rapporté que la quantité de déchets de construction a considérablement augmenté au cours des dernières décennies dans le monde entier. En effet, il a été révélé qu'en 2011, 14 millions de tonnes (MT) de déchets de construction ont été produits en Australie, 201 MT en Allemagne et 309 MT en France [20]. Il a également été rapporté que, dans l'Union européenne, les gravats de démolition s'élèvent à 500 kg par habitant et par an. En outre, selon Tam et al. [17] plusieurs pays comme le Japon, l'Allemagne et les Pays-Bas valorisent les déchets de construction et de démolition jusqu'à un taux d'environ 80 %.

Il est utile de savoir que les granulats du béton recyclé (GBR) sont obtenus en broyant en petits morceaux des blocs de béton provenant d'anciens bâtiments ou infrastructure démolis ou détruits par des tremblements de terre ; ils sont utilisés en remplacement des(GN) . Les propriétés du béton à base des (BGR) dépendent fortement des propriétés physiques, chimiques et thermiques des GBR [21]. En incorporant du GBR , la porosité du mortier attaché influence également les propriétés du béton à l'état frais et durci [22]. en outre La qualité et la quantité des GBR dans le béton ont une grande influence sur leur résistance à la compression [23] et leur durabilité [24].

De nombreuses recherches ont traité l'effet de la substitution des GN par des GBR au cours des dernières décennies [6], [25], [26],elles confirment que les GBR présentent de nombreux inconvénients. En effet, le GBR est un matériau hétérogène qui est composé d'un GN et d'un mortier adhérent [27], ce qui réduit sa densité et augmente sa porosité et son absorption qui peut atteindre cinq à dix fois celle du GN [28]–[35]. Ces mauvaises propriétés conduisent à une augmentation de la perméabilité et du retrait du nouveau béton et peuvent, en même temps, provoquer une diminution de sa résistance mécanique [11], [35]–[37].

Il est à noter que la résistance des GBR dépend du procédé de recyclage, car ils sont généralement soumis à plusieurs écrasements, ce qui les rend encore plus fragiles [38], [39]. D'autre part, Bonifazi et al.[40], ont indiqué que la zone de transition inter faciale (ITZ) est caractérisée par une porosité assez élevée et présente également des microfissures, ce qui conduit à une faible interaction entre les granulats et la pâte de ciment. Pour pallier aux inconvénients des GBR plusieurs méthodes et techniques de traitement sont adoptés, soit par élimination du mortier attaché, soit en améliorant les propriétés du mortier adhérent :

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Élimination du mortier attaché par un traitement chimique [36] ou par traitement thermique [11], [41], [42]
- Traitement du mortier attaché en améliorant ses propriétés (densité, porosité et absorption) [36] par l'accélération du processus de carbonatation [43], [44] l'auto-cicatrisation, la réhydratation, le traitement bactérien et la micro-encapsulation.

La suivante étude s'inscrit dans ce contexte. Elle s'intéresse en effet à l'amélioration de la qualité du mortier adhérent au (GBR) par un revêtement cimentaire (encapsulation) ; ce procédé est peu coûteux , facilement mis en œuvre soit en laboratoire ou sur le chantier, ce qui n'est pas le cas dans d'autres traitements où il faut éliminer le mortier adhérent par imprégnation des GBR dans des milieux agressifs (acide) ou en les exposant à des températures élevées. Ces techniques sont assez coûteuses car elles nécessitent de grandes quantités d'énergie, et peuvent également avoir des impacts négatifs sur les caractéristiques physiques et chimiques du granulat. Ces techniques peuvent également être difficiles à mettre en œuvre sur le terrain.

Le traitement par encapsulation des GBR est sélectif, seulement la fraction (16/25) a été traitée du fait que les gros granulats sont le composant essentiel du squelette granulaire. De plus, le traitement des granulats de petite fraction prend du temps en laboratoire et il est généralement difficile à le réaliser sur le terrain.

L'encapsulation des granulats est réalisée par revêtement cimentaire (coulis de ciment, avec un rapport (E/C) de 0,5) [45]. Les GBR traités sont laissés à l'air pour durcir. Dans le but d'améliorer le traitement des GBR, une modélisation par un plan factoriel complet à 2 niveaux a été utilisée, en considérant 3 facteurs indépendants qui ont une influence sur les propriétés des GBR. Il s'agit de l'état des granulats (secs ou pré-saturés), de la durée de trempage des granulats dans le coulis (3 min - 10 min) et de la période de durcissement (3 jours - 15 jours). Les réponses sélectionnées sont la résistance à la compression et la porosité des bétons incorporant ces granulats recyclés traités (GBRT). D'autre part, le logiciel statistique JMP Trial 16 a été utilisé pour optimiser le traitement et analyser l'influence de la variation des facteurs mentionnés ci-dessus sur les réponses des (BGRT_i).

Une fois les propriétés physiques et mécaniques optimales des GBRT ainsi que celles des BGRT sont déterminées et confirmées par la microstructure, et la micro dureté; un second traitement complémentaire a été proposé par addition de la fumée de silice et de l'adjuvant hydrofuge pour minimiser l'absorption et la porosité du béton signalées élevées dans la première optimisation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le remplacement total des GN par des GBR affecte considérablement la durabilité des bétons, le recours au GBRT semble être une solution prometteuse pour confectionner un béton durable renfermant 100% GBR, la question qui se pose : **peut-on considéré le traitement par revêtement cimentaire efficace pour améliorer les performances et la durabilité des BGR?**

Objectif général :

L'objectif général de cette recherche est d'évaluer la faisabilité du traitement par encapsulation des (GBR) sur l'amélioration de la durabilité des bétons renfermant des (GBRT) dans un environnement agressif.

Objectifs spécifiques :

- Caractériser les GBR, et décrire les propriétés essentielles des GBRTi et leur influence sur les propriétés du BGRTi.
- Améliorer le traitement par l'ajout d'hydrofuge et de la fumée de silice dans le coulis d'encapsulation et de déterminer les propriétés des nouveaux bétons BGRT.
- Évaluer l'impact du revêtement cimentaire sur l'amélioration de la (ITZ) dans le béton, par analyse microstructural et micro dureté.
- Évaluer la durabilité des BGRTi fabriqués entièrement avec des GBRTi, exposés à diverses conditions agressives.

Nouveauté, actualité et apports du travail

Cette étude aborde la question du développement durable dans un contexte de recyclage des matériaux pour éviter l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. L'utilisation de GBR pour la production de BGR devient incontournable, nécessitant le développement de méthodes qui minimisent les impacts des GBR sur les performances des BGR. Cette recherche contribue à répondre aux enjeux environnementaux et économiques actuels, en promouvant des pratiques de construction durables.

L'étude est structurée en De deux grandes parties résumés ci-dessous :

La première partie de ce travail est consacrée à une recherche bibliographique approfondie (Revue littérature) et est structuré en deux chapitres (Chapitres I et II)

Chapitre 1 : Les bétons à base de granulats recyclés (propriétés et durabilité)

Ce chapitre est dédié à la valorisation des déchets générés par la construction et la démolition en tant que (GBR). Nous y présentons l'état actuel du recyclage du béton, en soulignant les

INTRODUCTION GÉNÉRALE

avancées et les difficultés rencontrées. Nous aborderons également la caractérisation des GBR et les propriétés mécaniques, physiques et la durabilité des BGR qui en sont issus, ainsi qu'une description de la microstructure de ces bétons.

Chapitre 2 : Différents traitements des GBR et leurs effets sur le BGRT.

Nous mettons en lumière les différentes méthodes de traitement du GBR visant à améliorer leurs propriétés souvent médiocres. Étant donné que la qualité et la quantité de GBR influencent grandement les propriétés du BGR, ces méthodes se divisent en deux catégories : celles qui cherchent à éliminer le mortier adhérent et celles qui visent à améliorer les propriétés de ce mortier par des traitements spécifiques.

La deuxième partie de ce travail est consacrée à la présentation de la démarche expérimentale, qui se divise en trois chapitres:

Chapitre 3 : matériaux et méthode expérimentales

Ce chapitre présente les matériaux utilisés, formulation des bétons témoins et les protocoles expérimentaux.

Chapitre 4 : Traitement des GBR par revêtement cimentaire et caractérisation des GBRT et des BGRT (modélisation par le logiciel JMP)

Nous aborderons la méthode d'encapsulation de la fraction 16 à 25 mm pour améliorer les propriétés des (GBR). Un plan factoriel complet a été utilisé pour optimiser les conditions du traitement, en étudiant l'interaction entre l'état des granulats, les conditions d'immersion et les modalités de durcissement, afin de maximiser les performances en termes de résistance à la compression. L'impact de ce traitement sera évalué en analysant les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des GBRTi par rapport aux (GBR) et aux (GN). Une attention particulière sera portée à la microstructure, notamment du (ITZ) dans les GBRTi, confirmée par des techniques telles que la MEB-EDX.

Chapitre 5 : Impact de l'encapsulation cimentaire sur la Durabilité du béton.

Nous analysons l'impact de l'encapsulation sur la durabilité des bétons produits. Un traitement complémentaire a été proposé par l'ajout de 5 % de la fumée de silice (FS) et 2 % d'agent hydrofuge (HF).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour évaluer la durabilité, un programme expérimental a été mis en place, soumettant les BGRT-FS à des environnements d'agressivité variés. Les propriétés mesurées incluent la porosité, l'absorption capillaire et les profils de chlorure. Des analyses thermogravimétriques et minéralogiques ont été réalisées par DRX, FRX et ATG. L'impact de l'encapsulation a été comparé aux bétons témoins (BGN et BGR).

L'étude est clôturée par une conclusion générale et par des recommandations.

Partie I : Revue littérature.

Chapitre I

**LES BÉTONS À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS
(PROPRETES ET DURABILITE)**

Chapitre II

**DIFFÉRENTS TRAITEMENTS DES GBR ET LEURS
EFFETS SUR LE BÉTON BGRT**

PREMIER CHAPITRE

LES BÉTONS À BASE DE GRANULATS RECYCLÉS PROPRIÉTÉS ET DURABILITÉ

I. 1. INTRODUCTION

Ce premier chapitre a introduit la problématique de la valorisation des déchets issus de la construction et de la démolition (C&D). Ces déchets proviennent de la démolition de diverses structures, telles que des bâtiments résidentiels, commerciaux, des canaux en béton, des ponts, des piles et d'autres infrastructures en béton, ou encore des résidus de construction. Il se concentre en particulier sur l'utilisation des (GBR) comme squelette granulaire du béton. Cette approche s'inscrit dans une dynamique de protection de l'environnement, contribuant à la conservation des ressources naturelles et à la réduction de l'exploitation des matériaux primaires.

Il existe deux principaux types de granulats recyclés issus des déchets de (C&D) du béton. Le premier type est le granulat mixte recyclé (GMR), qui est défini comme un composé de moins de 90 % de béton et de GN, contenant également d'autres composants, tels que de la maçonnerie, de l'asphalte, des briques, des tuiles ainsi que du gypse. Le deuxième type est le granulat béton recyclé (GBR), si plus de 90 % du matériau composé du béton(mortier attaché + GN) [46].

Il convient cependant de noter que selon la bibliographie, des différences majeures entre les (GN) et les (GBR) en termes de propriétés mécaniques, physiques et chimiques sont mentionnées, limitant ainsi leur utilisations dans les bétons. Alors Il est nécessaire d'explorer des voies innovantes pour rendre les GBR utilisables et compatibles avec les réglementations caractéristiques du GN. Dans les chapitres suivants, nous approfondirons les aspects techniques des traitements et expérimentaux liés à l'utilisation des GBR dans la production de (BGR).

I. 2. CONTEXTE DE L'INDUSTRIE DU BÉTON ET L'IMPORTANCE DE la VALORISATION DES DÉCHETS CIMENTAIRES DANS LE MONDE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde en raison de ses caractéristiques mécaniques fonctionnelles telle que la résistance à la compression et la durabilité dans les différents ouvrages(les barrages, les ponts, les bâtiments et Les infrastructures) ; il permet les défis audacieux en ce qui concerne les formes , les conceptions architecturales complexes en plus de ces innovations qui ne cessent pas d'étonner les maitres d'ouvrages. Sa facilité de mise en œuvre et son faible cout (en comparaison avec d'autres matériaux) le rend le plus consommé par l'homme après l'eau. Selon l'Association mondiale du ciment et du béton « Global Ciment and Concret Association » ([GCCA](#)) en 2020 environ 14,0 milliards de m³ de béton et 4,2 milliards de tonnes de ciment ont été produits dans le monde ce la exprime le hyper besoin de béton [3].

Le béton est un mélange qui contient généralement environ 70 à 80 % de granulats en volume (dont les deux tiers sont des granulats grossiers) provenant généralement des gisements alluvionnaires naturels ou issus du concassage des roches massives conduisant ainsi à une pénurie des GN et à l'épuisement des ressources naturelles en raison du grand besoin et de la hyper - consommation de béton; donc il est nécessaire de rechercher d'autres sources alternatives pour combler cette lacune.

L'industrie de la (C&D) dans le domaine du génie civil représente une part non négligeable de la production de déchets. Le total des déchets de construction générés augmente considérablement à travers le monde [8], [41], [47] mentionne que dans l'Union européenne, les gravats de démolition s'élèvent à 500 kg par habitant et par année. Plusieurs pays comme le Japon, l'Allemagne et les Pays--Bas valorisent les déchets de construction et de démolition d'un taux d'environ 80% selon [18] il est nécessaire de valoriser la fraction inerte des matériaux de la (C&D) en la transformant et en la recyclant vers des (GBR) , présentant ainsi des sources alternatives au (GN) pour la fabrication de nouveaux bétons hydrauliques.

I. 2. 1. Valorisation des déchets issus de la (C&D)

Les déchets de la construction sont générés par la construction des bâtiments et la rénovation. Ils proviennent de matériaux excédentaires, endommagés ou inutilisables, de pièces découpées, de déchets de transformation (tels que la sciure et les déchets métalliques), de coffrages démontés, d'outils et d'accessoires usagés, d'emballages, les coffrages démontés, les outils et accessoires usagés, et les ordures. Ces déchets sont généralement produits par les personnes travaillant sur les chantiers de construction. Les déchets de démolition sont générés par l'enlèvement ou la rénovation de structures construites, telles que les ponts et les routes, ainsi que par les catastrophes naturelles (telles que les tremblements de terre, les ouragans et les tsunamis), les conflits civils, le vandalisme, les explosions, les incendies et l'effondrement de structures fragiles [18].

Les déchets de C&D représentent une part importante de la production mondiale de déchets solides. Des études suggèrent que jusqu'à 90 % des déchets de démolition envoyés dans les décharges peuvent être recyclés et réutilisés. Toutefois, des tests plus approfondis sont nécessaires pour confirmer ces résultats et analyser les pratiques réelles. Depuis 20 ans, le recyclage des matériaux de (C&D) est devenu une priorité socio-économique, en particulier dans les pays développés. Ces dernières années, les pays en développement ont également commencé à donner la priorité au recyclage des déchets de C&D [18].

I. 2. 2. Statistiques sur les déchets de C&D à travers le monde

Le niveau de recyclage et de valorisation des matériaux varie considérablement d'un pays à l'autre. Dans l'Union européenne, environ 850 M.T de déchets de C&D sont produits chaque année [48], [49].

Parmi les pays de l'Union européenne, la France produit en moyenne 349 millions de tonnes par an. En 2014, le Royaume-Uni a produit en moyenne 90 millions de tonnes de déchets de C&D par an [50] Les États-Unis produisent environ 534 millions de tonnes de déchets par an [51], le Japon produit 77 millions de tonnes de déchets de C&D par an [52] et en Australie, environ 20 millions de tonnes de déchets de C&D sont générés chaque année [53]. Hong Kong produit 15,4 millions de tonnes de déchets par an [54], [55]. La Chine génère 200 millions de tonnes de déchets de C&D, l'Inde 17 millions de tonnes, Dubaï et Abu Dhabi produisent chacun environ 7 millions de tonnes [52].

-Selon l'Agence américaine de protection de l'environnement Les déchets, de la construction et de démolition (C&D). sont définis comme des déchets résultant de nouvelles activités de construction, de rénovation ou de démolition de constructions existantes telles que les bâtiments, les stations de services publics, les rues, les autoroutes, les ponts, , les trottoirs et les

barrages [56] Les (C&D). sont généralement constitués de matériaux volumineux et lourds, par ex. Béton, bois, asphalte, gypse, métal, brique, verre, plastique et autres comme la terre et la roche. La Figure I.1 (a) montre la production de (C&D). en 2018. La Chine étant le plus grand producteur des (C&D). Avec environ 2360 millions de tonnes, suivie par les États-Unis avec environ 600 millions de tonnes et l'Inde avec environ 530 millions de tonnes en 2016. L'UE a également généré une quantité importante de (C&D), la France et l'Allemagne étant les principaux contributeurs avec 240 et 225 millions de tonnes, respectivement.

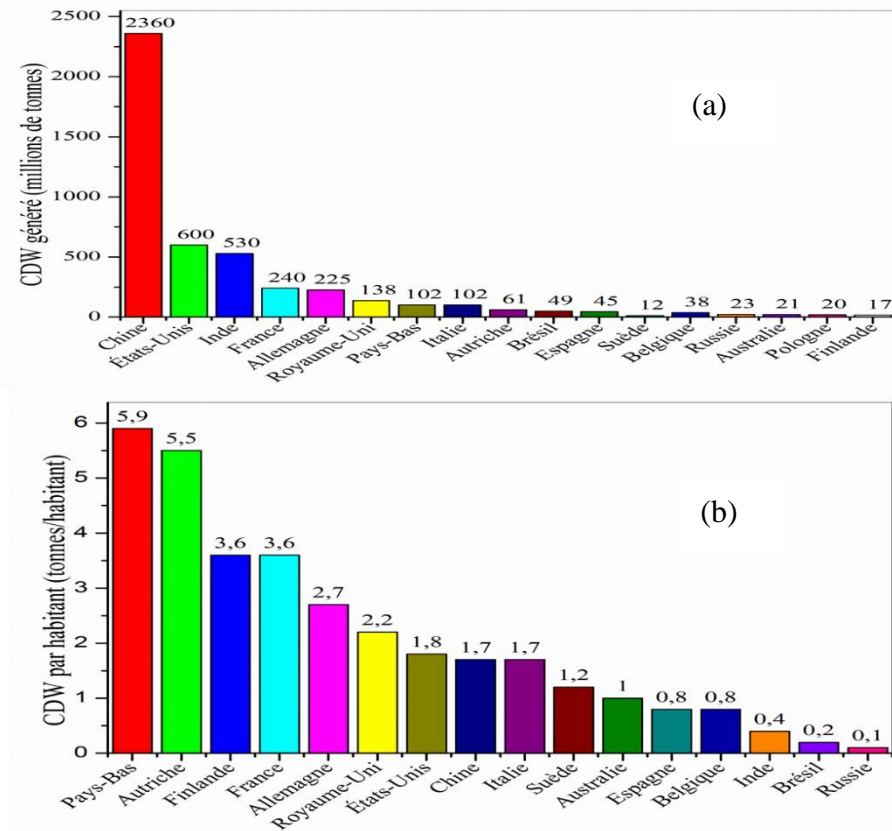


Figure. I. 1. Les pays comptant la plus grande production (C&D) dans le monde en 2018 (*les données de l'Inde et de la Russie datent de 2016 ; les données du Brésil et de l'Australie datent de 2017 : (a) production (C&D) totale et (b) génération (C&D) par population [53-55].

Les déchets de C&D sont pour la plupart récupérables et peuvent être recyclés et réutilisés pour un gain économique et un bénéfice environnemental. En Allemagne, le taux de valorisation des C&D était de 91% en 2011, tandis que en France est de 50 % de la quantité totale des C&D générés en 2014. En 2011, le Royaume-Uni a recyclé environ 62% de ses déchets de C&D, tandis que les États-Unis avaient un taux de valorisation des ressources de 48% [57]. En Australie, le recyclage des déchets de C&D a atteint environ 64% en 2014 [53]. À Hong Kong, l'industrie de la construction représente environ 38% des déchets solides [58] Cependant, le pourcentage de récupération du béton varie d'une région à une autre en raison de grandes

différences dans les traditions de construction, la législation sur les décharges et en raison de la perception et le niveau d'acceptation des constructeurs/entrepreneurs et constructeurs.

La valorisation des déchets du béton issu de (C&D) comme (GBR) est très avantageuse permettant de conserver les ressources naturelles et protéger l'environnement, sans oublier la valeur économique ajoutée. ainsi le développement des granulats issus du recyclage du béton semble être une solution alternative au (GN) [18][41]. En fonction de leur qualité, les GBR produits à partir de déchets de C&D peuvent être utilisés dans divers travaux de génie civil, qui peuvent contribuer grandement à la durabilité économique et environnementale [18]. L'histogramme de la Figure I.2 présente Les estimations de la consommation mondiale de (GBR) (par régions) :

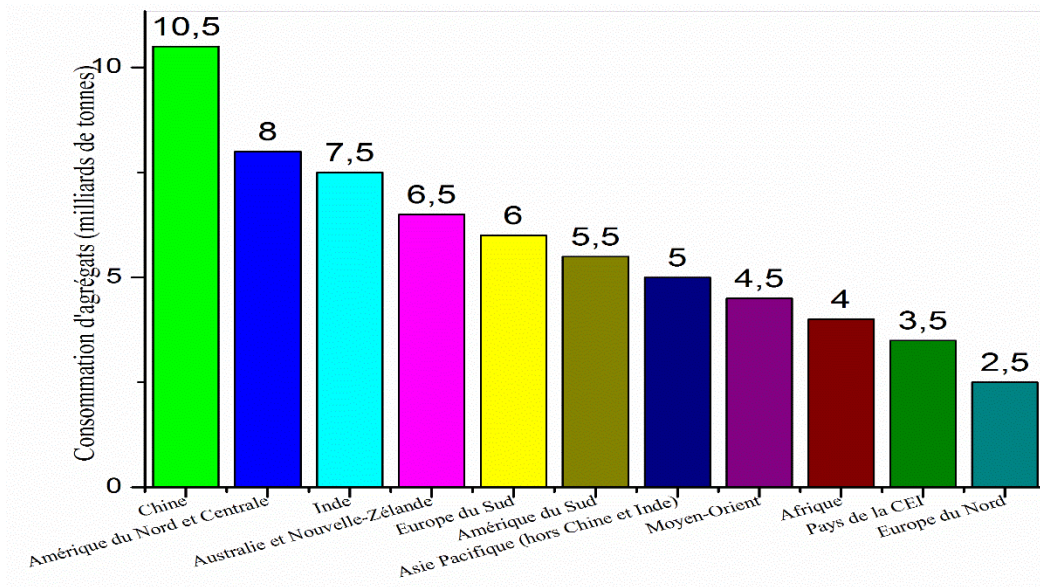


Figure I. 2. La Consommation mondiale de GBR (par régions). New York, États-Unis, 2016 [58].

I. 2. 3. Gestion des déchets de C&D

Le traitement des C&D et de démolition offre un potentiel important pour augmenter l'utilisation des GBR dans le béton.

Sur les chantiers de construction, des trieurs et des concasseurs mobiles sont souvent installés pour le traitement sur place. Il est également possible de créer des sites de traitement spécifiques, qui produisent généralement des granulats de meilleure qualité [59]. La Figure I.3 présente les meilleures estimations de la production totale de granulats et la production de GBR dans les pays de l'Union européenne, y compris l'Irlande et les États-Unis pour 2015.

Dans l'Union européenne, les déchets de construction (béton, brique, asphalte et pierre) sont transformés en granulats conformément aux normes européennes.

Des spécifications de matériaux sont également élaborées pour garantir que ces agrégats peuvent être utilisés dans la construction.

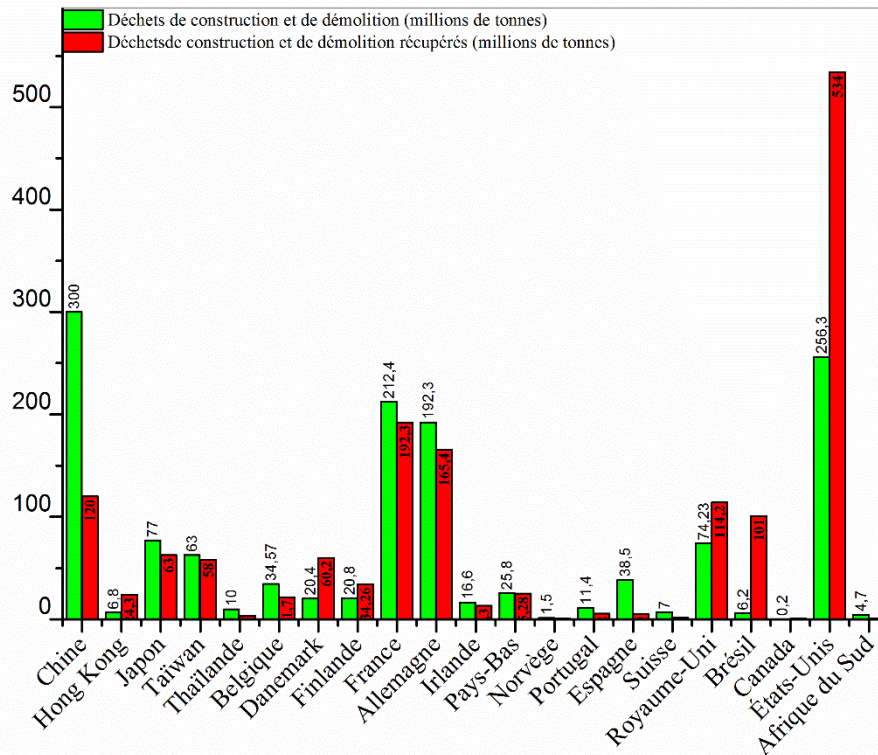


Figure. I. 3. Comparaison de la valorisation des déchets de construction et de démolition dans le monde [14].

I. 3. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS DES BÉTON RECYCLÉS

I. 3. 1. processus de Production

Le processus de production des GBR n'a pas changé de manière significative au cours des dernières décennies, malgré les améliorations apportées aux installations de recyclage des (C&D). Les installations de recyclage peuvent être fixes ou mobiles, et doivent être transportés vers des installations fixes pour y être traités, car elles ont une plus grande capacité de manutention et produisent un GBR de meilleure qualité que les installations mobiles. En revanche, les (C&D). Peuvent être traités sur place, ce qui permet de réutiliser directement les agrégats recyclés dans de nouvelles constructions sans avoir besoin d'un transport supplémentaire.

La figure I.4 illustre le processus de production des GBR , Le processus de recyclage du béton comprend généralement quatre étapes : (1) la démolition de l'ancien béton, qui peut être effectuée à l'aide d'un concasseur ou d'un marteau pneumatique ; (2) la pré séparation, qui consiste à retirer les gros morceaux d'acier, de bois, de plastique ou de papier pour augmenter l'efficacité ; (3) le criblage primaire, qui élimine les petites particules comme la terre et le gypse

; et (4) le concassage primaire et la séparation magnétique, qui réduisent la taille des GBR et éliminent les matériaux ferreux restants.

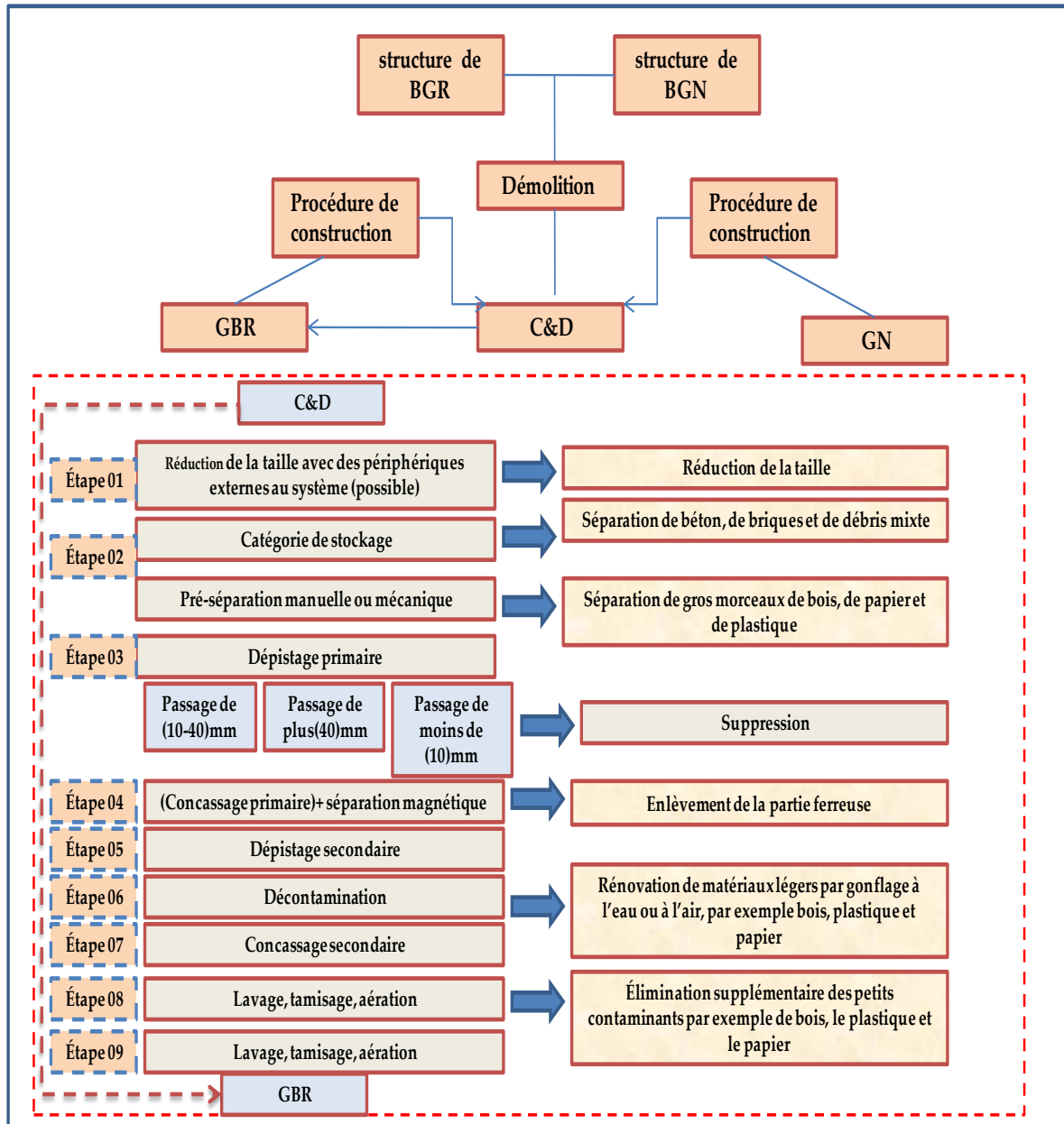


Figure. I. 4. Le processus de production du GBR et d'après Pellegrin et al. C&D désigne les déchets de construction et de démolition [59][59].

I. 3. 2. Usage et normes d'utilisation

La norme NF EN 206-1/CN régle l'utilisation des GBR dans les BGR en fonction des classe d'exposition de ces bétons. Le tableau I.1 présente un récapitulatif des taux de substitution autorisés par la norme actuelle, selon la classe d'exposition du béton.

Tableau. I. 1. Pourcentage massique des GBR autorisés par la norme EN 206-1/CN.

Type de granulats	Classe d'exposition			
	XO	XC1, XC2 (%)	XC3, XC4, XF1, XS1 (%)	Autres classes
Sable	30	0	0	0
1	60	30	20	0
2	40	15	0	0
3	30	5	0	0

Selon la (norme NF EN 206-1/CN) [60] Granulats de type 1 : GBR contenant 95% de béton ou de granulats liés, granulats de type 2 : GBR contenant 90% de béton ou de granulats liés. Granulats de type 3 : GBR contenant 70% de béton ou de granulats liés. Les granulats de type 3 sont des GBR contenant 70 % de béton ou de granulats liés. XO : pas de risque, XC : risque de corrosion par carbonatation, XD : Risque de corrosion dû aux ions chlorures non marins, XS : Risque de corrosion dû aux ions chlorure marins, XF : béton exposé aux conditions de gel-dégel, XA : risque d'attaque chimique.

I. 3. 3. Propriétés des GBR

I. 3. 3. 1. Présentation des GBR à l'échelle macro

Comme le montre la Figure I.5, le granulat On peut percevoir le BGR comme un matériau constitué de deux phases : le granulat naturel et la pâte de ciment résiduelle, Donc Un GBR est constitué d'un ou plusieurs GN entouré(s) partiellement ou totalement d'un mortier issu du béton appelé ancien mortier ou mortier attaché.

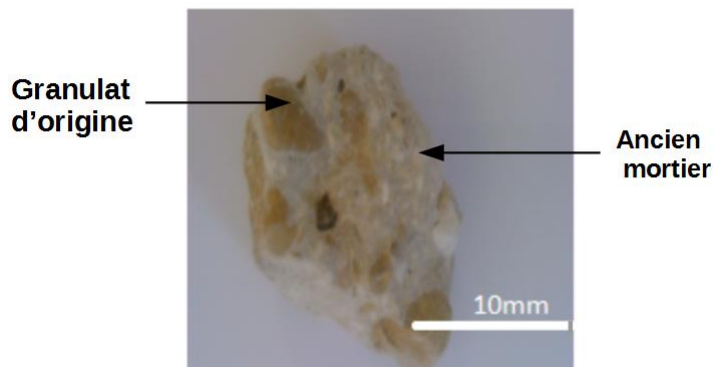


Figure. I. 5. Granulat du béton recyclé [60].

I. 3. 3. 2. Présentation des GBR à l'échelle micro

il existe une troisième phase qui agit comme une interface entre l'agrégat naturel et la pâte résiduelle. Ces interfaces affectent le processus de concassage et, par conséquent, les propriétés physiques des GBR, telles que la forme et la texture des granulats, la distribution de la taille des particules et l'absorption d'eau [18],[41]. La pâte de ciment étant généralement plus poreuse et moins résistante que les GN, elle modifie les propriétés des GBR. La proportion de la pâte augmente généralement à mesure que la taille des GBR diminue [18],[61]. Par conséquent, cet effet est plus perceptible sur les sables à BGR que sur les graviers, notamment en termes de densité, de porosité ou de taux d'absorption d'eau, l'incorporation de GBR. Cela peut engendrer des impacts néfastes sur les caractéristiques du béton (BGR) [61]–[63].

I. 3. 3. 3. Morphologie, texture et taille

La dimension des GBR dépend non seulement de la qualité du béton d'origine (d'où sont extraits les GBR) mais aussi de la technique de concassage. En effet, plus le béton d'origine est de faible qualité, plus on assiste à une augmentation du taux de fines ou sable recyclé avec des tailles moyennes de grains comprises entre quelques micromètre et 4mm (0/4 mm). Ce phénomène s'explique par la nature dégradée des liaisons granulats-mortier (au sein du béton d'origine) surtout pour de grands rapports eau/ ciment. Toutefois, sur les plates-formes de recyclage, il existe des procédés de tamisage qui permettent d'obtenir différentes granulométries de GBR 0/4mm (fines), des gravillons 4/12mm ou 4/8mm, 12/20mm,... selon les modes de traitement. Hansen et al. [64] présente un tableau récapitulatif (Tableau I.2) permettant de faire le lien entre la qualité du béton d'origine et le pourcentage volumique du vieux mortier

Tableau. I. 2. Granulométrie & proportion d'ancien mortier suivant la qualité du béton d'origine [64].

Rapport E/C du (BN)	Granulométrie(GBR) (mm)	Pourcentage volumique de mortier attaché (%)
0,4	4/8	58
	8/16	38
	16/32	35
0,7	4/8	64
	8/16	39
	16/32	28
1,2	4/8	61
	8/16	39
	16/32	25

I. 3. 3. 4. Distribution granulométrique

La granulométrie fait référence à la répartition des dimensions des granulats. Ce facteur est crucial, car il détermine la maniabilité du béton. [20]. Il convient de souligner que la distribution des granulométries de GBR est étroitement associée à la résistance du béton recyclé concassé et au type de concassage réalisé [65], [66].

I. 3. 3. 5. Masse volumique

Les GBR ont une masse volumique plus faible que les GN. Cette propriété est liée à la présence de l'ancien mortier, qui est un milieu très poreux et donc moins dense que l'agrégat d'origine.

Le tableau I. 3 présente un résumé comparatif des résultats de masse volumique entre GN et GBR à différentes granulométries.[61], [62], [64] montre qu'en général, la masse volumique des GBR varie de 2340 kg/m³ pour 4/8 mm à 2490 kg/m³ pour 16/32 mm. Ces valeurs restent constantes quelle que soit la classe de résistance du béton d'origine.

Tableau. I. 3. Comparatif des masses volumiques des GN et GBR.

Fractions (mm)	GN				GBR				Références
	0/4	4/12	12/20	20	0/4	4/12	12/20	20	
Masse volumique (kg/m ³)	-	-	-	2775	-	-	-	2504	[62]
	-	-	-	2662	-	-	-	2423	[61]
	2680	2680	2680	-	-	2410	-	-	[67]
	-	2790	-	-	-	2415	-	-	[68]

I. 3. 3. 6. Absorption d'eau et porosité

les GBR absorbe plus d'eau en raison de la nature du mortier adhérent. Ce dernier, hyper poreux, modifie le coefficient d'absorption d'eau de tout le GBR. Des essais menés par [61], [62], [64], [68] montrent un facteur de 4 à 8 entre le coefficient d'absorption d'eau d'un GBR et celui d'un GN. Et la même tendance est confirmée pour la porosité de ces granulats comme le montre le tableau. I.4

Tableau. I. 4. Absorption et porosité des GN et GBR.

Fractions (mm)	GN				GBR				Références
	0/4	4/12	12/20	20	0/4	4/12	12/20	20	
Absorption (%)	0,4	-	-	-	-	6,9	-	-	[68]
	-	3,7	1,8	-	-	8,5	5	-	[64]
	-	-	-	0,8	-	-	-	4,3	[62]
	-	0,42	-	-	-	10,7	-	-	[61]
	-	-	-	0,87	-	-	-	7,76	[63]
Porosité (%)	-	2,82	2,7	-	-	14,86	13,42	-	[69]

I. 3. 3. 7. Résistance à la fragmentation

Comme pour les autres caractéristiques, la résistance à la fragmentation des (GBR) est plus élevée que celle des (GN). Ceci reflète la fragilité des (GBR), principalement due à la présence du vieux mortier (fort porosité et peu résistant). Cette caractéristique est exprimée par le coefficient de Los Angeles (LA). Le tableau. I.5 résume les valeurs du coefficient de Los Angeles (LA), Plus ce coefficient est élevé, plus la résistance de l'agrégat est faible.

Tableau. I. 5. Coefficient de Los Angeles (LA) des GN et GBR.

Fractions (mm)	GN				GBR				Références
	0/4	4/8	8/16	20	0/4	4/8	8/16	20	
Fragmentation LA (%)	-	-	-	31,9	-	-	-	19,2	[62]
	-	28,9	22,7	-	-	30,1	28,7	-	[64]
	-	-	-	21	-	-	-	28	[70]
	-	25,9	22,7	-	-	32,6	29,2	-	[64]

I. 3. 3. 8. Caractéristiques minéralogiques

De nombreuses études ont analysé uniquement les propriétés chimiques par FRX des GBR [71][72] mais peu d'études ont été réalisées pour analyser la composition minéralogiques des GBR par DRX à l'aide de la méthode de « REDVAILED », parmi ces études nous citons les études de composition minéralogique de [73] qui ont pu montrer que les agrégats recyclés sont généralement de composition calcaire, siliceuse ou (dolomie - schiste). En se concentrant en

particulier sur la phase granulaire initiale, il est probable que des restes d'autres matériaux soient présents, et les agrégats peuvent également contenir des phases du reste de mortier. Les GBR ont une composition diversifiée, contenant une variété de minéraux et de composants chimiques [73].

La figure I.6 présente des diffractogrammes de rayons X du sable de rivière et du GBR étudiés par [73]. Il est évident que la fraction totale et les sous-fractions de chaque lot contiennent les mêmes phases.

Les principales phases du GBR sont le quartz et la calcite. Outre le quartz et la calcite, l'albite, l'orthose et le microcline sont présentes dans tous les agrégats. Le quartz et le microcline sont présents dans tous les agrégats, le quartz représentant 60 % du poids. A l'exception de la dolomie, également présente dans le lot C, aucune autre phase n'est présente dans le GBR. La quantité de quartz est nettement plus faible dans le GBR (B, C, D) que dans le sable de rivière (A). Chaque phase, son origine et sa teneur sont présentées ci-dessous. Le Quartz présent en grandes quantités dans les trois GBR (B, C, D), il provient de l'agrégat d'origine, qui est généralement du sable fluvial ou marin siliceux. Ou marin. La Calcite peut provenir de l'une des sources suivantes : granulats (calcaire, grès carbonaté, également source de dolomite) et source de dolomite et carbonatation des hydrates de ciment, soit. Pendant la vie du béton, soit après la démolition et le concassage du béton.

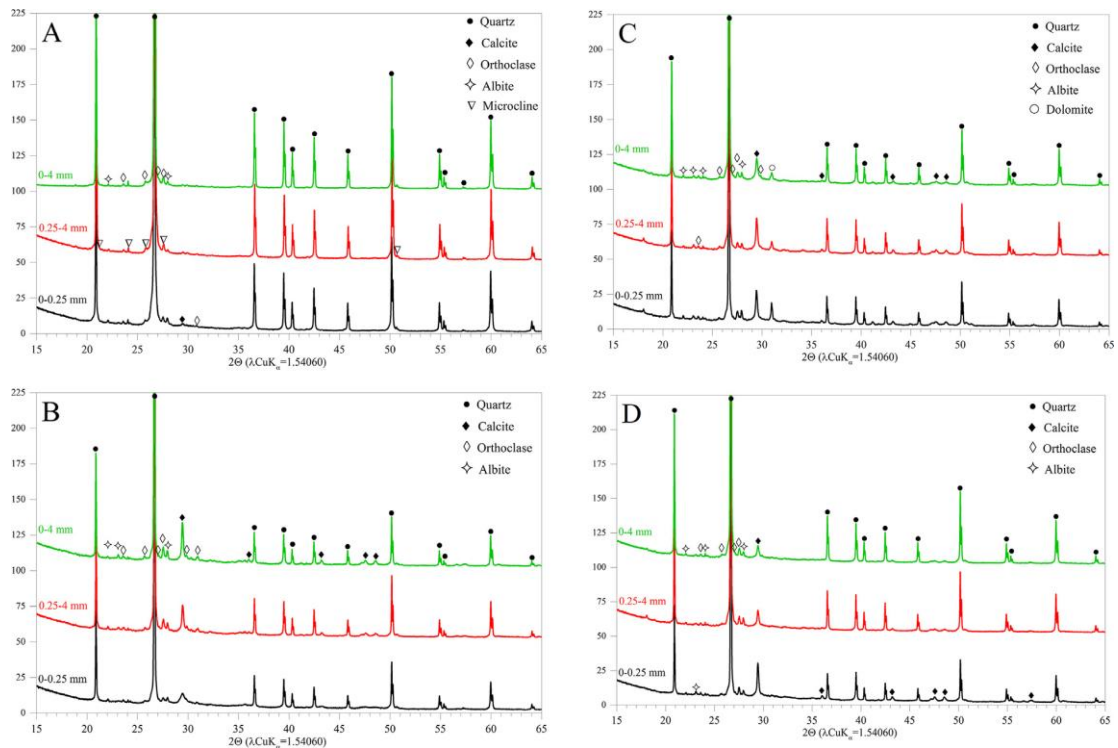


Figure. I. 6. Analyse DRX des granulats : de rivière (A) et du GBR (B, C, D). de fraction (0–0.250 mm) [73].

I. 3. 3. 9. Valeur de pH

Les travaux de [74] ont démontré que la valeur du pH de la solution de granulats fins recyclés (GFR) peut être déterminée en testant un mélange de 20 g de poudre GFR avec 120 g d'eau distillée. Les valeurs de pH ont été mesurées en fonction du temps de dissolution. Les résultats sont présentés à la figure I.7 On constate que les quatre types de solutions GFR sont alcalins, avec des valeurs de pH supérieures à 10 %. Les valeurs de pH des solutions sans sable de quartz sont supérieures à 10,5, tandis que la solution avec sable de quartz (SQ) est presque neutre. Cela indique une présence importante de produits d'hydratation dans le mortier adhérent du (GFR), qui peut faciliter des réactions supplémentaires lorsqu'il est mélangé avec le nouveau système de liant.

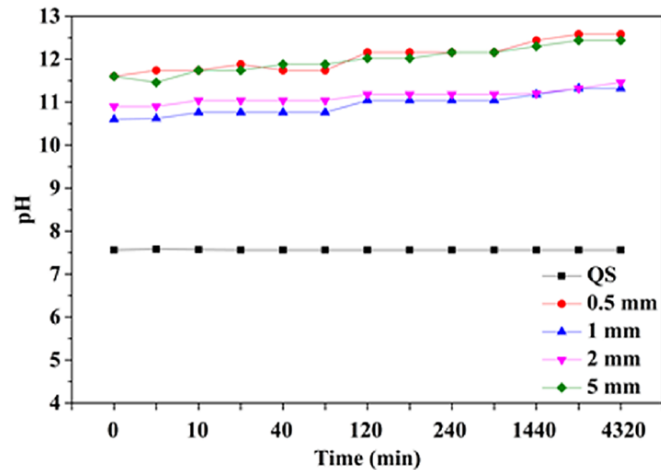


Figure. I. 7. Valeurs de pH des différents types de solutions (AFR) [1].

I. 4. PROPRIÉTÉS DES BÉTONS INCORPORANT LES GBR

I. 4. 1. Propriétés à l'état frais

I. 4. 1. 1. Comportement rhéologique du BGR

Dans le béton, l'ouvrabilité et la résistance à la compression sont les deux principales propriétés qui déterminent sa durabilité. L'ouvrabilité désigne la capacité du béton à s'écouler et à remplir uniformément les coffrages. Pour assurer un bon remplissage des coffrages et une qualité uniforme de la mise en place, il est important de maîtriser cette propriété. L'ouvrabilité est généralement mesurée par l'essai d'affaissement [75] (NF EN 12350-2). Comme les GBR contiennent une plus grande quantité de pâte résiduelle, leur effet néfaste est plus conséquent que celui des gravillons de BGR. Sedran a conclu que lorsque les GN sont remplacés par des GN/GBR, la morphologie et la rugosité des GBR conduisent à une augmentation de la dose effective d'eau ou de plastifiant/super plastifiant pour maintenir l'affaissement, tandis que leurs

propriétés mécaniques plus faibles nécessitent généralement une diminution du rapport effectif E/C pour maintenir la résistance à la compression du béton [76].

Les GBR ont un aspect écrasé et une texture rugueuse, ce qui se traduit par une faible capacité de compactage. L'incorporation de GBR dans le béton a des conséquences bien connues sur l'ouvrabilité, notamment :

- La demande en eau du béton, c'est-à-dire l'eau effective nécessaire pour atteindre l'affaissement visé, augmente généralement avec le taux de remplacement.
- Les gravillons de BGN ont un effet négatif moindre sur la demande en eau du béton par rapport au BGR. Cependant, l'effet du GBR sur la demande en eau du béton dépend fortement de son origine. En fait, la saturation des GBR n'est pas immédiate et peut prendre jusqu'à sept jours [77]–[79]. Par conséquent, si l'on utilise un GBR sec, il faut ajouter de l'eau pour compenser son absorption. Comme cette eau n'est pas absorbée immédiatement, elle peut entraîner un excès d'eau dans la pâte, conduisant à un excès initial d'affaissement, suivi d'une perte progressive d'affaissement. Il est généralement recommandé d'ajouter de l'eau progressivement pour éviter ce problème, par conséquent , il est généralement recommandé d'utiliser des GBR pré-saturés [80].

L'Augmentation de taux de remplacement sans modifier le reste de la formule du béton (c'est-à-dire l'eau et le ciment effectifs) entraîne généralement une réduction de la résistance à la compression et du module d'élasticité du béton, car les GBR ont des performances mécaniques et un module inférieurs à ceux des GN. C'est l'une des raisons pour lesquelles les taux de substitutions sont généralement limités par la réglementation. En général, l'utilisation de sables de GBR est interdite et le taux maximum de graviers de GBR est limité à 30 % [81].

I. 4. 1. 2. Méthodes de préparation du BGR et teneur en eau des GBR

En 2022, Zhang et al. [82] a conduit des investigations visant à déterminer le niveau optimal d'humidité des (GBR) pour la fabrication de BGR. Ces recherches sont basées sur des indicateurs de performance spécifiques dans deux scénarios d'approvisionnement en eau différents : un approvisionnement en eau total fixe ou un approvisionnement en eau mélangée. De plus, Zhang a élaboré un modèle décrivant le processus d'absorption/désorption d'eau des GBR à différents niveaux d'humidité initiale dans le mélange de béton. L'objectif de ce modèle est d'expliquer comment l'état d'humidité des GBR influe sur les performances du BGR. Par conséquent, cette approche expérimentale fournit des recommandations pratiques pour choisir les niveaux d'humidité appropriés des GBR à intégrer dans le béton. Cette étude passe en revue les recherches antérieures sur les effets de l'état d'humidité des GBR sur divers aspects des performances du BGR, tels que l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques, les propriétés à long

terme et la durabilité. Les résultats de ces études, rapportés dans des recherches antérieures, sont examinés en détail. Toutes les études consultées ont noté que les (GBR) présentent un taux d'absorption d'eau plusieurs fois supérieur à celui des (GN). Les niveaux d'humidité du RA peuvent varier significativement en fonction des conditions environnementales, ce qui peut avoir un impact considérable sur les performances du BGR. [80], [82], [83] montrent que Les GBR ont une capacité d'absorption d'eau élevée indépendamment de l'origine du béton de base. Cette caractéristique influence notablement le comportement rhéologique du béton frais. Lors de l'utilisation de GBR, il est nécessaire d'ajouter de l'eau pour obtenir une ouvrabilité plastique comparable à celle du béton avec des GN. Cette absorption est principalement attribuée à la présence de la pâte de ciment, mais surtout à sa structure alvéolaire. La pâte de ciment étant un matériau poreux, ses interstices ont tendance à piéger et retenir l'eau, laissant peu d'eau libre pour hydrater les grains de ciment. En raison de la porosité élevée des GBR, la consistance du béton fabriqué avec ces granulats (en fonction du pourcentage de substitution) nécessite une quantité d'eau de gâchage beaucoup plus importante que celle du béton témoin utilisant des GN.[80], [81] La méthode de préparation du béton est étroitement liée à la teneur en eau des granulats au moment de la préparation. Ainsi, il est nécessaire de considérer ces deux aspects simultanément.

Plusieurs méthodes alternatives de formulation et de préparation du béton ont été développées spécifiquement pour les bétons contenant des GBR. Parmi les approches les plus fréquemment mentionnées, on trouve la « méthode du mélange en deux étapes » [20], [84]–[86]. Et la « méthode du mortier équivalent » [87][88], ces méthodes alternatives de préparation visent généralement à compenser l'effet négatif de l'absorption importante des granulats sur les propriétés du béton. L'absorption élevée des GBR fait en sorte qu'ils peuvent absorber de l'eau du mélange s'ils ne sont pas initialement humides ou saturés lors de la préparation du béton. Diverses méthodes sont utilisées pour résoudre ce problème, avec des résultats parfois contradictoires. Par exemple, Buter a observé une augmentation des résistances à la compression de 28% et 8% par rapport aux GN pour des bétons de 30 et 50 MPa respectivement, en utilisant des granulats pré-saturés pendant 24 heures [83]. Il a donc obtenu d'excellents résultats avec des granulats saturés à 100%, tandis que d'autres chercheurs recommandent une saturation de 90% des granulats [87][89]. Selon ces chercheurs, des granulats saturés à 100% ont plus de chances de causer des saignements et, par conséquent, une diminution des propriétés du béton. D'Oliveira et al. [90] ont, quant à eux, ils ont observé qu'il n'y avait pas de variation significative entre les bétons utilisant des GBR à des teneurs en eau variables pour un rapport E/C de 0,5 [90].

I. 4. 1. 2. 1. Méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau

Cette méthode démontre la comparaison entre les deux approches de compensation de l'eau pour le béton contenant des GBR. Dans les deux cas, une quantité d'eau équivalente à la différence entre l'absorption des GBR et leur teneur en eau est ajoutée. La principale distinction réside dans le fait que, lors de la pré-saturation, l'eau est en contact avec les granulats pendant 5 minutes. Les résultats révèlent que les bétons pré-saturés présentent des performances légèrement inférieures à l'état solide et à l'état frais par rapport à ceux où seule la compensation de l'eau absorbée est effectuée. L'auteur attribue cette disparité à un "effet de clouage", expliquant que sans pré-saturation, des particules de ciment pénètrent dans les pores des GBR, améliorant ainsi l'interface granulat-pâte et, par conséquent, les propriétés mécaniques du béton. La figure I.8 illustre la séquence de malaxage pour la méthode de pré-saturation [89].

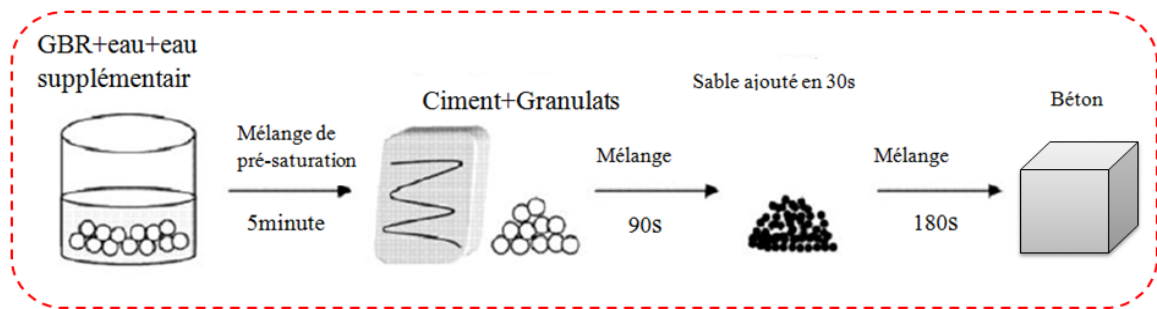


Figure. I. 8. Procédé de mélange pour la technique de pré-saturation [89].

En raison des informations préalables fournies par la littérature [89], il est démontré que les GBR présentent un taux d'absorption élevé, nécessitant ainsi une humidification préalable lors de leur utilisation dans la préparation du béton. En l'absence d'humidification, les granulats risquent d'absorber l'eau du mélange, compromettant ainsi l'ouvrabilité du béton et le contrôle du rapport E/C effectif. et pour ça Il est recommandé de maintenir un niveau de saturation d'environ 80% [89] pour réduire l'absorption d'eau par les granulats, tout en minimisant le risque de saignement. Il convient de noter toutefois que la diminution de la teneur en eau peut avoir des impacts négatifs sur diverses propriétés du béton, telles que la qualité de l'interface pâte-granulats. Ce qui peut compromettre la durabilité à long terme.

I. 4. 1. 2. 2. Méthode de L'approche du mélange en deux étapes (TSMA)

(TSMA): TWO-STAGE MIXING APPROACH

La Figure I.9 a été développée par Tam et al. (2005). [20] et Tam et al. (2007). [85] afin d'améliorer la qualité du béton à base de GBR. La TSMA consiste à diviser l'eau de l'eau de gâchage en deux parties et de les introduire dans le mélange de béton à des moments différents.

Cette approche permet de s'assurer que tous les granulats sont bien mélangés. Après 60 secondes de mélange des granulats avec la première portion d'eau, le ciment est ajouté au mélange en continuant à mélanger pendant 30 secondes. Procéder ensuite aux étapes suivantes si nécessaire. La deuxième portion d'eau est ajoutée au mélange et le processus de mélange se poursuit pendant 120 secondes. Ces informations sont basées sur les études menées par Tam et al (2005). [20] Tam et al (2007) [85].

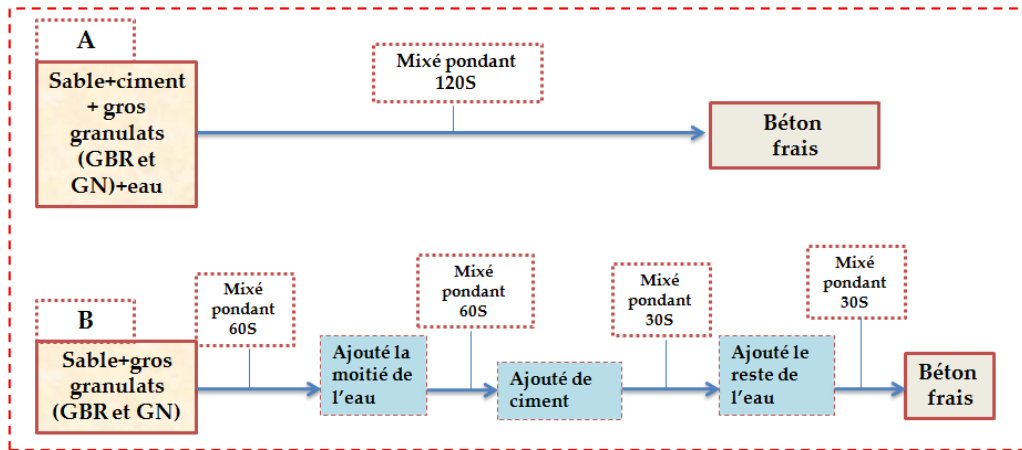


Figure. I. 9. processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale [85].

I. 4. 1. 2. la densité

Les recherches menées par P. Plaza et al. [91] et ses collaborateurs confirment que l'incorporation de 50 % de GBR a entraîné une réduction de la densité du GBR à l'état frais. En outre, la densité diminue au fur et à mesure que l'on augmente le rapport GN/GBR. Ce résultat est cohérent avec les 2,4 % à 5 % observés par Xiao et al. [92].

La figure. I.10 illustre la relation linéaire ($R^2 > 0,8$) entre le taux de substitutions par des GBR et la densité à l'état frais pour les différents types de bétons : - HR-X : bétons contenant de la pierre finement concassée et un certain pourcentage de granulats grossiers recyclés (X) , HR-X +50 : bétons contenant 50 % de sable à béton recyclé (BCS) et un certain pourcentage de granulats grossiers recyclés (X) , HR-X + 50 M : bétons contenant 50 % de sable mixte recyclé (BSMR) et un certain pourcentage de granulats grossiers recyclés (X), La densité de l'état frais enregistre une baisse plus forte dans les bétons mélangés que dans ceux avec des granulats de béton en raison de la différence de densité entre le GBR et le GN. Ces résultats sont cohérents avec les résultats rapportés par Cantero et al. [93] pour les bétons incorporant les gros granulats recyclés (6/12 mm à 12/22 mm).

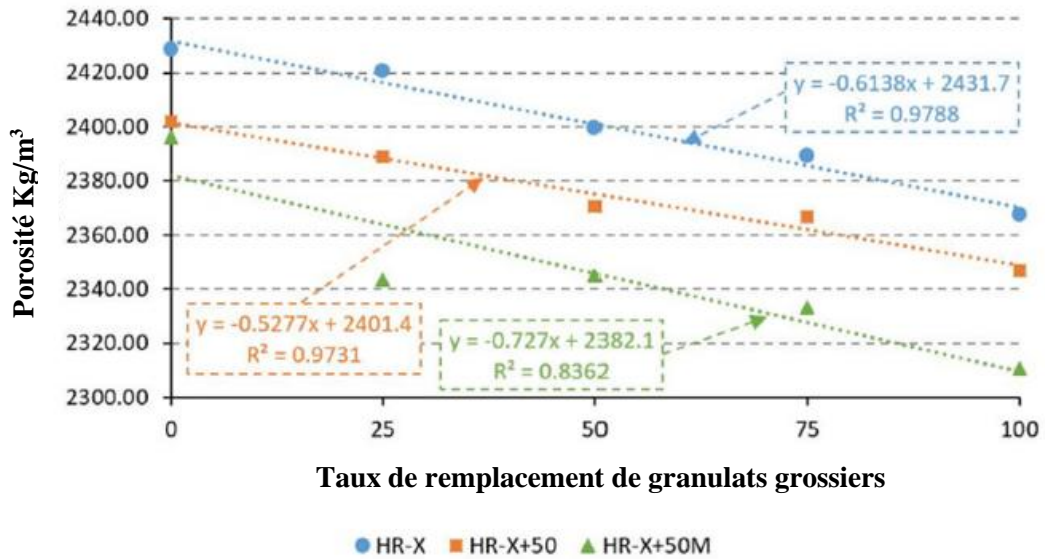


Figure. I. 10. La relation linéaire entre le taux remplacement des GBR et densité à l'état frais pour les différents types de BGR [93].

I. 4. 1. 3. Compacité

Les masse volumique des BGR a l'état frais son Il est évident que les performances physiques et mécaniques des BGR diffèrent de celles des bétons témoins BGN, étant donné que les granulats utilisés sont plus légers, ce qui explique pourquoi ils sont toujours nettement inférieurs à ces derniers.

La densité du BGR à l'état frais chute d'environ 15 % et le pourcentage d'air occlus augmente jusqu' à 0,6% par rapport au BGN, La raison en est que la mortier attaché au GBR est la principale cause de cette carence [64].

I. 4. 1. 4. Principaux problèmes majeur liés aux GBR dans le BGR

I. 4. 1. 4. 1. L'influence de la teneur en mortier attaché

Les GBR se distinguent principalement des GN par le fait qu'ils sont composés de deux matériaux différents: le GN et le mortier de ciment attaché. Il est bien connu que le mortier de ciment affecte d'autres propriétés des GBR : l'absorption est plus élevée, le coefficient d'abrasion de Los Angeles est(LA) plus faible [27].

La figure I.11 illustre ces principales propriétés défavorablement affectées par la teneur en mortier attaché.

Il faut également noter que [27] rapporte que La quantité de mortier attaché à la fraction fine est supérieure à la fraction grossière : de larges plages de 23 à 44 % pour la fraction 8/16 mm et de 33 à 55 % pour la fraction 4/8 mm ont été obtenues dans quinze échantillons. Ces relations peuvent être utilisées pour établir la valeur recyclée agrège selon les exigences pour différentes applications.

Par exemple, la sélection de granulats dont la teneur en mortier est inférieure à 44 % peut permettre d'obtenir des GBR de bonne qualité pour la production de béton structural. En utilisant ce critère, on peut obtenir des granulats ayant une densité apparente supérieure à 2160 kg/m³, une absorption d'eau inférieure à 8 % et une perte à l'abrasion inférieure à 40 % (LA40). La qualité des GBR peut être améliorée en contrôlant la résistance du béton pour assurer une valeur supérieure à 25 N/mm². Les résultats indiquent que la qualité du (BGR) est inférieure à celle du (BGN) en raison du mortier qui reste attaché dans le GBR.

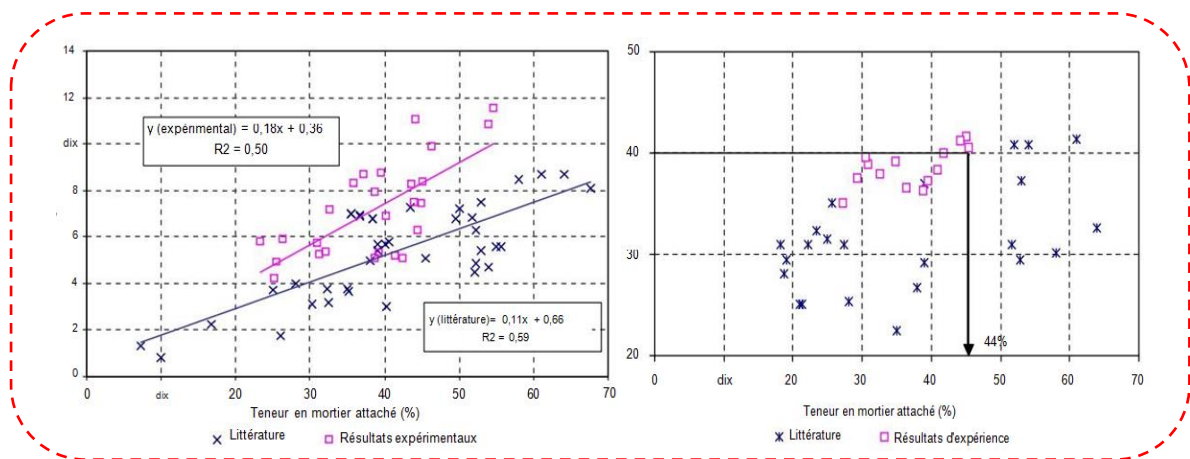


Figure. I. 11. Relation entre la teneur en mortier et : [(a) l'absorption. (b). l'abrasion de Los Angeles] [94].

I. 4. 1. 4. 2. La zone de transition interfaciale (ITZ)

Le béton est composé de granulats liés par une pâte de ciment, la (ITZ) faisant office de pont entre eux. La ITZ est le maillon le plus faible du béton et se situe entre la pâte de ciment et le granulat. La surface relativement plate du granulat perturbe l'empilement des grains de ciment, ce qui provoque l'effet de "mur" [95]–[97]. Pour cette raison, le rapport E/C était autrefois plus élevé, ce qui augmentait la porosité. Celle-ci affecte à son tour les propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Les dimensions exactes de l'ITZ ne peuvent pas être déterminées comme une valeur constante puisqu'elles varient autour de chaque particule de granulat. Cependant, la plupart des études sur l'ITZ font état d'une épaisseur qui varie d'un cas à l'autre comprise entre (10 et 50), (40 – 50), (55 – 65) ou (5 – 80) μm [77], [98], [99].

En outre, la porosité de l'ITZ semble dépendre de la distance par rapport à la surface de l'agrégat. Sun et al. [100] ont rapporté que des études utilisant la microscopie électronique à rétrodiffusion (BSE) ont montré une porosité de la ITZ interne (c'est-à-dire à 5 mm de la surface du granulat) jusqu'à six fois plus élevée que celle de la ITZ externe (c'est-à-dire à 50 mm de la surface du granulat).

La rigidité des GN est plus élevée que celle de la pâte de ciment, mais les deux ont un comportement élastique fragile. Il doit donc y avoir une raison au comportement quasi-ductile du béton composite. La différence de comportement est due à la ITZ. Au fur et à mesure que la charge sur le béton augmente, il arrive un point où la limite élastique linéaire est dépassée, ce qui entraîne une diminution progressive de la capacité portante. Ceci est le résultat de multiples microfissures dans la ITZ [101], [102].

La figure I.12 illustre différents types de GBR en fonction du mortier attaché.

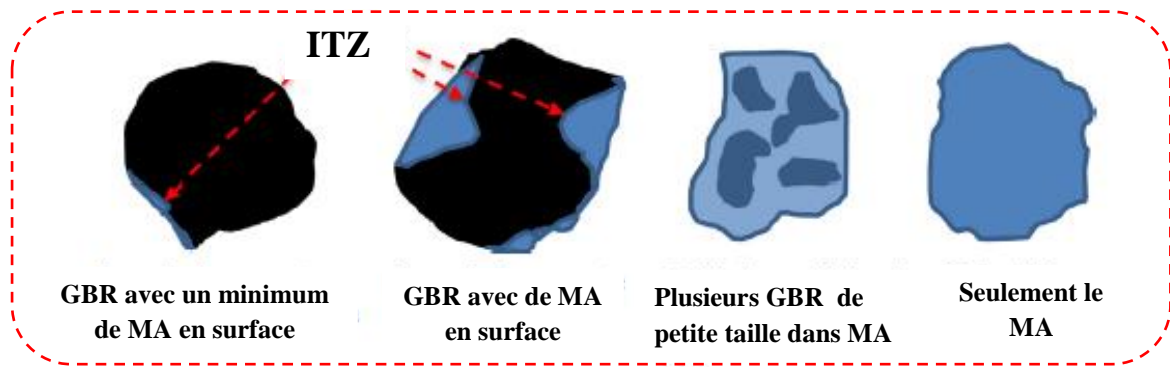
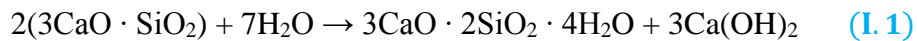


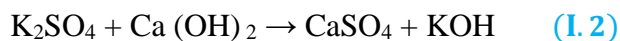
Figure. I. 12. différents types des GBR (MA : mortier attaché) [103].

I. 4. 1. 4. 3. La réaction alcali-silice (RAS)

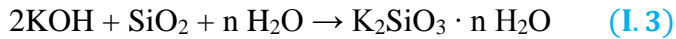
La réaction alcali-silice est une réaction chimique entre certains types de silice amorphe (SiO₂·nH₂O) présents dans les granulats et les alcalis (Na OH, KOH) dans la solution interstitielle du béton durci. Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, les principales phases du clinker, telles que l'alite, réagissent pour former des phases d'hydrate de silice calcique (C-S-H) et d'hydroxyde de calcium (Portlandite), comme le montre la formule suivante [104].



En même temps, les sulfates alcalins K₂SO₄ et NaSO₄ sont dissous en raison de leur grande solubilité. En solution, ils peuvent réagir avec la portlandite formée, par ex :



En raison de la formation d'alcalis tels que (KOH et NaOH), la concentration d'hydroxydes (OH⁻) dans la solution des pores augmente considérablement, ce qui conduit à des valeurs de pH allant jusqu'à 13,9. L'hydroxyde alcalin réagit ensuite avec la silice pour former un gel alcali-silice, qui se dilate en raison de l'absorption d'eau et de calcium.



Une augmentation du volume peut endommager le béton en provoquant l'écaillage des granulats et la fissuration de la structure. En présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, le gel alcali-silice peut former des phases C-S-H, ce qui entraîne la libération d'hydroxyde alcalin. Dans les cas marginaux, le (KOH, Na OH) peuvent être libérés de manière répétée jusqu'à ce que le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible soit épuisé. La taille des dommages causés au béton est principalement déterminée par la réactivité des agrégats, la concentration d'hydroxyde alcalin dans la solution interstitielle, et les conditions de température et d'humidité du béton durci [104].

Selon la littérature, [91] a mené une étude sur les agrégats alcali-silice recyclés, en particulier le béton concassé et le sable mixte recyclé (SMR) figure I.13. L'étude a mis en évidence une réactivité par la méthode accélérée appliquée aux mortiers.

Les représentations graphiques des éprouvettes selon la norme espagnole [146-508] [105] sont présentées dans la figure 4. L'expansion des mortiers contenant les agrégats étudiés ici était inférieure à la limite de (0,10 %) établie pour un matériau non réactif.

L'expansion la plus importante des granulats concassés dans les fines mélangées est due à la capacité de la fraction de béton + mortier lié, qui est inférieure à la limite de (0,10 %). fraction de béton + mortier attachée, qui est présent en plus grande proportion dans la fraction de béton + mortier lié, à libérer les alcalins retenus dans la fraction de béton + mortier attachée. la première, de libérer les alcalins retenus dans la solution interstitielle [106].

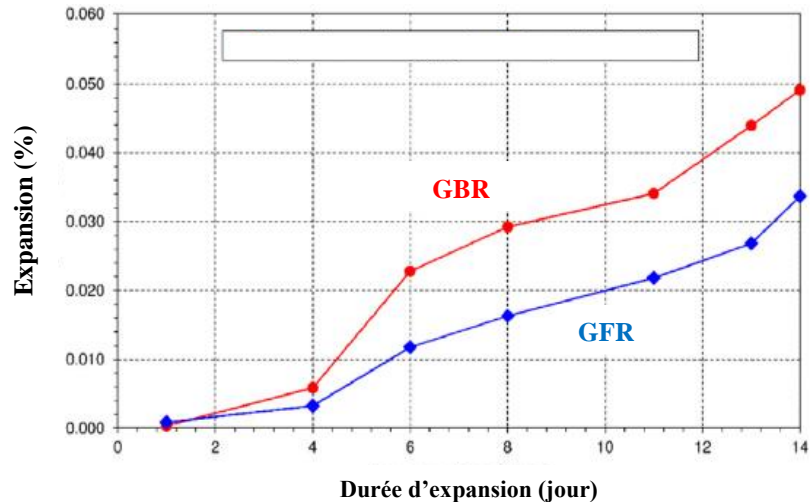


Figure. I. 13. Réaction alcali-silice dans les granulats recyclés [91].

I. 4. 2. Propriété à l'état durci

I. 4. 2. 1. Mécanisme du béton à base de (GBR)

La figure. I.14 schématisée par [107], illustre le mécanisme d'utilisation des (GBR) incorporés au (BGR). Le GBR est dérivé du C&D et se compose généralement de deux parties : les (GN) et l'ancienne couche de mortier attachée à la surface du GN. Par conséquent, le (BGR) contient deux (ITZ) : l'ancienne ITZ entre les GN et l'ancien mortier (désignée par le sigle ITZ). L'ancien mortier (indiquée par la ligne bleu clair), et la nouvelle ITZ entre le "couche de mortier attachée". Et le nouveau mortier (indiquée par la ligne bleu foncé). Par rapport à Dans les cas où le BGN est mélangé à une seule nouvelle ITZ, le BGR résultant a généralement un plus grand volume d'ITZ. Par conséquent, la porosité du BGR est généralement plus élevée que celle du BGN correspondant. Un exemple peut être trouvé dans l'étude menée par Gao et al. [20], [61], [62], [66], [69], [108]–[110], ce qui entraîne des propriétés mécaniques inférieures telles que la résistance à la compression, à la flexion et à la traction par fendage. L'augmentation de la porosité aggravera également ce problème. et également la diminution de la densité de BGR [111] et fort absorption de BGR [111][112]. Contenu est préservé et aucun élément nouveau n'est ajouté. Une ancienne couche de mortier a une résistance à la compression inférieure à celle du GN pur. En outre, des fissures peuvent facilement se former dans l'ancienne couche de mortier pendant tout le processus de fabrication des BGR. Une charge de service Une charge de service peut facilement propager ces fissures préexistantes, ce qui Concassage final du GBR [107]. La présence d'impuretés comme le bois, le plastique et l'aluminium dans les GBR peut avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques des produits en béton finis, y compris la résistance à la compression. La présence d'impuretés telles que le bois, le plastique et

l'aluminium dans les GBR peut avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques des produits finis en béton, notamment la résistance à la compression. Les recherches menées par [87] ont révélé que même une petite quantité d'impuretés d'aluminium (0,05 %, taille 2,5-5 mm) dans l'agrégat peut causer une diminution de la résistance à la compression allant jusqu'à 7 % dans le BGR.

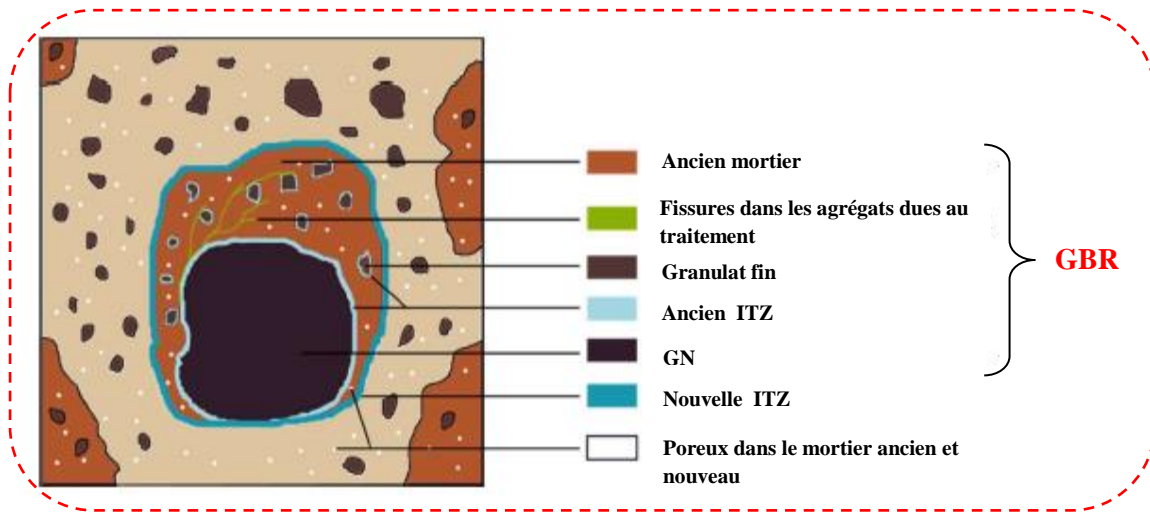


Figure I. 14. Illustration du GBR dans BGR [41].

Dans la littérature présentée, les expériences menées par Singh et al. [113] sont décrites dans la figure. I.15, illustrant les techniques caractéristiques de l'Analyse MEB-EDX appliquée aux BGR et BN. Cette Image met en évidence une délimitation nette de ITZ entre le mortier ancien lié et l'agrégat [113].

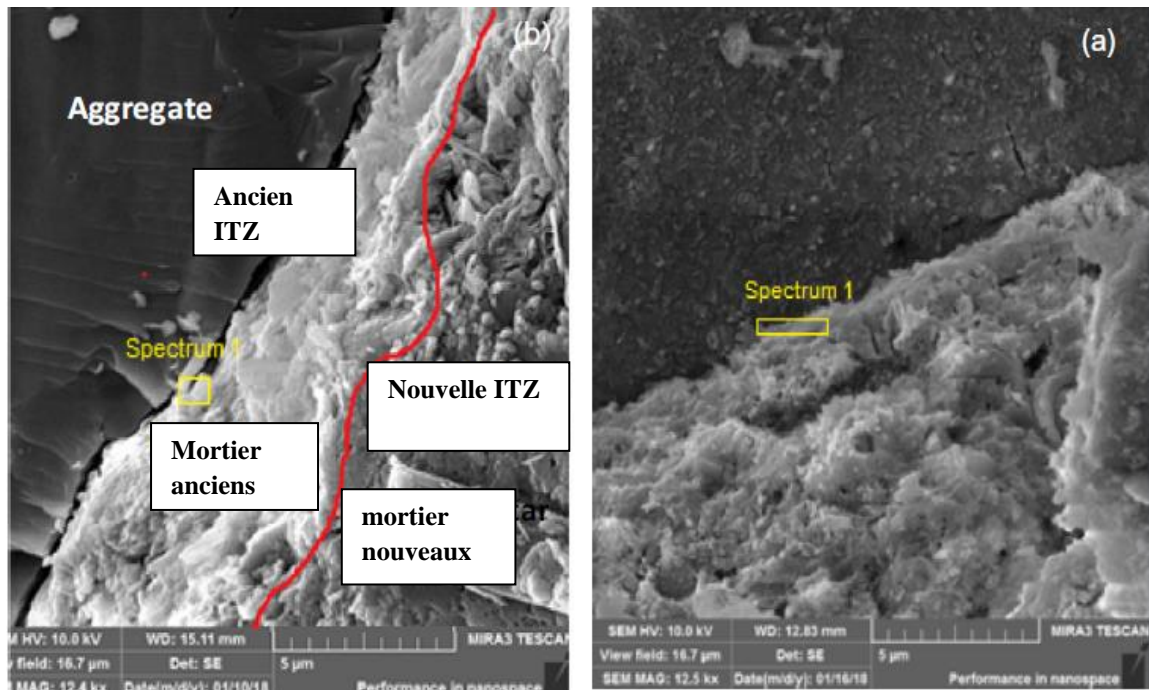


Figure. I. 15. MEB et EDX de l'ITZ dans (a) le béton de GN (b) le béton de GBR [113].

I. 4. 2. 2. Propriétés mécaniques et physiques du BGR

Pour comprendre le comportement du BGR, il est important de comparer ses propriétés mécaniques et physiques avec celles du BN à l'état durci.

I. 4. 2. 2. 1. Propriétés mécaniques du BGR

Ces propriétés démontrent comment les GBR influent sur le comportement du béton, notamment en termes de résistance à la compression, de résistance à la traction par fendage, et le module d'élasticité et de fluage.

a) Résistance à la compression

Les propriétés mécaniques des BGR dépendent évidemment des (GBR), mais, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce n'est pas le facteur déterminant. En effet, Ravindrarajah et al. [114] ont observé que la résistance des GBR dépend du rapport E/C.

Dans l'étude menée par [115] la résistance à la compression des bétons composés de GBR (granulat grossier recyclé (GGR) et deux types de granulat fin recyclé (GFR)) a été testée, les résultats ont montré une diminution de la résistance du béton qui varie de 8,7 à 14,0 % lorsqu'on remplace entièrement les gros granulats par l'GBR. Ce pourcentage est conforme à la fourchette (8,3–22,9 %) mentionnée par la plupart des auteurs [116] pour le BGR avec un taux de remplacement de 100 % [115].

La plupart des auteurs s'accordent à affirmer que la résistance à la compression des BGR est moindre par rapport à celle du BGN ayant une ouvrabilité similaire. Cette réduction de résistance est estimée autour de 10% [114], [117], [118] et 35% [64] respectivement, lors d'un remplacement à 100% des gros granulats ou des granulats fins naturels par des GBR. En cas de substitution totale des granulats du béton (gros et fins) par des granulats recyclés, cette diminution oscille entre 24% et 35% aux terme de résistance à la compression [64], [116], [119]

Trois raisons ont été proposées pour expliquer la diminution de la résistance des BGR obtenus par concassage du béton [114]. Ces facteurs sont les suivants :

- Absorption d'eau élevée des GBR : Particulièrement notable pour les fines, elle est la conséquence de la présence d'un ancien mortier de ciment recouvrant les GN.
- Faible résistance intrinsèque des GBR : Les GBR présentent intrinsèquement une résistance plus faible, ce qui contribue à la réduction globale de la résistance des BGR.
- Nombre d'interfaces transitoires plus élevé (ITZ) dans le BGR : Par rapport aux bétons

conventionnels BGN, les BGR présentent un nombre d'interfaces transitoires plus élevé, ce qui a un impact sur leur résistance globale. Il convient de noter que dans les BGR, la rupture se produit principalement dans le mortier recyclé qui adhère aux GN. Ceci contraste avec les bétons conventionnels, où la rupture se produit généralement aux interfaces entre la pâte et les GN [120].

L'utilisation des granulats fins et (GBR) pour remplacer partiellement ou totalement les GN dans le béton auto plaçant a un impact négatif sur sa résistance à la compression D'après les travaux mentionnés dans [121] la diminution varie entre 32 % et 42 %. Dans les bétons contenant des GBR grossiers et d'environ 52 % dans les mélanges contenant des BGR fins. En outre, l'utilisation de GBR grossiers et fins entraîne une diminution de la résistance à la compression du béton avec des réductions allant jusqu'à 27 % ce qui est illustré sur la figure. I.16

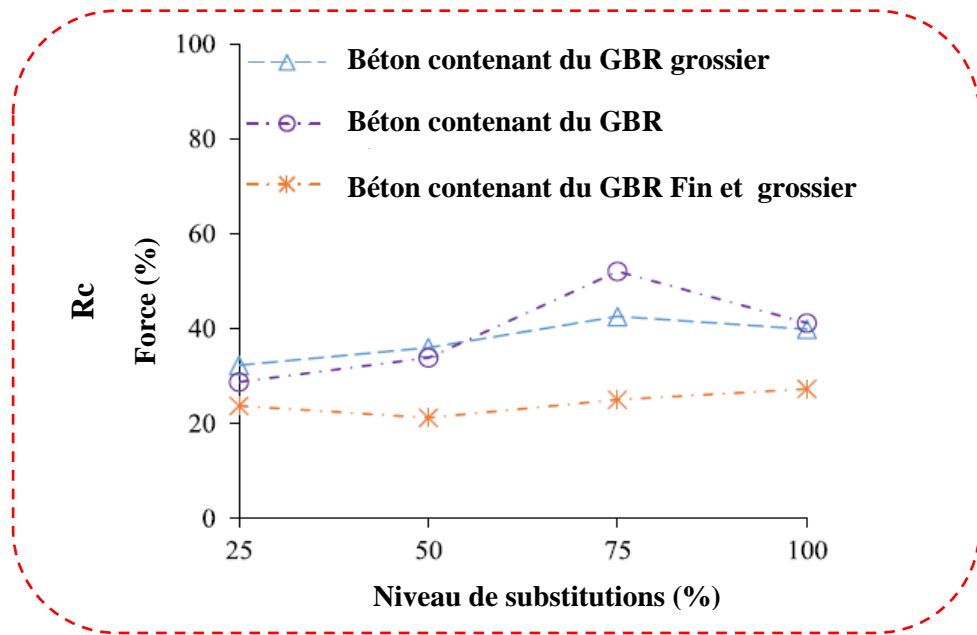


Figure. I. 16. Réduction de la résistance à la compression des mélanges par rapport au mélange de référence [121].

b) résistance à la traction par fendage

Yuyin et al. [115] On a noté une baisse de la résistance à la traction lorsque les GBGR ou du GBFR sont utilisés au remplacement des GN. Ces diminutions se situent dans les fourchettes rapportées par d'autres chercheurs, qui varient entre 1,8 % et 31,3 % pour l'inclusion de 100 % de GGR et entre 0 % et 21 % pour l'inclusion de 100 % de GBFR [118], [122]–[127] En plus Le module de rupture du BGR varie moins avec le degré de substitution et reflète souvent le niveau de cohésion ou d'adhésion entre le mortier et les granulats.

Les résultats montrent que la résistance à la traction par fendage est influencée par le taux de substitution, à des taux de substitution de (20% à 50%), 60%, et 100%, le rapport f_t/f_0 varie comme suit : 0,98, 0,95, et 0,93, respectivement [69], [94], [128]

Sasanipour et al (2020).[121] ont montré qu'il est possible d'augmenter ou de réduire la résistance à la traction en remplaçant le matériau par un autre. Figure. I.17. Par exemple, en remplaçant 25 % des GN par GBR, la résistance à la traction a augmenté de 10 à 29 % par rapport à la résistance à la traction du composé de référence. Le remplacement de 50 à 100 % n'a pas eu d'effet significatif sur la résistance à la traction.

Le remplacement de 50 % des GN par GBR fins et grossiers a amélioré la résistance à la traction. Kou et Poon. [129] suggèrent également que le remplacement des GN par les GBR a un faible effet sur la résistance à la traction, qui est similaire à celle de la résistance à la compression, en raison de l'amélioration de la composition de la pâte de ciment. En combinant 100 % de GBR, seule une réduction de 10 % de la résistance à la traction est observée. D'autres chercheurs ont également constaté que le remplacement GN par des GBR ne jouait pas un rôle significatif dans la réduction de la résistance à la traction [126], [130].

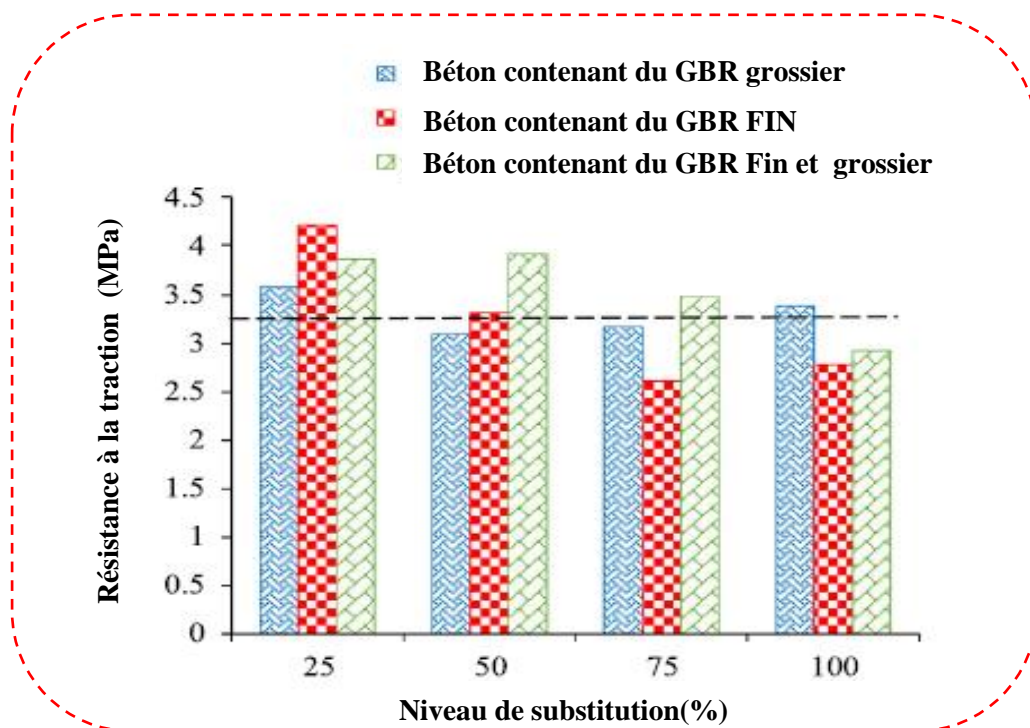


Figure. I. 17. Résistance à la traction par fendage des différents mélanges à 28 jours [121].

c) module d'élasticité

Le taux de substitution des (GN) par (GBR) influe significativement sur le module d'élasticité du béton. Une diminution pouvant atteindre jusqu'à 25% du module d'élasticité est estimée avec l'utilisation de 100% de GBR à 90 jours [131]. Cette observation est corroborée par diverses études antérieures [132][133]. La sensibilité du module d'élasticité face aux divers taux de substitution s'explique par la fragilité intrinsèque des GBR en comparaison avec les GN. En effet, les GBR se composent principalement d'un ancien granulat (provenant de l'agrégat d'origine) et d'un ancien mortier attaché, Les caractéristiques dépendent non seulement du béton initial, mais aussi de la procédure de concassage, qui peut entraîner des microfissures dans ce matériau. Zhoa et al (2022). [134], Il convient de souligner que, contrairement à la résistance à la compression, une substitution de 20 % a un effet notable sur le module d'élasticité du béton associé [131].

Yuyin et al. [115] révèlent que l'incorporation totale du BGR a induit une réduction du module d'élasticité du béton final de 18,9 à 23,6 %, tandis qu'un remplacement complet du sable naturel par le GBFR a entraîné une diminution de l'Ec de 2,1 à 16,0 %. Ces résultats sont en accord avec les recherches précédentes, qui ont montré des réductions allant de 8,3 % à 36,8 % pour les bétons contenant 100 % de GBR, et de 1,9 à 27,9 % pour ceux contenant 100 % de GBFR [115].

d) fluage

Le fluage est défini comme la déformation du BGR sous une charge constante. Les recherches indiquent que le BGR présente un fluage plus important que le béton conventionnel [64][114][128].

De nombreuses études ont mis en évidence les problèmes de résistance et de durabilités associées à l'utilisation de (GBR) dans le béton. La synthèse se concentre sur les caractéristiques principales du GBR, telles que la déformation (fluage), qui a un impact direct sur la durabilité, et recommande des méthodes pour atténuer les effets négatifs.

Ces problèmes sont principalement attribuables au mortier résiduel relativement poreux qui adhère à la surface des grains de granulats. Cette adhérence entraîne une absorption d'eau significative, entraînant ainsi une augmentation de la perméabilité et du retrait du béton. [135].

En outre, la (ITZ) plus faible, d'environ 20 à 50 μm d'épaisseur entre les particules de mortier et de granulats, joue un rôle important dans la réduction de la force d'adhérence entre le GBR et le nouveau béton frais. Ainsi, les propriétés physiques et mécaniques du GBR sont généralement inférieures à celles du béton de granulats vierges (BGN). [135].

En plus La quantité de la pâte ou de mortier dans le mélange est un facteur clé pour déterminer le fluage du béton. Domingo-Cabo et al [136], ont démontré que le fluage du BGR dépend également du taux de substitution du GN par GBR. Selon la figure. I.18 lorsque les GN sont remplacés par des GBR, le fluage du BGR augmente de 35 % pour une substitution de 20 %, et de 42 % pour une substitution de 50 % et de 51 % pour une substitution totale. Il est important de noter que le phénomène de fluage peut

également être influencé par l'environnement extérieur [137]

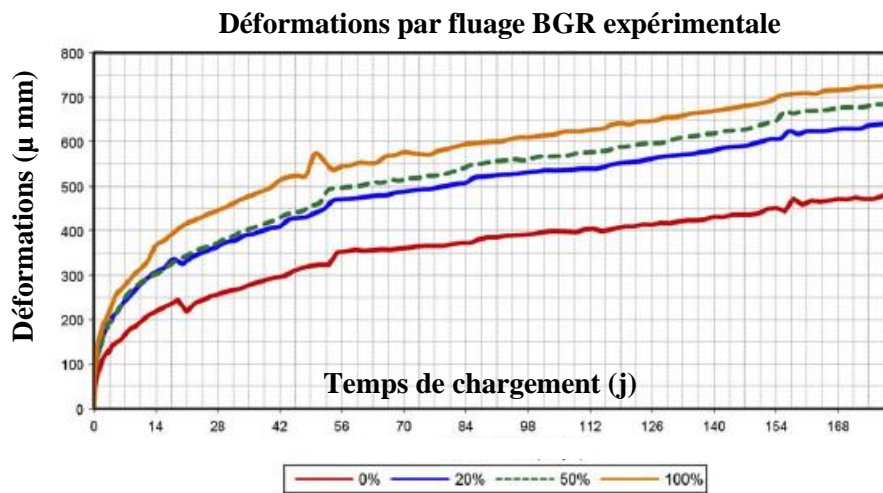


Figure. I. 18. Variation de la déformation due au fluage en fonction de différents taux de substitution [136].

e) Retrait

C'est la variation dimensionnelle ou volumétrique du BGR (raccourcissement de BGR) indépendamment de toute charge extérieure. Ce phénomène résulte soit du déplacement de l'humidité vers l'extérieur (séchage, évaporation, pré-saturation ...), soit de la consommation d'eau à l'intérieur du BGR, due au processus d'hydratation. On distingue trois types de retrait : le retrait endogène, le retrait de séchage et le retrait thermique.

Tam et al (2021). [135] montre que l'utilisation de (GBR) dans le béton présente des problèmes de résistance et de durabilité, principalement dus au mortier résiduel relativement poreux adhérent à la surface des grains de granulats. Ceci entraîne une forte absorption d'eau, ainsi qu'une augmentation de la perméabilité et du retrait.

I. 4. 2. 2. 2. Propriétés physiques du BGR durci

a) La masse volumique apparente

Les GBR ont un rapport (mortier/GN) plus élevé que les GN en raison du vieux mortier attaché aux GBR. Comme le mortier a une porosité plus élevée et une densité plus faible que les GN, la densité du BGR est toujours inférieure à celle des BGN.

En moyenne, la densité du béton diminue d'environ 5 % lorsque tous les granulats grossiers naturels sont remplacés par les GBR [138].

Kim et al (2023). [139] a trouvé que les résultats des tests de densité et d'absorption d'eau des BGN et des BGR présentés à la figure. I.19 après 28 jours de durcissement, sont respectivement de 2 330 kg/m³ et 4,75 % pour les BGN, tandis que celles du BGR varient de 2 208 à 2 372 kg/m³ et de 2,87 à 7,61%.

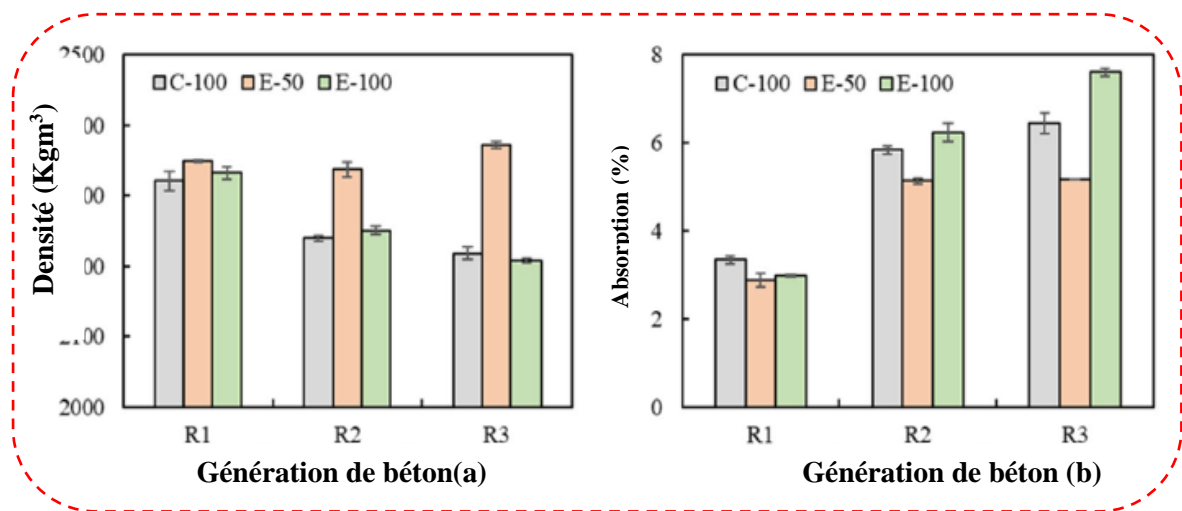


Figure. I. 19. Densité (a) et absorption d'eau (b) du BGR multiples.

b) Absorption par immersions:

Wirquin et al (2000). [140] ont rapporté que l'analyse de l'absorption d'eau dans les BGR a révélé que les mécanismes d'absorption d'eau des bétons élaborés à partir de béton concassé et ceux à base de GN sont identiques, suivant ainsi les mêmes principes physiques et obéissant aux mêmes lois. L'absorption d'eau des (BGR) présente une tendance à augmenter avec l'accroissement du pourcentage de substitution en GBR, [91][139].

Elle atteint son niveau le plus bas lorsque seulement 20% des GN sont remplacés par des GBR, comme indiqué par [141]. Par ailleurs, Olorunsogo et al.[141]. Ont observé une augmentation de 29% de la sportivité dans le béton composé à 100% de GBR par rapport à celle d'un BGN.

c) Perméabilité

Selon les travaux publiés, la perméabilité des BGR tend généralement à surpasser celle des bétons ordinaires. Lorsqu'il s'agit d'un béton composé à 100% de GBR, l'accroissement de la perméabilité est estimé entre deux et cinq fois de plus par rapport à celle d'un béton à base de GN, comme souligné dans les références [64], [119], [139], [142].

La majorité des chercheurs s'accordent sur l'idée que l'augmentation de la perméabilité des BGR est principalement due à une quantité excessive d'eau, résultant de l'absorption élevée des GBR. L'emploi de GBR conduit à une augmentation de la porosité, de la perméabilité et de l'absorption, tout en réduisant la densité du BGR. Cet impact est intimement lié aux caractéristiques intrinsèques du GBR [143][144]. Plusieurs chercheurs ont étudié l'influence des différents niveaux de remplacement des GBR sur les propriétés BGR. En général, on peut conclure que l'impact sur les propriétés du BGR est négligeable pour un remplacement de 20 à 30 % de GBR[144].

d) Gonflement

La présence de sulfates dans les GBR est identifiée comme la principale cause de la réaction sulfurique, entraînant une expansion (gonflement) susceptible de provoquer des fissures dans le béton, comme mentionné dans la référence. Les essais effectués, en tenant compte des niveaux de porosité, révèlent une augmentation du gonflement des bétons composés de GBR, allant de 20 à 60% [96].

I. 5. DURABILITÉ DU BÉTON A BASE DE GRANULATS RECYCLÉ

La durabilité est définie par la norme NF X 50-501 (durée de vie et durabilité des biens) comme "l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état-limite soit atteint".

Elle est fonction du matériau et des conditions d'exposition, qui dépendent elles-mêmes de :

- La température.
- l'agressivité chimique et mécanique du milieu environnant.
- l'humidité.

La durabilité d'une structure en béton est généralement affectée par l'action simultanée de différents facteurs externes. Les grandeurs peuvent être d'ordre mécanique, physique, chimique ou biologique figure. I. 20

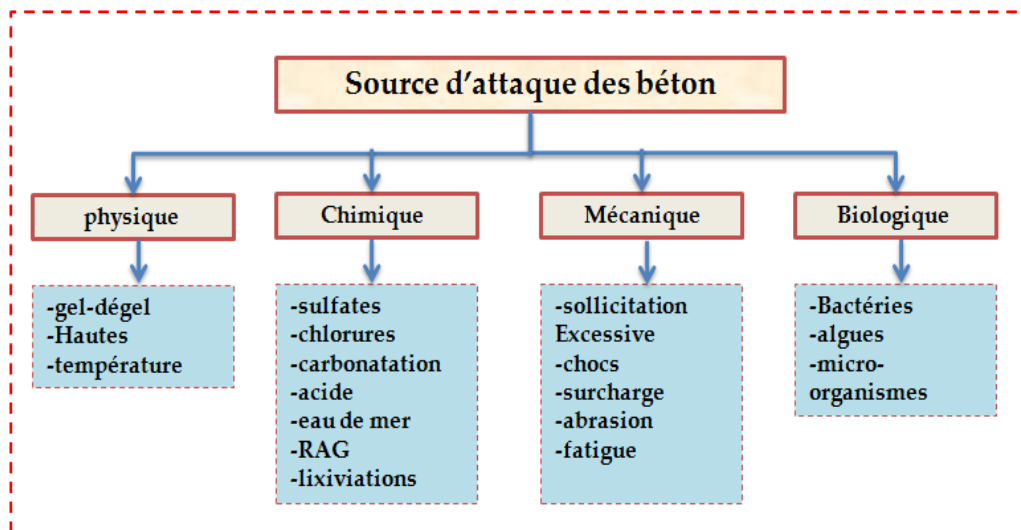


Figure. I. 20. Organigramme des différentes causes de détérioration du béton [145][146].

En général, la durabilité est très importante pour le béton armé, car elle détermine la durée de vie du béton. Elle est également définie comme la capacité à résister aux attaques chimiques ainsi qu'aux actions physiques et environnementales externes. Ces capacités dépendent d'un grand nombre de facteurs qui sont influencés par la conception et la proportion du béton jusqu'à l'exposition à l'environnement. Il existe plusieurs méthodes d'essai pour déterminer la durabilité, principalement en analysant les propriétés du ciment, des granulats et de la structure des pores du béton.

I. 5. 1. Les indicateurs de durabilité

De nombreuses études ont démontré que la résistance à la compression, traditionnellement utilisée comme indicateur de la performance du BGN, ne suffit plus à évaluer sa durabilité potentielle ni à choisir une formule répondant aux critères de durabilité [147][148].

La résilience du béton réside dans sa capacité à résister aux facteurs environnementaux de protection, les propriétés physiques et chimiques, impliquant principalement sa carbonatation, sa perméabilité à l'air et à l'eau, les migrations des chlorures et d'autres aspects connexes. Une durabilité réduite rend le béton plus sensible à l'infiltration d'ions nocifs tels que le chlorure, le sulfate, le magnésium, le H₂SO₄, le HCL et d'autres.

Cette infiltration peut entraîner la dégradation des propriétés mécaniques et physiques du béton, compromettant ainsi la sécurité de la structure en béton. Comme la pénétration de ces ions dans le béton est principalement influencée par la teneur en eau interne du béton. La plus grande porosité du BGR pourrait être attribuée au mortier attaché plus poreux [149].

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres utilisés pour évaluer et déterminer la durabilité du béton. Le revêtement en béton sert de barrière physique (la porosité, l'absorption, la perméabilité et la diffusivité) et, dans un second temps, de protection chimique (lixiviation, solubilité, réactivité). Les indicateurs de durabilité sont conçus pour évaluer ces barrières à travers des tests spécifiques. En distingue deux catégories d'indicateurs de durabilité, les indicateurs généraux propres à tous les bétons, et les indicateurs spécifiques propres à une dégradation particulière. Les indicateurs de durabilité sont des éléments clés. Ils sont fondamentaux pour évaluer et prédire la durabilité du matériau et de la structure par rapport au processus de dégradation pris en compte [150].

I. 5. 1. 1. Les indicateurs généraux propres à tous les bétons

I. 5. 1. 1. 1. Porosité ASTM (Désignation : C (642 – 06)

La porosité d'un BGN correspond à la proportion de vides présents dans sa structure par rapport à son volume total. Ce paramètre est intrinsèquement lié au rapport (E/C) du mélange. Plus ce rapport est élevé, plus la porosité tend à croître. Cette augmentation s'explique par un excès d'eau dans le mélange : une partie de cette eau, non impliquée dans les réactions d'hydratation du ciment, s'évapore au cours du durcissement du béton, laissant des espaces vides dans sa microstructure.

Dans le cas des bétons fabriqués à partir de GBR, ce phénomène est encore plus prononcé.

En effet, le mortier résiduel des GBR, souvent d'origine poreuse, contribue à accroître la porosité globale du béton. Cette caractéristique influence les propriétés mécaniques et de durabilité du matériau, nécessitant une attention particulière lors de la conception des BGR [119].

I. 5. 1. 1. 2. La perméabilité aux gaz (AFPC-AFREM, 1998) (NF P 18 – 463)

La perméabilité au gaz ou à l'eau du béton est sa capacité à être transporté par un gaz ou de l'eau sous l'effet d'un gradient de pression.

En tant que telle, elle dépend fortement du réseau capillaire du béton [151]. Dans le cas des GBR et pour un rapport E/C fixe, la perméabilité au (gaz/eau) est supérieure à celle du BN en raison de la nature poreuse des GBR [152]. En effet, Quebaud et al. [153] montre que la perméabilité du BGR augmente avec le taux de substitution des GN par des GBR, et que la substitution du (SN) accentue cette augmentation [119].

La perméabilité k d'un milieu poreux est définie par la relation de Darcy [Darcy, 1856] qui exprime le débit volumique Q d'un fluide de viscosité u qui traverse une épaisseur dx de matériau de section apparente A sous la différence de pression dp (figure. I. 21)

$$Q = \frac{k}{u} A \frac{dp}{dx} \quad (I. 4)$$

Q : Débit volumique d'un fluide de viscosité u

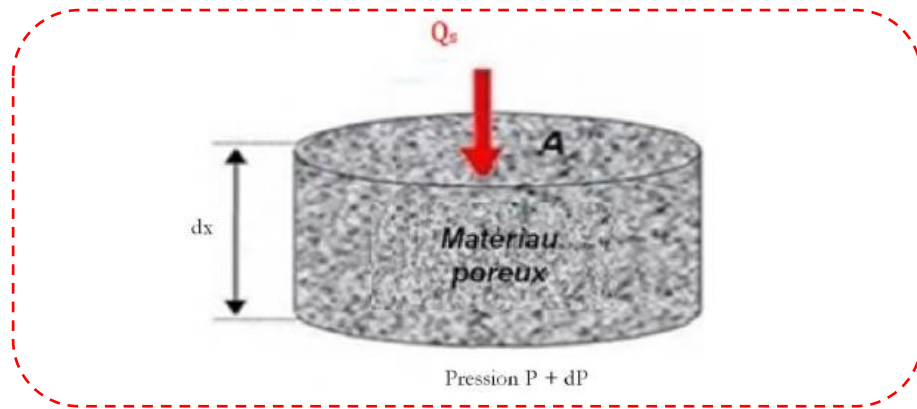


Figure. I. 21. Notion de la perméabilité d'un milieu poreux selon Darcy [Darcy, 1856].

Berredjem et al (2020). [28] ont montré que les propriétés de durabilité du BGR sont représentées dans l'essai de vide (porosité) et la perméabilité au gaz. La figure. I. 22 illustre que la porosité accessible à l'eau a augmenté dans les mélanges contenant des BGR, particulièrement dans les mélanges de béton B2 et B4 lorsque des BGR fins ont été utilisés. Cet essai a montré que la porosité est de 42% et 64% plus élevée que celle du béton de référence (B1). Par conséquent, la porosité accessible à l'eau est directement liée à la porosité globale du matériau, aux GBR, et au rapport E/C utilisé, ce qui conduit à une microstructure plus poreuse.

Ces résultats sont en accord avec [30], [111], [112], [135], [139], [154]. En plus La loi de Hagen-Poiseuille [155], [156] a été utilisée pour déterminer la perméabilité apparente au gaz dans le contexte de l'écoulement laminaire d'un fluide compressible à travers un corps poreux dans des conditions d'équilibre. La figure I. 22 montre la variation du coefficient de perméabilité apparente au gaz, Les résultats observés s'alignent sur les conclusions de Xuan et al, [44], confirmant l'impact des (GBR) sur la durabilité du (BGR).

- B1 : Béton à granulats naturels (grossiers et fins).
- B2 : Béton à GBR fin et grossier naturel agrégats.
- B3 : Béton à granulats fins naturels (GFN) et GBR grossier.
- B4 : Béton réalisé avec remplacement complet des GN par des GBR (grossier et fin)
- B5 : Béton à (GFN) et 75% granulats naturel grossier + 25% GBR grossier

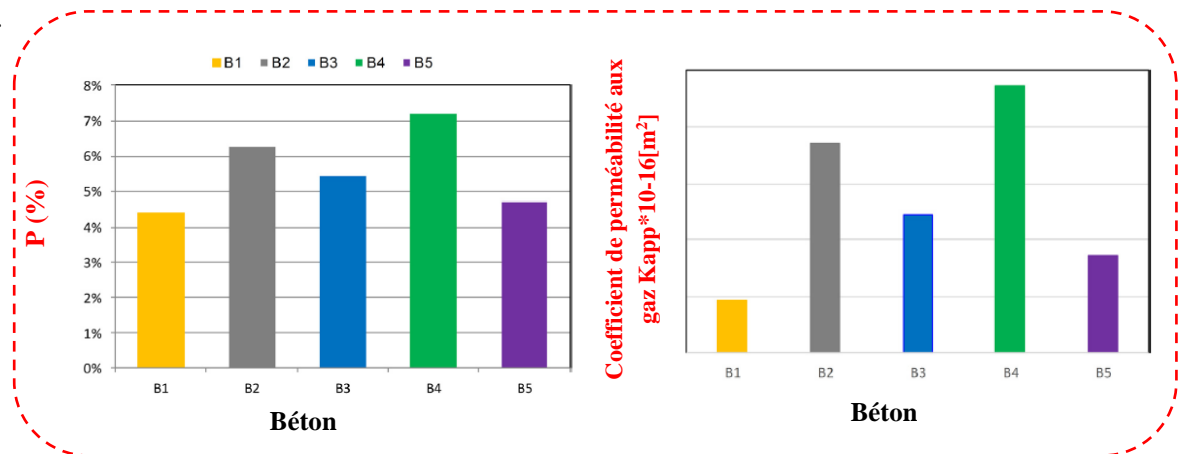


Figure. I. 22. Porosité accessible à l'eau en fonction des mélanges de béton (2) Variation de la perméabilité apparente aux gaz des mélanges de béton.

I. 5. 1. 1. 3. L'absorption capillarité (AFRM [AFPC97])

L'absorption capillaire désigne la capacité d'un matériau poreux à absorber et à transporter un fluide par capillarité, généralement de l'eau. Ce processus de transfert d'eau est influencé à la fois par la structure poreuse du matériau et par l'humidité relative du béton. Fondamentalement, l'absorption capillaire est conditionnée par la porosité du béton et la dimension des pores, conformément à la loi de Jurin [157].

I. 5. 1. 1. 4. Diffusion des ions chlorures (NT Build492)

La diffusion fait référence au mécanisme de transport d'un composant liquide ou gazeux à l'intérieur d'un milieu donné, résultant de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire sous l'influence d'un gradient de concentration.

Dans le contexte des bétons, on distingue deux modes de transport par diffusion : La diffusion en phase liquide, qui englobe le déplacement d'espèces en solution au sein de la phase aqueuse interstitielle des pores du matériau, telles que les chlorures. L'autre mode concerne la diffusion en phase gazeuse, impliquant le déplacement de gaz à travers la diffusion dans l'air présent dans la porosité et les fissures du matériau, avec une attention particulière portée sur le dioxyde de carbone. La mesure d'un coefficient de diffusion sur un volume représentatif de matériau cimentaire est une tâche très chronophage, nécessitant entre 8 et 9 semaines pour obtenir des résultats, comme reporté dans le cas d'un mortier d'une épaisseur de 1 cm et d'un rapport E/C de 0,5 [158].

I. 5. 1. 1. 5. La teneur en Ca(OH)_2 (LCPC M48)

D'autres indicateurs de durabilité peuvent être utilisés dans le cadre d'une approche performantielle. En particulier, un indicateur semble pertinent et caractérisant la barrière chimique : il s'agit de la teneur en Portlandite (ou hydroxyde de calcium Ca(OH)_2). En effet, plus la teneur en Portlandite d'un béton est élevée, plus on observera la dissolution de ce produit d'hydratation du clinker pour former du carbonate de calcium. Ainsi, la quantité de Portlandite de la pâte de ciment est un paramètre essentiel pour comprendre les mécanismes de carbonatation [150].

I. 5. 1. 2. Les indicateurs spécifiques propres à une dégradation particulière

I. 5. 1. 2. 1. Carbonatations dans les BGR

La carbonatation, un processus naturel se produisant à la surface d'un bâtiment sous l'influence du dioxyde de carbone atmosphérique (à hauteur de 0,04% en volume). L'évolution de ce phénomène est définie par une limite appelée "front de carbonatation", laquelle dépend du temps et des conditions environnementales telles que la température, l'humidité relative, les cycles d'humidification-séchage, etc. Diverses méthodes peuvent être employées pour déterminer ce front, notamment la pulvérisation à la phénolphthaléine, l'analyse de (ATG), MEB et technique analytique de RMN.

La carbonatation est une réaction naturelle entre le CO_2 atmosphérique qui, après dissolution dans l'eau, réagit avec les hydrates de ciment, la portlandite Ca(OH)_2 et les silicates de calcium hydratés C-S-H, pour former des carbonates de calcium CaCO_3 , en libérant une certaine quantité d'eau. Ces cristaux de CaCO_3 remplissent partiellement la porosité de la matrice du ciment.

Par la dissolution du CO₂ dans l'eau, la formation de l'acide carbonique qui est un diacide faible, entraîne par la suite la libération d'ions hydrogène H⁺ (aq) qui vont diminuer le pH de la solution interstitielle, qui abaisse généralement le pH du béton de 13 à un pH environ égal à 9. qui Ce conduit à une chute résistance des béton [159].

Le BGR, en général, présente une porosité plus élevée, entraînant une augmentation de la carbonatation par rapport au BGN. De nombreuses études ont souligné une corrélation entre le taux de remplacement des (GN) par des (GBR) et la profondeur de la carbonatation dans le (BGR) [160]. Selon les observations de C. Park et J. Sim, la profondeur de la carbonatation dans le BGR est environ 10 fois plus grande que dans le (BGN) lorsque l'ensemble des granulats est remplacé par des (GBR)]. Cela suggère que l'étendue du remplacement joue un rôle crucial dans l'influence des caractéristiques de carbonatation du BGR, les taux de remplacement plus élevés contribuant à une profondeur de carbonatation accrue [160]. Cependant, des résultats contrastés ont été rapportés dans certaines études. Par exemple, Xiao et al (2012). [161] ont observé une augmentation initiale de la carbonatation avec une augmentation du taux de remplacement, atteignant jusqu'à 70 %. Au-delà de ce seuil, la profondeur de la carbonatation a montré une diminution. Des observations similaires ont été faites par J. Sim et C. Park [162], indiquant des profondeurs de carbonatation globalement plus faibles aux taux de remplacement de 60 % et 100 % par rapport à 0 % et 30 %. Ils ont attribué ces divergences à la complexité des phénomènes, pouvant résulter d'erreurs expérimentales ou des caractéristiques inhérentes des GBR, fortement dépendantes des propriétés du BGN. Il est intéressant de noter qu'une proportion plus élevée de GBR peut avoir un impact positif sur la résistance à la carbonatation. Cela est attribué à la présence accrue de pâte de ciment, entraînant des niveaux élevés d'hydroxyde de calcium. Ces quantités plus élevées contribuent à la réserve alcaline des bétons avec GBR, améliorant potentiellement leur résistance à la carbonatation [151], [163].

I. 5. 1. 2. 2. Résistance au gel et dégel

Dans la littérature, une apparente contradiction émerge quant à la résistance au gel-dégel des bétons à base des GBR. Certains auteurs soutiennent que les BGR présentent une bonne résistance au gel, voire meilleure que celle du BGN. Cependant, une autre partie, majoritairement composée de chercheurs japonais, avance des conclusions opposées [96] a conclu que la résistance au gel d'un béton saturé, entièrement composé de GBR, est insatisfaisante. Par conséquent, elle déconseille son utilisation dans des structures exposées à des climats rigoureux.

I. 5. 1. 2. 3. Durabilité du béton vis-à-vis des environnements chimiques agressifs

Les environnements chimiquement agressifs, répertoriés selon des normes et des indications normatives, sont déterminés en fonction des caractéristiques des sols naturels et des eaux souterraines, dans une plage de température d'eau/sol se situant entre (5 – 25) °C. Dans cette plage, La vitesse d'écoulement de l'eau est suffisamment faible pour être considérée comme des conditions statiques. Le choix de la classe est déterminé en fonction des caractéristiques chimiques spécifiques de l'environnement concerné. [164]. (EN206-1, 2004).

a) Durabilité du béton au contact d'un milieu acide.

Les environnements chimiques agressifs, répertoriés dans les Tableaux Tableau. I.6 et Tableau. I.7, sont définis en prenant comme référence les sols naturels et les eaux souterraines. Les normes et recommandations nécessaires pour réaliser les essais d'attaque chimique sont également incluses dans le même tableau.

Tableau. I. 6. Type d'environnement influençant l'attaque chimique [164] (EN206-1, 2004).

N°	Type d'environnement	Classes d'exposition
		Correspondantes de l'EN [206-1]
1	faible agressivité chimique	XA1
2	agressivité chimique modérée	XA2
3	fort agressivité chimique	XA3

Tableau. I. 7. Classifications des attaques chimiques et la Méthode d'essai utilisée [164].

Caractéristique chimique	Méthode d'essai de référence	XA1	XA2	XA3
SO4	EN 196-2 ASTM C1012-89	≥2000et ≤ 3000	3000et ≤ 12000	>12000 et ≤24000
Mg ⁺²	ISO7980	≥300et ≤ 1000	>1000et≤3000	>3000
Acidité ml/kg	DIN4030-2 ASTM C267-97	>200 Baumann Gully	N'est pas rencontre dans la pratique	<u>Jusque' à saturation</u> n »est pas rencontre dans la pratique

Dans certaines conditions environnementales les détériorations potentielle des bétons notamment (matériaux cimentaires C-S-H) ; en raison de l'attaque par des solutions sulfuriques pures ou acides dans des conditions environnementales spécifiques. L'évaluation de cette attaque implique des analyses basées sur l'étude du gonflement des bétons soumis à l'attaque sulfurique et sur l'abrasion des bétons exposés à l'attaque acide. Les profils des sulfates ou acides, la variation de la masse des bétons et les résistances mécaniques sont également déterminés pour évaluer l'impact de l'attaque. Les essais utilisés pour ces études sont variés, mais ils impliquent généralement l'immersion d'éprouvettes en béton dans des solutions sulfuriques ou acides, souvent à des concentrations plus élevées pour accélérer les essais [165]. Pour identifier les phénomènes liés aux attaques acides et évaluer l'intensité de la dégradation du matériau, une campagne de tests accélérés a été réalisée par Saleh, F. A et al (2022) [166]. Cette campagne consistait à exposer des échantillons de béton à trois solutions acides différentes, à des concentrations élevées (5%). Les solutions acides utilisées sont l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide chlorhydrique (HCl). Le contrôle de l'acidité de la solution d'attaque était assuré par des mesures périodiques du pH pendant une période de 3 mois. La Figure. I.23 présente les variations de poids des échantillons de béton immergés totalement dans une solution acide (5% H₂SO₄) et (5% HCl) sur une période de 3 mois. La pesée de ces échantillons a permis de quantifier la dégradation subie [166].

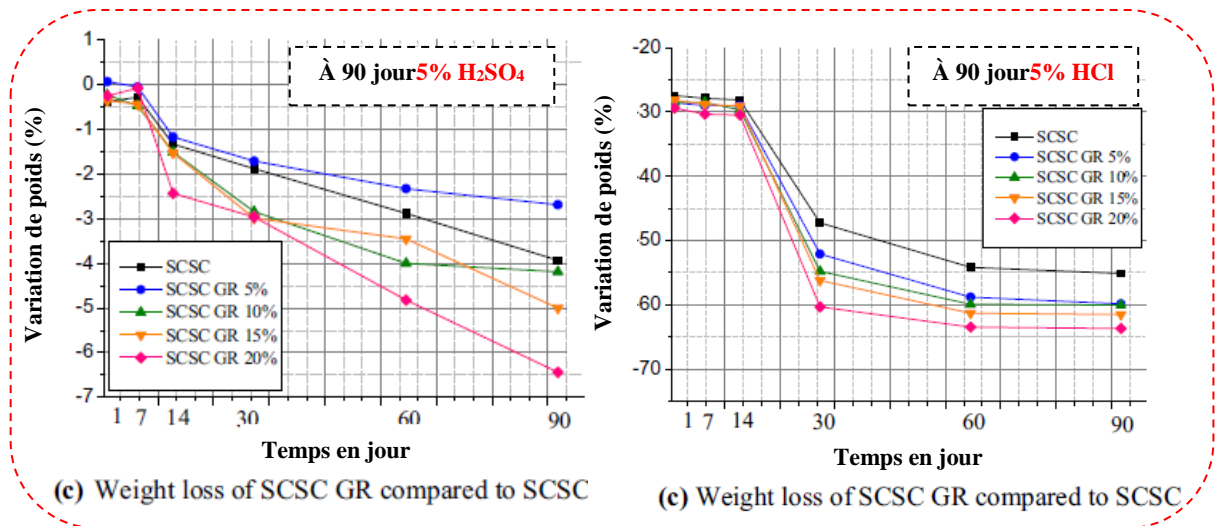


Figure. I. 23. Variations de poids (perte et / ou gains) des échantillons en béton conservés dans 5% H₂SO₄ et 5% HCl [166].

b) Durabilité du béton au contact des chlorures

Les chlorures peuvent provoquer la corrosion des armatures dans le béton, en particulier dans les environnements marins. Contrairement à la carbonatation, qui abaisse le pH du béton, les chlorures agissent comme des catalyseurs de la corrosion. Les anions de chlorure réagissent avec les cations de l'acier, créant des produits de corrosion qui peuvent provoquer une expansion de volume trois à huit fois supérieure à celle de l'acier d'origine [167]. En outre, les produits de corrosion libèrent des protons, créant un environnement acide qui contribue encore plus à la dépassivation. Ce processus ne consomme pas de chlorures, ce qui permet à la dépassivation de se poursuivre [168].

La couche d'oxyde passivant ne se dissout pas tant qu'une certaine concentration de chlorure n'est pas atteinte. Broomfield décrit ces concentrations en fonction du rapport chlorure/hydroxyle. À un rapport de 0,6, cette couche commence à se dégrader. Ce rapport est lié à une concentration de chlorure d'environ 0,4 % du poids du ciment s'ils sont coulés dans le béton et de 0,2 % s'ils sont diffusés dans le béton [169]. On pense généralement que seuls les ions chlorure dissous dans la solution des pores peuvent provoquer une corrosion par piqûres. Les chlorures qui sont physiquement liés aux phases C-S-H ou chimiquement liés par la formation du sel de Friedel ne sont pas censés provoquer la corrosion [170]. Pour prévenir les niveaux élevés de chlorure dans le béton, il est crucial de comprendre comment ils pénètrent et où ils se produisent. En outre, il est important d'identifier les propriétés du béton qui sont susceptibles d'augmenter la résistance aux chlorures.

c) performances du BGR exposés aux chlorures

Le BGR nécessite une attention particulière concernant la pénétration des chlorures, dépassant même celle du béton conventionnel. Les chlorures peuvent être présents en quantités plus élevées dans les granulats en raison de leur utilisation antérieure et de leur porosité accrue, facilitant ainsi leur infiltration dans le béton. Diverses études ont examiné l'impact de différents paramètres sur la pénétration des ions chlorure dans le BGR, se concentrant notamment sur le taux de remplacement des GBR, le rapport E/C, et les ajouts minéraux. X. Li et al. [135] et K. Xiao, L. Z. Wan et L. Yang et al. [136], ont étudié l'influence du taux de remplacement des GN par des GBR. Ils ont constaté une diminution de la résistance à la pénétration des ions chlorure avec l'augmentation du taux de remplacement du GBR. Cependant, les bétons avec moins de 50 % de remplacement ont été classés comme ayant une faible pénétration des ions chlorure, devenant moyenne au-delà de 50 %.

Les travaux de Kou, Poon et Chan et al. [137] ont examiné les effets du rapport E/C et des cendres volantes sur les propriétés du béton de GBR, montrant une amélioration significative de la résistance à la pénétration des chlorures avec une réduction du rapport E/C et l'ajout de cendres volantes. Une étude menée par Villagrán et al (2008) [171]; a identifié le rapport eau-ciment comme le principal paramètre influençant la résistance à la pénétration des chlorures. La profondeur de pénétration des chlorures augmente avec l'augmentation du rapport E/C et de la porosité. J. Sim et C. Park [162], ont également examiné l'effet de l'ajout de cendres volantes et du temps de cure sur la pénétration des ions chlorure dans le BGR, démontrant une réduction de la pénétration des ions chlorure avec l'ajout de cendres volantes et une amélioration avec un temps de cure prolongé. Une autre étude de B. Qi, J. Gao, F. Chen, et D. Shen [172] a évalué le comportement de pénétration des chlorures dans le BGR sous des conditions de cycles sec-humide et de charge de flexion, montrant une augmentation de la teneur en chlorure, de la diffusion, et de la capacité de liaison avec le taux de remplacement. Certaines études se sont concentrées sur le comportement de liaison BGR, suggérant une augmentation de la capacité de liaison du chlorure en raison de la plus grande quantité de gel C-S-H [173].

I. 6. CONCLUSION

Comme observé dans le premier chapitre à travers la revue de la littérature, l'utilisation du GBR dans le béton montre des performances limitées en termes de propriétés de durabilité. Par conséquent, il est essentiel d'explorer des solutions alternatives pour améliorer le GBR de diverses manières, afin d'améliorer sa contribution au béton. C'est l'objet du deuxième chapitre.

Chapitre II

**DIFFÉRENTS TRAITEMENTS DES GBR ET LEURS
EFFETS SUR LE BÉTON BGRT**

DEUXIÈME CHAPITRE

DIFFÉRENTS TRAITEMENTS DES GBR ET LEURS EFFETS SUR LE BÉTON BGRT

II. 1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous mettons la lumière sur les différentes méthodes de traitement du GBR visant à améliorer ses propriétés médiocres, il est connu que la qualité et la quantité de GBR utilisés dans la production de béton affectent grandement ses propriétés et son durabilité. Ainsi, le nombre de recherches dans le domaine de l'amélioration de la qualité a considérablement augmenté, non seulement en quantité mais aussi en termes de diversité des méthodes d'amélioration. Fondamentalement, ces méthodes peuvent être regroupées en deux catégories : celles visant à éliminer autant que possible le mortier adhérent, et celles visant à améliorer les propriétés du mortier adhérent par le biais d'un traitement spécifique.

II. 2. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE TRAITEMENT

La réutilisation des déchets de construction et de démolition en tant que granulats pour le béton a fait l'objet de nombreuses recherches. Les chercheurs ont étudié profondément l'impact de la substitution des GN grossiers par les GBR sur les propriétés du béton [23] et sa durabilité [24] ainsi que l'effet de la quantité de mortier attaché sur ces dernières [122]. D'autres études ont examiné l'influence des paramètres de composition du béton tels que : la résistance du béton de base GBR, le rapport E/C et l'état d'humidité des granulats utilisés [22], [27], [144], [174], [175], et les méthodes de cure sur les caractéristiques du nouveau béton en essayant de les améliorer par l'ajout des additions minérales au mélange du béton. Par suite il est apparu que la concentration sur le GBR est plus efficace, leur amélioration avant de les incorporer dans le mélange de béton s'avère avoir un effet favorable sur les propriétés du béton. En raison des effets variables du mortier adhérent sur la qualité des GBR, plusieurs approches et techniques ont été envisagées pour améliorer les caractéristiques des GBR. Ces approches et techniques peuvent être principalement classées en deux catégories [176].

- La première catégorie comprend principalement l'élimination du mortier adhérent de la surface des BGR en utilisant différentes méthodes.

- La deuxième catégorie comprend la modification et l'amélioration des propriétés des BGR en améliorant la qualité du mortier adhérent.

1) Celle visant à éliminer autant que possible le mortier adhérent à la surface du BGR [177][178] se base sur des traitements mécanique [177], thermique [177], [178] ou chimique par ce qu' une grande quantité de mortier adhérent est considérée comme le principal facteur compromettant la qualité des BGR [94], [125], [179]. Le mortier adhérent procure aux BGR une faible densité, une absorption d'eau élevée et une porosité élevée.

2) Celles visant à améliorer les propriétés du mortier adhérent par le biais d'un traitement spécifique [20], [45], [97], [180], [181].

Plusieurs techniques de traitement des BGR sont examinées en détail dans les sections suivantes ; la Figure. II. 1. Résume les différentes méthodes de traitements.

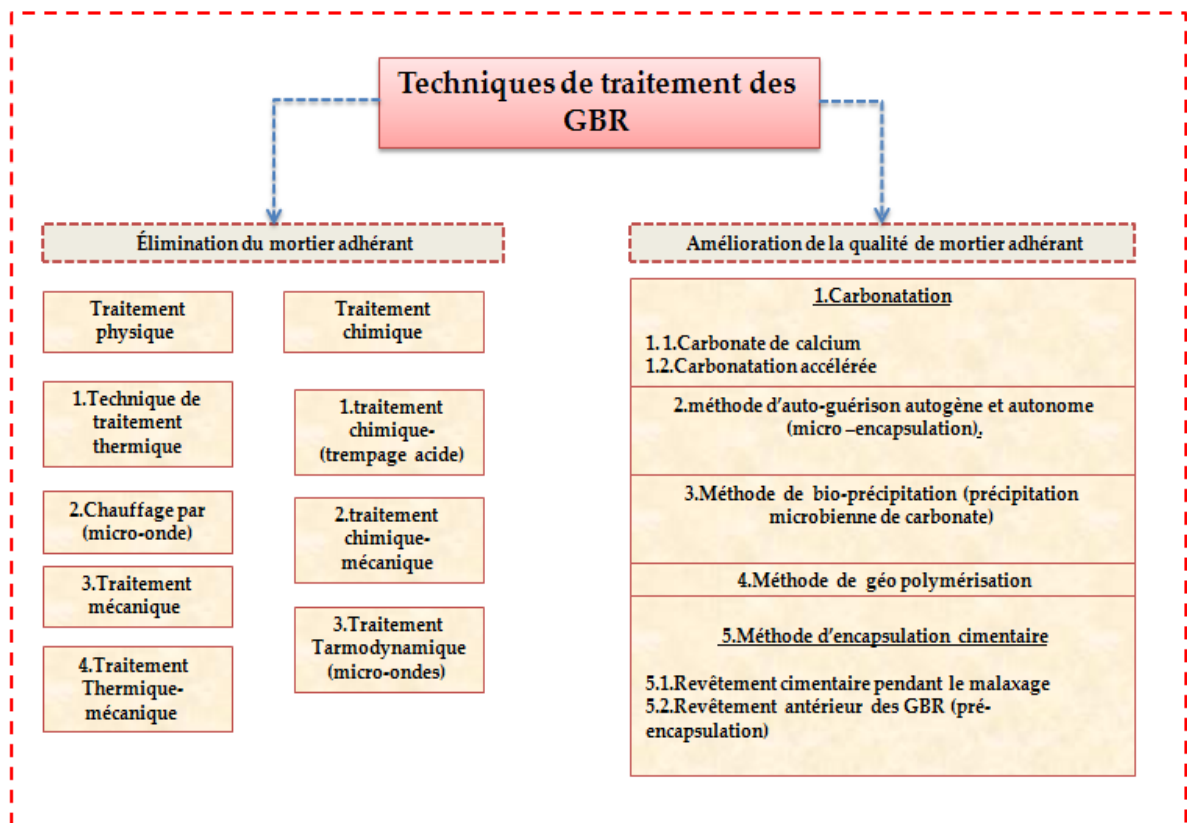


Figure. II. 1. Techniques de traitement des GBR.

II. 2. 1. Élimination du mortier adhésif

II. 2. 1. 1. Traitements thermiques, mécaniques et chimiques

Comme mentionné dans la section précédente, la porosité et l'absorption du mortier résiduel réduisent les performances des GBR. Pour améliorer la qualité des GBR, ils peuvent être soumis à des traitements thermiques, mécaniques ou chimiques afin d'éliminer la couche de mortier attachée. Un résumé des études sur l'efficacité de ces techniques est présenté dans le Tableau. II.1 Bien que ces traitements permettent d'éliminer une grande partie du mortier résiduel, ils demandent beaucoup d'énergie et de temps, ce qui augmente les coûts et les rend non rentables à grande échelle. De plus, des contaminants peuvent être générés lors du traitement des GBR, ce qui peut entraîner des dommages supplémentaires à leurs propriétés (par exemple, microfissuration, détérioration des granulats et altération de l'interface ITZ ancienne), ainsi qu'affecter leur durabilité en raison des solutions résiduelles présentes dans les GBR. C'est pourquoi d'autres alternatives à ces traitements sont actuellement étudiées.

Tableau. II. 1. Techniques employées pour éliminer le mortier adhésif.

Technique	Avantages Et efficacité	Contraintes	Référence
Thermique	À des températures dépassant 700 °C, seulement 2 % du mortier résiduel demeure attaché aux GN	À températures supérieures à 500 °C, les propriétés des GBR peuvent être réduites. Génération des composants polluants issus de la combustion	[33]
Thermique (micro-ondes)	Le chauffage par micro-ondes a été étudié pour améliorer la qualité du BGR en réduisant l'adhérence du mortier aux particules et en éliminant partiellement le mortier cimentaire, confirmant ainsi l'absence de son (ITZ).	Les problèmes potentiels de durabilité induits par le traitement et le coût élevé sont des considérations importantes à prendre en compte	[182]
Thermique (micro-ondes)	L'absorption d'eau de GBR a diminué de 33 % tandis que la densité apparente a augmenté de 3,8 %.	Cette méthode comporte des inconvénients liés à la durée requise pour effectuer le traitement, à la qualité inférieure des GBR ainsi qu'à la consommation d'énergie associée.	[182]
	Le ré-concassage du GBR est réalisable et peut être répété plusieurs fois selon les besoins, permettant ainsi une réutilisation multiple du matériau recyclé et	La microscopie électronique a confirmé la présence accrue de fissures et d'interfaces dans le GBR multi-recyclé, ce qui confirme la perte de propriétés mécaniques	[38]

	contribuant à une réduction des déchets de construction.	détectée dans les tests de coefficient de Los Angeles.	
Mécanique	Amélioration d'absorption GBR: +53.4%. Densité BGR: +14%. Résistance compression (Rc) BGR: +8%.	Nécessite un équipement spécifique et entraîne une augmentation de la consommation d'énergie ainsi que des émissions de CO ₂ .	[183]
	La couche résiduelle est éliminée par la collision des billes métalliques. La quantité éliminée semble être en relation avec le nombre des étapes de ce processus.	Pratique à grande échelle industrielle. Cette technique pourrait altérer les caractéristiques du GBR en induisant la formation de microfissures et en influençant l'action des forces de concassage sur sa durabilité.	[184]
Chimique (Attaque par Acide Fort)	L'absorption d'eau des granulats a diminué de 7 % à 12 %. L'utilisation des GBR traités entraîne une augmentation d'entre 25 % et 29 % de la résistance à la compression par rapport au béton avec les granulats non traités(GBR).	La présence accrue de sulfates et de chlorures dans les GBR peut compromettre leur durabilité, tout en favorisant la production de solutions acides polluantes.	[185]
Chimique différents acides	L'utilisation de HCl, HNO ₃ et H ₂ SO ₄ a augmenté l'absorption d'eau du RCA de 10 %, 11 % et 13 % respectivement, par rapport au RCA non traité. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Purushothaman et al. (2015).	Cette méthode s'avère coûteuse et expose à des risques, entraînant des conséquences néfastes sur la durabilité dans les mécanismes du GBR.	[36][186]
Chimique -Acide faible	La porosité a diminué de plus 2 %, tandis que l'absorption d'eau des GBR a également baissé de 9,5 %.	La production de solutions acides	[33]
Chimique /mécanique	Absorption GBR améliorée de 16%, densité du BGR recyclé augmentée de 0.44% à 1.95%, et résistance à la compression (Rc) du BGR recyclé améliorée de 4.5% à 13.8%	-Prend du temps -Nécessité d'éliminer les acides usés - Augmentation de la teneur en acide des matières recyclées.	[33] [71]

II. 2. 2. 1. 1. Traitement thermique

Comme l'indiquent plusieurs études concernant les méthodes et les conséquences de la technique de traitement thermique, celle-ci émerge comme une approche favorable pour éliminer le mortier adhérent faible, principalement en raison de sa simplicité opérationnelle et de son coût et efficacité.

Cette technique implique le chauffage des particules de (GBR) à différentes températures pendant environ 2 heures. Les contraintes thermiques résultant de l'expansion thermique différentielle entre les GN et le mortier adhérent facilitent le détachement du mortier faiblement attaché à la surface. Shima et al. (2005) [187], [188] ont observé que le chauffage des GBR au-dessus de 300°C affaiblit l'interface agrégat-mortier en raison de la déshydratation, facilitant ainsi l'élimination du mortier. Mulder et Feenstra (2007) ont chauffé des GBR issus de déchets de béton de construction et de démolition (B&D) à 700°C, ils ont remarqué une séparation significative de l'agrégat d'origine de la pâte de ciment adhérente. De même, Ma et al. (2009) [160] ont rapporté une séparation réussie des agrégats du mortier adhérent en chauffant le béton issu de déchets B&D à 750°C. Cependant, il faut tenir compte de l'effet des hautes températures lors de la sélection des températures de chauffage supérieures à 500°C, car elles peuvent dégrader les propriétés des GBR [33]. Il est recommandé de pré-tremper les GBR avant le chauffage pour améliorer l'efficacité de l'élimination du mortier, car cela augmente la pression de vapeur interne dans le mortier adhérent ou dans la zone d'interface mortier-agrégat [33][94]. De plus, immerger les GBR chauffés dans de l'eau froide après le traitement accélère l'élimination du mortier en induisant un refroidissement rapide du matériau en surface, favorisant ainsi la séparation du mortier [94].

II. 2. 2. 1. 2. Traitement chimique

Javier A. Forero (2022). [189] a résumé les différents traitements chimiques des GBR ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton produit. Il a souligné que la principale cause de médiocrité des (GBR) est la présence de la pâte adhérente au GN. Cette pâte affaiblit la (ITZ) entre le granulat et la pâte cimentaire, ce qui influe significativement sur les performances mécaniques du béton. Il a conclu qu'une amélioration significative des caractéristiques physiques et mécaniques des GBR est signalée lorsqu'ils sont traités avec des solutions acides à faible concentration, telles que l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide phosphorique (H₃PO₄). L'intégralité de la pâte adhérente aux GBR est éliminée lorsque les concentrations acides atteignent des niveaux plus élevés.

Les bétons contenant des GBR traités présentent les meilleures performances mécaniques en comparaison avec ceux contenant des GBR non traités.

Wang et al (2017). [71] ont adopté une approche respectueuse de l'environnement pour le traitement des GBR, en considérant l'impact sur l'environnement et de la rentabilité, Ils ont utilisé de l'acide acétique, réputé pour sa douceur par rapport à d'autres acides forts tels que HCl et H₂SO₄, en plus d'être moins dangereux lors de la manipulation et économique. De plus, contrairement à ces acides forts, l'acide acétique n'engendre aucun ion nuisible tel que le chlorure (Cl) dont la présence peut induire une détérioration de la structure du béton, notamment la corrosion des barres d'armature en béton. De manière intéressante, l'acide acétique peut être régénéré par lixiviation au calcium, en appliquant du CO₂ dans la solution.

Selon les résultats de Wang et al (2017). [71], le traitement des GBR avec différentes concentrations d'acide acétique (1 %, 3 % et 5 %) et des temps de réaction appropriés a entraîné une réduction de l'absorption d'eau du BGR, variant entre environ 9 % et 19 %.

II. 2. 2. 1. 3. Traitement mécanique et chimique

Dans l'étude de J. V. Marshall et al. [190], diverses techniques, y compris des traitements mécaniques et chimiques, sont employées pour améliorer les propriétés des (GBR). Six mélanges de béton différents sont préparés, incorporant des agrégats grossiers vierges et des GBR traités à l'aide d'un lavage mécanique (MS), d'acide sulfurique (H₂SO₄) et d'acide chlorhydrique (HCl). La résistance à la compression des bétons renfermant les agrégats traités présente une amélioration allant de 7,78% à 25,79% par rapport au BGR non traités. De même, la résistance à la traction du béton montre une amélioration allant de 5,22 % à 18,80 % par rapport aux granulats non traités. En outre, la résistance à la flexion des différents échantillons de béton contenant les GBR traités s'améliore de 4,91% à 25,24% à 28 jours par rapport au BGR non traités.

Les valeurs d'alcalinité du béton fabriqué avec tous les types de granulats grossiers se situent entre 11,9 et 12,24, ce qui indique des propriétés favorables. Dans les tests de séchage, les valeurs s'améliorent de 6,07 % à 28,88 % à 28 jours par rapport au béton de granulats grossiers non traités. En outre, dans les essais d'absorption d'eau, les granulats traités présentent des résultats améliorés de 4,84 % à 31,06 % par rapport au béton de granulats non traités.

L'étude révèle des résultats prometteurs pour divers GBR traités dans des applications de béton, le traitement par lavage mécanique (MS) donne des résultats particulièrement favorables par rapport à d'autres techniques. Toutefois, on note que les résultats ne dépassent pas ceux du béton conventionnel [190].

II. 2. 2. 1.4. Traitement thermomécanique (micro-ondes)

Le traitement par micro-ondes peut rapidement éliminer le mortier adhérent, améliorant ainsi la qualité de l'agrégat de BGR en moins de temps. Le chauffage par micro-ondes repose sur les différences dans les propriétés électromagnétiques du mortier adhérent et de l'agrégat, puisque les deux milieux présentent une sensibilité différente aux micro-ondes en raison de densités différentes. Des contraintes thermiques et des fissures se développent initialement dans la ITZ, puis s'étendent progressivement à la surface [191].

Le traitement assisté par micro-ondes de l'agrégat de BGR est directement proportionnel à la différence d'absorption d'énergie des micro-ondes entre le mortier et l'agrégat, ce qui entraîne le développement de contraintes thermiques plus élevées dans le mortier que dans l'agrégat. Le seuil recommandé d'énergie micro-onde est inférieur à 7,1 kWh/t [192] et l'efficacité du traitement par micro-ondes dépend de la taille et du type d'agrégat de BGR [193]. Ce traitement est plus efficace pour les gros agrégats de BGR, avec des taux d'élimination du mortier atteignant environ 71%, comparativement à un taux de 19% pour les agrégats fins du BGR.

D'autres études sur le traitement assisté par micro-ondes [192], [194], [195] ont montré une fragmentation complète du mortier, avec des taux d'élimination de 65,1% pour les gros agrégats de BGR (>20 mm) par rapport à 29,7% pour les agrégats fins de BGR (<2 mm). Les résultats expérimentaux indiquent que le BGR produit à partir d'agrégats de BGR traités par micro-ondes présente des améliorations significatives en termes de résistance à la compression, de résistance à la flexion et de module d'élasticité.

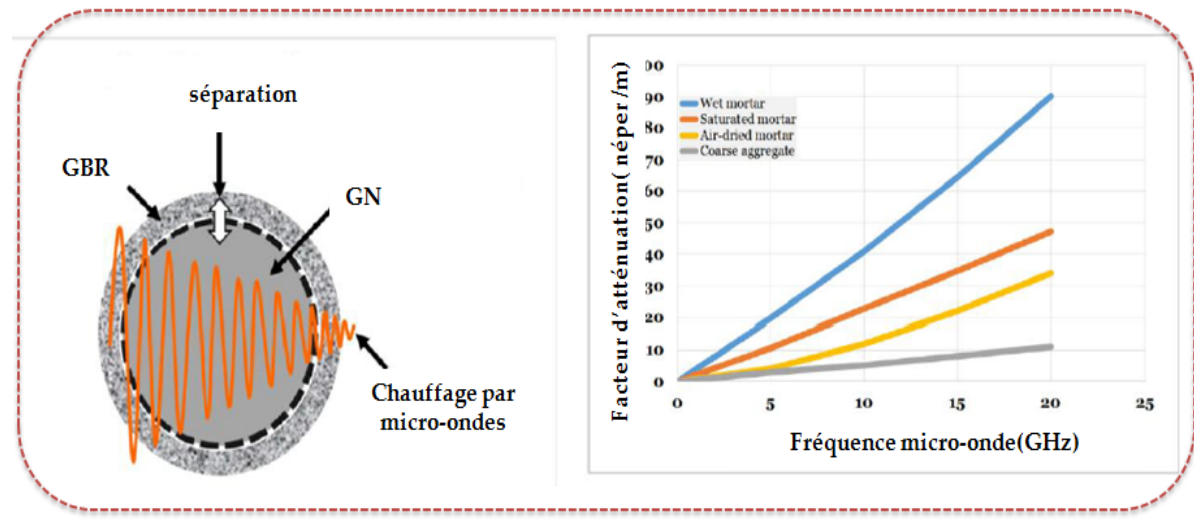


Figure. II. 2. À gauche : Schéma montrant le mécanisme d'affaiblissement de ITZ et la séparation du mortier de l'agrégat [196]. À droite : Facteurs d'atténuation des micro-ondes des agrégats grossiers et des mortiers humides et secs [182].

II. 2. 2. Le renforcement du mortier adhérent

II. 2. 2. 1. Carbonatation

La carbonatation, phénomène omniprésent, se profile comme l'une des réactions les plus courantes dans le béton, en raison de la présence de CO_2 dans l'environnement [197]. La carbonatation est intimement liée à la teneur en humidité présente dans l'environnement. Notamment, le coefficient de diffusion du CO_2 dans l'air dépasse celui dans l'eau jusqu'à 104 fois, ce qui entraîne un ralentissement du processus de diffusion lorsque les pores capillaires sont saturés d'eau, entravant ainsi la carbonatation [198]. Par conséquent, les conditions optimales pour des taux de carbonatation accrus sont observées dans des plages d'humidité relative de 40 % à 80 % [198][199].

II. 2. 2. 1. 1. Carbonate de calcium

Le (CaCO_3) est un composé présent dans les coquilles des animaux marins, le squelette des animaux vertébrés, le marbre, et les roches calcaires, entre autres. Sous forme de poudre, il est généralement inodore et incolore. Ce minéral peut être extrait par décomposition du calcaire, synthèse chimique ou synthèse. Son poids moléculaire est de $(100,087 \pm 0,006 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1})$, son (p-Ka) est de 9, et sa solubilité dans l'eau à 20°C est de 14 mg/L. Il existe trois formes cristallines du carbonate de calcium : la calcite (cubique), la vaterite (structure de transition vers la calcite) et l'aragonite (en forme d'aiguille) [200]. La figure. II. 3 il présente trois formes d'anhydride : le carbonate de calcium amorphe (ACC), la mono hydro-calcite ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) et l'ikaite ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

La technique de diffraction des rayons X (DRX) est souvent utilisée pour déterminer la morphologie du carbonate de calcium, bien qu'elle ne permette de détecter que les formes cristallines. Du point de vue thermodynamique, la calcite est plus stable que la vaterite [201]. Le point de fusion des formes cristallines est de 825 °C.

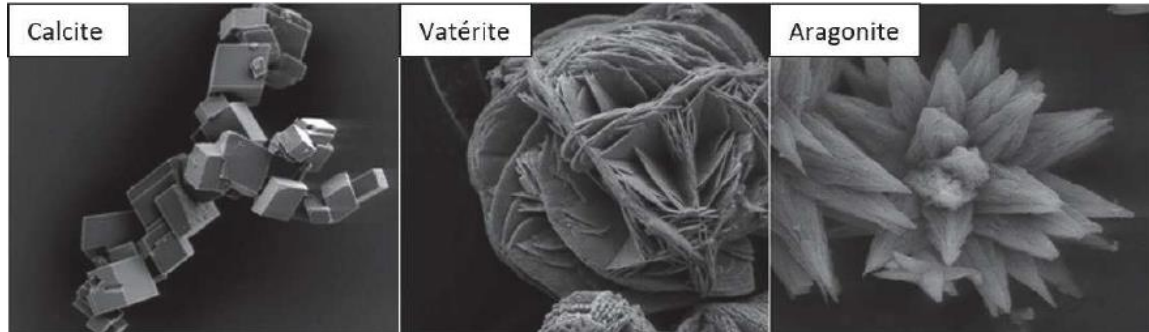


Figure. II. 3. Principales morphologies de CaCO_3 [201].

II. 2. 2. 1. 2. Carbonatation accélérée

L'objectif du traitement par carbonatation accélérée consiste à combler les pores grâce à la formation de carbonates de calcium CaCO_3 , ce qui permet la densification du réseau poreux des (GBR) et améliore leurs propriétés [202]. Ce traitement s'est avéré efficace pour améliorer diverses propriétés des GR, telles que l'absorption d'eau, la densité apparente, ainsi que la résistance à l'écrasement et les propriétés de la (ITZ) [202]. Les recherches menées par Zhan et al. [203] ont montré une diminution de la porosité comprise entre 19 et 21 %, selon les classes de résistance des bétons initiaux [203]. Bien que la carbonatation puisse être effectuée pour améliorer les propriétés microstructurales du béton, il existe de nombreux problèmes pratiques liés au durcissement au carbone par rapport au conditionnement au carbone, comme pour le durcissement au carbone, il n'est pas pratique de durcir de grandes dalles in situ ou de grandes poutres et même le CO_2 ne pénètre pas dans les zones plus profondes des grands blocs de béton car la couche externe sera carbonisée en premier et la carbonatation remplira les pores et deviendra plus dense, ce qui empêchera une pénétration supplémentaire du CO_2 dans les zones plus profondes du bloc de béton. Néanmoins, le conditionnement au carbone du GBR a surmonté cet inconvénient car le GBR a beaucoup plus de surface que l'ensemble des blocs de béton pour le durcissement au carbone, ce qui rend le rapport surface/volume plus élevé par rapport au durcissement au carbone alors que plus de volume est carbonaté dans le conditionnement au carbone. De plus, la carbonatation en général conduit à des niveaux de pH inférieurs du béton, ce qui rend l'environnement du béton acide avec la réaction de l'hydroxyde de calcium aux carbonates de calcium.

Ce qui peut corroder les armatures des éléments en béton, mais étant donné que le GBR traité est recouvert d'une couche de ciment lors de la préparation du béton, l'armature ne touche pas le GBR, ce qui évite le manque de pH bas du GBR traité. Bien que la méthode de conditionnement au carbone offre un rapport surface/volume plus élevé que le durcissement au carbone, les études qui ont été menées sur le durcissement au carbone ont également plusieurs lacunes, un nombre limité d'études de recherche ont été menées pour conclure s'il y a une amélioration des propriétés et si les deux méthodes sont combinées avec la carbonatation. En 2017-2018, Shi et al. [204] et Ahmad et al. [205], ont mis en lumière la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques du béton et des (GBR) tout en capturant le CO₂ atmosphérique, réduisant ainsi l'effet de serre. Ces recherches, basées sur un processus de carbonatation contrôlé, ont suggéré que de grandes concentrations de CO₂ pourraient être transformées en CaCO₃, grâce à ce qui est communément appelé "carbonatation accélérée". Le processus naturel de carbonatation est connu pour sa lenteur, principalement en raison de la faible concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui est habituellement d'environ 0,3% [206]. Cependant, des études récentes ont révélé que le stockage du CO₂ peut également être réalisé sur les GBR afin d'améliorer leurs performances [207]. Par exemple, Zhang et al. [208] ont comparé la présence de portlandite, la densité, la porosité, et l'absorption d'eau des GBR [208]. de taille inférieure à 5 mm confectionnés par les chercheurs à partir de ciment Portland (CEMI), et des GBR d'une source industrielle. Seuls les GBR fabriqués par les chercheurs ont été exposés à la carbonatation, dans un environnement saturé de CO₂ à 100%, à une température de 20°C et à une humidité relative de 75%, pendant une période de 2 semaines. Les résultats ont révélé une diminution de la quantité de portlandite dans les GBR soumis à la carbonatation, par rapport aux GBR non carbonatés et aux GBR industriels, démontrant ainsi la conversion de la portlandite en CaCO₃. De plus, la densité des GBR carbonatés a augmenté, du fait que le CaCO₃ est plus dense que la portlandite.

Les résultats de M. Sereng et al. [209], montrent que la carbonatation accélérée réduit le coefficient d'absorption d'eau jusqu'à 67% et diminue la porosité du GBR, comme indiqué par prosimètres à intrusion de mercure. Villagrán et al. (2023) [210], ont mis l'accent sur les facteurs influençant la diffusion du CO₂ et le taux de carbonatation, tels que le taux de remplacement, la qualité du béton source, les caractéristiques de la ITZ, la teneur en portlandite résiduelle et la porosité.

La carbonatation du BGR dépend de diverses variables, dont la porosité du mortier adhérent et de l'agrégat naturel, ainsi que des aspects physiques et physico-chimiques influençant le GBR.

Le mortier adhérent joue un rôle crucial dans la carbonatation, influençant la porosité et la diffusion du CO_2 . Il impacte également la réserve alcaline, jouant ainsi un rôle central dans la minéralisation du CO_2 . La qualité du mortier adhérent affecte la formation des (ITZ) dans le nouveau béton. La méthode de renforcement par carbonatation des GBR repose sur une réaction chimique et une action cimentaire entre les carbonates et le mortier-colle. Dans ce processus, les GBR sont typiquement exposés au dioxyde de carbone (CO_2), qui réagit avec les carbonates présents soit sous forme gazeuse, soit en solution, formant ainsi une couche de carbonate à la surface des GBR [211]. Les caractéristiques du matériau d'origine des GBR, telles que la taille des particules, la porosité, la teneur en humidité, ainsi que la méthode et les conditions de carbonatation, « concentration en CO_2 , la pression du gaz, le temps de réaction de carbonatation, l'humidité relative et la température » influencent le processus de carbonatation. Le mécanisme de carbonatation des GBR peut être décrit par le processus de diffusion-dissolution, comme illustré dans la figure. II. 4 [212].

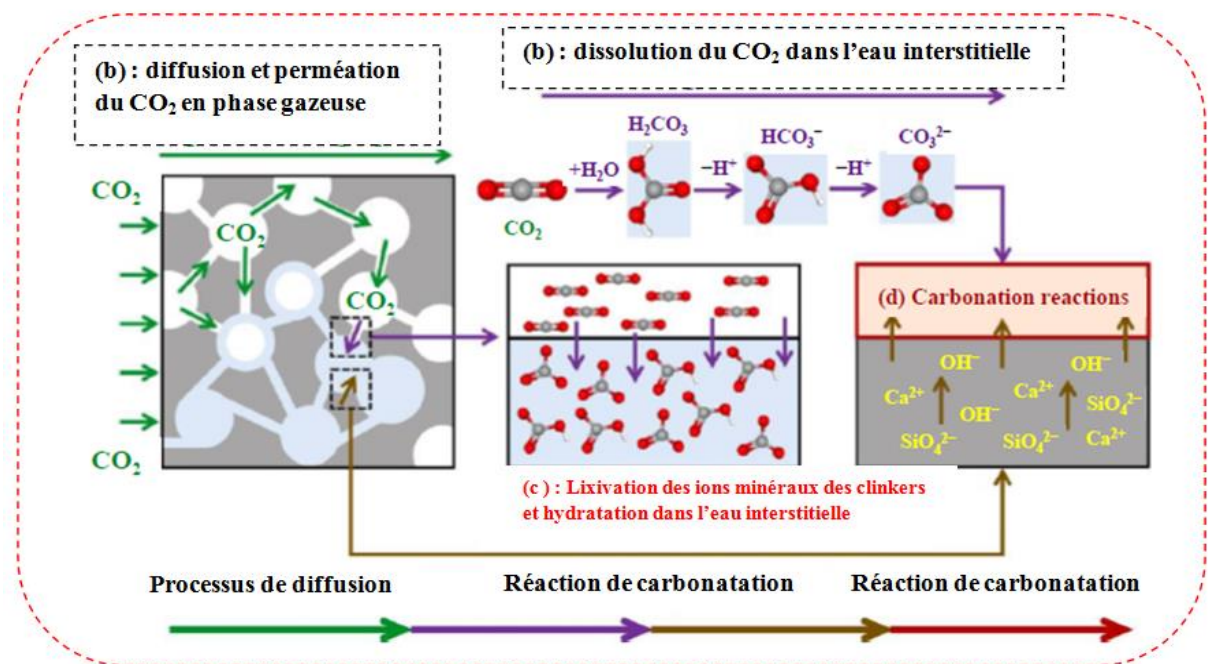


Figure. II. 4. Illustration des processus physiques et chimiques de carbonatation du BGR [212].

II. 2. 2. 2. Méthode d'auto-guérison, autogène et autonome (micro -encapsulation)

Améliorer les propriétés du béton par auto-guérison est un concept prometteur. Le béton auto-guérisseur est divisé en auto-guérison autogène et autonome [213][214]. En induisant la réhydratation des particules de ciment non hydratées, l'auto-guérison autogène peut être réalisée par la précipitation de CaCO_3 suivant la réaction des ions calcium (Ca^{+2}) et des ions carbonate CO_3^{-2} dans l'eau [215][216]. Quant aux méthodes d'auto-guérison autonomes, des études ont été menées sur deux méthodes différentes, la méthode bactérienne et la méthode à microcapsules [217].

Dans la méthode bactérienne, différents types de bactéries sont utilisés pour remplir les pores et les fissures. Ce processus repose sur la biodéposition de carbonate de calcium facilitée par des bactéries telles que 'Sporosarcinapasteurii', où les bactéries pasteurii qui attirent les ions calcium (Ca^{+2}) et produisent de la calcite (CaCO_3) à partir du milieu liquide de culture dérivé de l'urée [218]. D'autres bactéries utilisées pour l'auto-guérison comprennent 'Bacillus subtilis', 'Bacillus sphaericus' et 'Bacillus pasteurii', qui produisent du lactate de calcium ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6$) [219]. Des études ont montré que l'auto-guérison du béton avec des bactéries entraîne des améliorations du module d'élasticité, de la résistance à la traction et de la résistance à la compression [220]–[223]. Le processus de bio-déposition en utilisant des bactéries est illustré dans la figure. II. 5. Dans la méthode à microcapsules, des microcapsules sont mélangées au béton en tant qu'adjuvant. Lorsqu'une fissure se produit, les microcapsules se rompent le long du chemin de la fissure, libérant l'agent de guérison [224]. Cette méthode a démontré sa capacité à guérir rapidement des fissures plus larges [225]. Cependant, l'auto-guérison autogène, avec sa dépendance à l'induction de réhydratation, est limitée à la guérison des fissures étroites [226][227].

Les méthodes d'auto-guérison autonomes présentent également des défis. Le temps de guérison des méthodes bactériennes est généralement plus long et nécessite un environnement humide [228], et les bactéries ne peuvent survivre que pour de courtes périodes dans des environnements alcalins élevés [229]. En conclusion, les méthodes d'auto-guérison autogène et autonome offrent toutes deux des approches prometteuses pour améliorer la durabilité du béton. Tam et al. Nous présentent un schéma illustrant le mécanisme de bio-dépôt à l'aide de bactéries, comme le montre la figure. II. 5

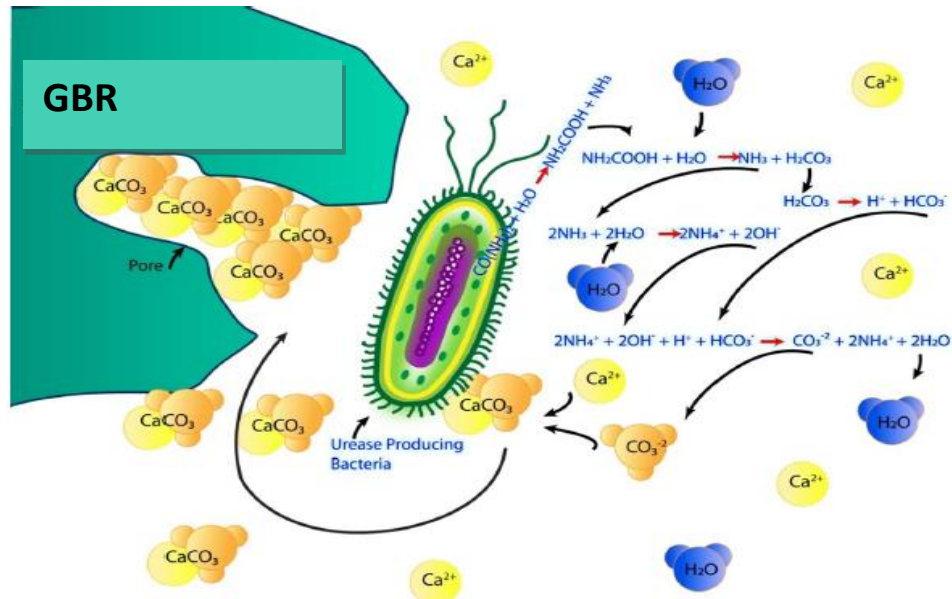


Figure. II. 5. Bio-dépôt de calcite (CaCO₃) pour combler les pores du béton [42].

II. 2. 2. 3. Méthode de bio-précipitation (précipitation microbienne de carbonate)

L'étude expérimentale menée par García González et al (2017). [230], a démontré que la précipitation bactérienne agit comme un traitement superficiel des GBR, recouvrant la partie externe de l'agrégat et comblant certains pores superficiels. Le traitement avec une culture de (bactérie sphaericus (procédés de bio-minéralisation) contenant environ 10⁸ cellules/ml fournit une méthode facile pour contrôler la précipitation de carbonate de calcium sur les agrégats recyclés mixtes dans des conditions appropriées de distribution et de quantité. Cette technique biologique a augmenté le poids des GBR, particulièrement lorsque la taille des particules est plus petite. En plus Le dépôt de carbonate de calcium a créé un effet d'imperméabilisation limité, permettant de réduire l'absorption d'eau des GBR. Cela améliorera la maniabilité du béton sans nécessiter l'augmentation de la teneur en eau, et sera bénéfique à la fois pour la perméabilité du béton et la réduction de la pénétration de substances agressives qui peuvent accélérer sa dégradation dans ses futures applications. Ces cristaux d'imperméabilisation ont un effet plus important lorsque la teneur en matériaux à base de ciment dans l'échantillon des GBR est plus élevée.

García González et al (2017). [230], ont utilisé l'analyse SEM-EDX dans la figure. II. 6, 7 et 8) pour examiner la précipitation de carbonate de calcium induite par *B. sphaericus* sur les (GBR). Leurs résultats ont révélé une apparence distinctive caractérisée par des formes sphériques, avec des empreintes de cellules bactériennes impliquées dans le processus de précipitation du carbonate. Notamment, la prévalence de ces empreintes qui variait en fonction de l'activité bactérienne observée.

Cette étude, ainsi que d'autres, indique que le traitement par précipitation microbienne de carbonate est efficace pour améliorer les caractéristiques des granulats et du béton en termes d'absorption, de densité et de porosité. Cette amélioration est significative et similaire à celle observée dans différentes (ITZ). Cette technique est considérée comme une méthode utile selon la littérature précédente notamment les travaux de Fall et al. [231] et Yuxi Zhao et al. [232].

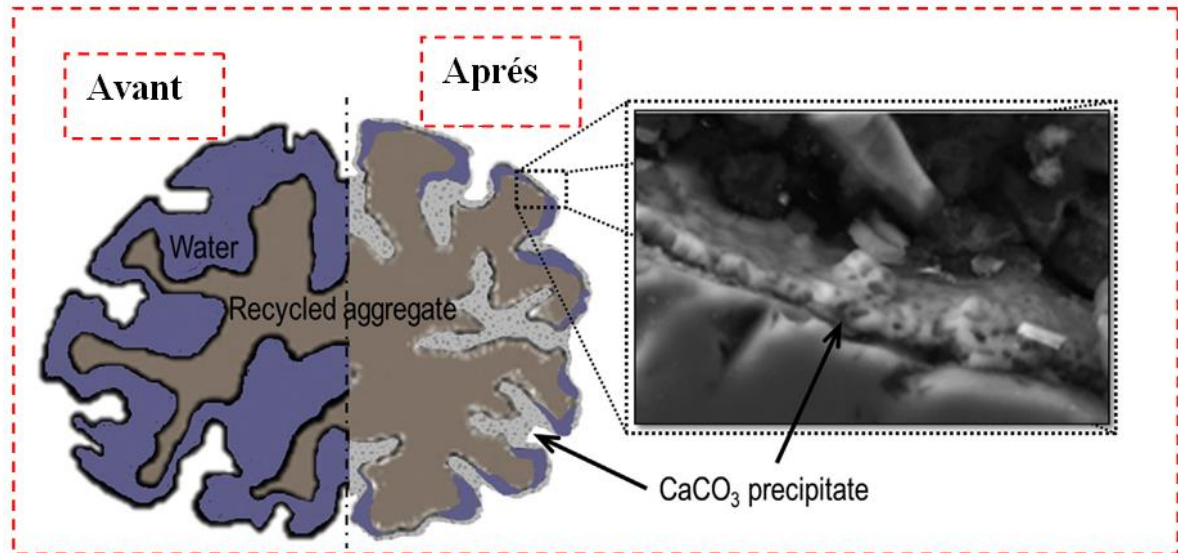


Figure. II. 6. Amélioration de la qualité des granulats mixtes recyclés par la méthode de bio-dépôt de carbonate de calcium [230].

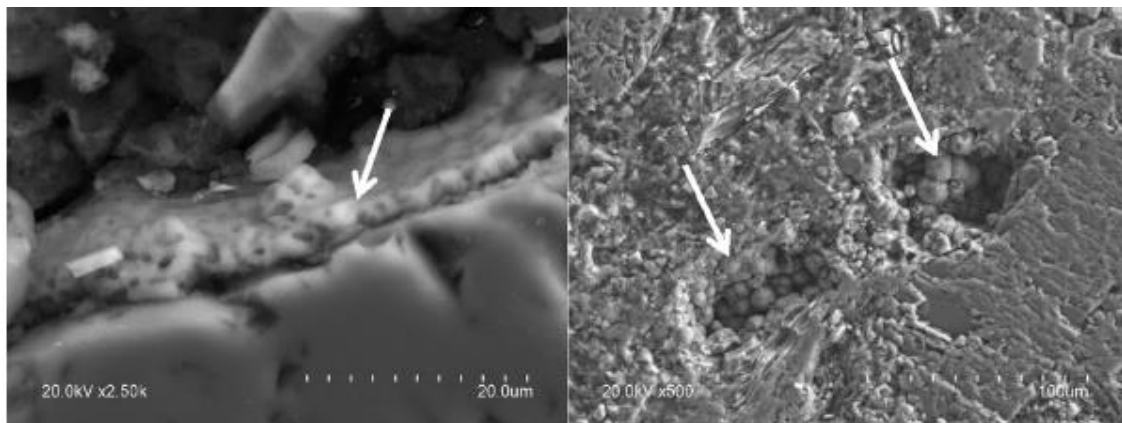


Figure. II. 7. Précipité de CaCO_3 sur la surface de l'agrégat (gauche). Précipité de CaCO_3 dans les pores de l'agrégat (à droite) [230].

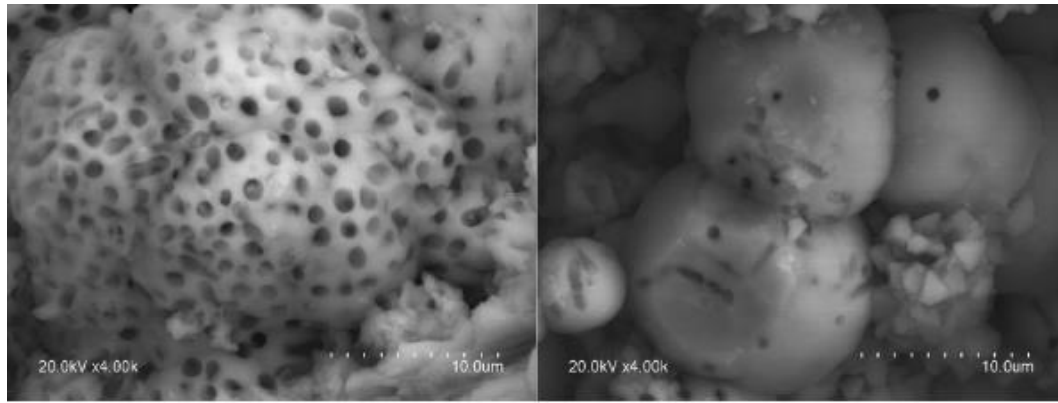


Figure. II. 8. Précipité de CaCO_3 avec une activité bactérienne élevée (gauche). Précipité de CaCO_3 avec faible activité bactérienne (droite) [230].

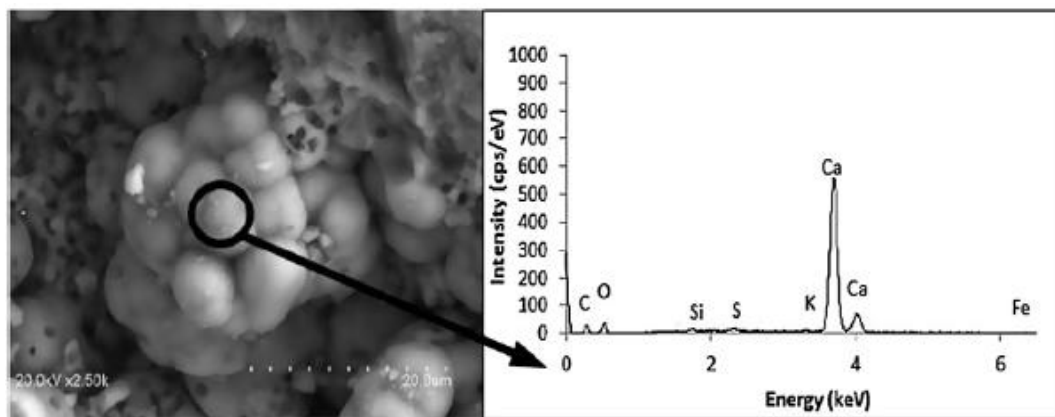


Figure. II. 9. Image MEB, spectres EDX et composition des éléments du précipité de CaCO_3 sur le GR bio traité.[230] .

L'utilisation de la bio-précipitation sur les GBR vise à diminuer leur perméabilité et l'absorption à l'eau. Cela implique spécifiquement de diminuer la porosité du mortier résiduel, c'est-à-dire celui qui adhère aux GN, en favorisant la précipitation du CaCO_3 dans les pores et les microfissures (figure. II. 10).

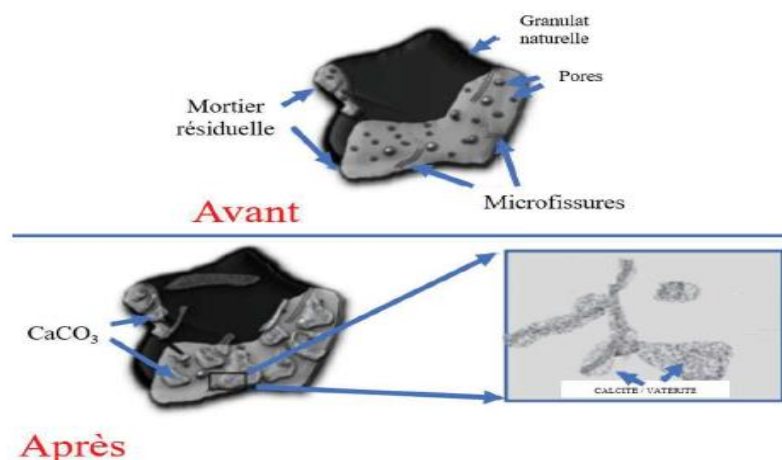


Figure. II. 10. Précipitation de CaCO_3 dans les pores et les microfissures de gravillons recyclés, avant et après d'être traités par bio-précipitation [233].

Su et al (2023) et Zeng et al (2019) [234], [235] souligne que la précipitation de carbonate de calcium induite par les spores de *Bacillus* provenant de bactéries «COCCI» renforce de manière bénéfique les granulats grossiers recyclés. Cette action se traduit par une réduction significative de l'indice de concassage et de l'absorption d'eau, ainsi que par une augmentation de la densité apparente. L'effet de renforcement optimal est observé après 10 jours. Il est essentiel de noter que la précipitation de carbonate induite par les microorganismes pour améliorer les GBR nécessite un contrôle précis des conditions de croissance des microorganismes, des concentrations en urée et en sources de calcium, ainsi que de la durée du traitement pour assurer un dépôt de carbonate adéquat et des effets de renforcement appropriés.

De manière similaire, su et al (2023).[234], ont découvert que l'utilisation d'une culture mixte de microorganismes pour renforcer les GBR produit des résultats d'amélioration positifs. Après 28 jours de réparation, la largeur moyenne des fissures dans le béton et le taux de réparation complet atteignent respectivement 0,28 millimètres et plus de 60%. Cela représente des améliorations de plus de 47,4% et 50% respectivement par rapport au béton ordinaire non traité par minéralisation induite par les microorganismes pour la réparation des fissures. De plus, le coefficient de perméabilité à l'eau du béton réparé diminue de plus de 99,7%, démontrant une performance améliorée en termes d'étanchéité.

II. 2. 2. 4. Méthode de géo polymérisation

Zhao et al. [66] ont préenduit des GBR dans une suspension de silicate de sodium uniformément agitée et les ont trempés pendant cinq à dix minutes. L'augmentation de la résistance à la compression du BGR final avec des GBR traités était de 32,4 % par rapport au béton non traité. Cependant, le traitement au silicate de sodium présente ses propres limites. Étant donné que le gel de réaction alcali-silice est formé par la réaction d'un alcali avec des phases réactives de silice, l'incorporation d'alcali (par exemple NaOH) peut augmenter le risque de dommages causés par réactivité alcali-silice l'(RAS) [34].

Dans une étude expérimentale de X. Gao et al. [236], explore l'utilisation des déchets de verre de tubes cathodiques (VTC) comme agrégats dans les bétons de ciment Portland (CP), une méthode de recyclage durable. Cependant, la réaction alcali-silice (RA-S) limite leur recyclable. Le test ASTM C1260 a comparé les performances des mortiers géo-polymères à base de PC et de cendres volantes avec des granulats fins de verre (GFV).

Les résultats montrent une forte expansion des mortiers de CP due à la RA-S, entraînant une perte notable de résistance à la compression (de 45,1 MPa à 20,6 MPa sur 28 jours).

En revanche, les mortiers géo-polymères se sont avérés moins sensibles, avec un léger retrait de 0,057 % après 14 jours de durcissement. Cette résistance accrue est due à la matrice géo-polymère à faible teneur en calcium, favorisant un gel stable sans expansion destructive. L'étude de Gao et al. [236] Yao met en avant les avantages significatifs des mortiers géo-polymères par rapport aux mortiers de CP traditionnels lors de l'utilisation de granulats fins de verre, notamment en termes de durabilité face à la RA-S, de rétention des contaminants et de protection contre les radiations

L'étude menée par Thomas et al (2018). [38] explore l'utilisation des GBR comme substituts partiels ou complets des granulats conventionnels dans le béton géopolymère. Leur recherche met en évidence l'impact de l'ajout de granulats recyclés sur les propriétés fraîches et durcies de ce matériau innovant. [38] dans cet article confirme une amélioration significative de la maniabilité du béton géopolymère avec l'incorporation de granulats recyclés. Cependant, il est crucial de noter que le BGR Géopolymères (BGRG), qu'il soit pur ou en mélange, présente une résistance plus faible à l'attaque acide. Cette diminution de la résistance est attribuée aux réactions entre les acides et les composés de calcium présents dans le mortier de ciment entourant les GBR. En outre Les analyses de microstructure réalisées par Thomas et al (2018). [38] révèlent également des caractéristiques de (ITZ) supérieures dans le béton géopolymère par rapport aux bétons conventionnels. De plus, le béton géopolymère montre une excellente résistance à l'acide sulfurique, soulignant ses propriétés durables dans des environnements corrosifs. En plus [38], observent que, bien que l'ajout de GBR améliore la maniabilité du béton géopolymère, il est crucial de prendre en compte sa résistance réduite à l'attaque acide par rapport aux bétons conventionnels.

II. 3. TECHNIQUE DE REVÊTEMENT CIMENTAIRE (Méthode d'encapsulation)

Le revêtement cimentaire des GBR est discuté dans cette partie sous deux aspects :

- Le revêtement des GBR par le ciment et les additions pouzzolaniques qu'il contient pendant le malaxage.
- Le revêtement antérieur des GBR par pulvérisation ou par imprégnation.

La pouzzolane désigne un groupe de cendres volcaniques utilisées dans le mortier ou le ciment. Selon S.-Y. Chung et al. (2017). [237], le terme "pouzzolane" a été étendu pour englober tous les matériaux siliceux/alumineux sous forme finement divisée. La pouzzolane peut subir une réaction pouzzolanique dans les composites à base de ciment, principalement avec Ca(OH)_2 . Le produit final de cette réaction est le gel de (C-S-H), qui est principalement responsable de la résistance du béton.

La fumée de silice (FS), les cendres volantes, et le nano-SiO₂ (NS) sont les trois principaux types de pouzzolanes couramment étudiés pour la modification des (GBR) dans la littérature.

II. 3. 1. Revêtement cimentaire pendant le malaxage

T. C. Cardoza, et al (2016). [238] a conduit les premières études dans ce domaine; dans son étude, une quantité supplémentaire de 163 kg de ciment (OPC) par M³ de béton a été utilisée pour l'encapsulation des GBR pendant le malaxage, portant la consommation totale de ciment pour un m³ de béton est environ 667 kg. En raison de la quantité élevée de ciment, des tentatives ont été faites pour substituer partiellement le ciment par des cendres volantes (à des taux de substitution de 30 % et 50 %). Les résultats ont montré des valeurs d'absorption d'eau légèrement plus élevées lorsque le ciment était remplacé par des cendres volantes. Les résistances à la compression ont été comparées lorsque l'encapsulation était réalisée avec un rapport de 70/30 OPC/cendres volantes et 100% OPC. Il a été observé que (R_c) a diminué jusqu'à 26 % lorsque des cendres volantes étaient utilisées dans l'encapsulation. La substitution du ciment pour l'encapsulation ne s'étant pas avérée positive, les études ultérieures se sont concentrées sur l'amélioration de l'encapsulation en termes de réduction de la quantité supplémentaire de ciment, sans influencer les effets positifs du traitement [238].

E. Güneysisiet et al. [181], ont incorporé 20% de la fumée de silice dans le mélange de béton incorporant les GBR. Les résultats de l'étude à 28 et 90 jours de durcissement indiquent une amélioration significative de la résistance à la compression ; à 28 jours, la résistance à la compression atteint 60 MPa, tandis qu'à 90 jours, elle atteint 67 MPa, représentant des améliorations respectives de 13 % et 10 % par rapport au béton sans addition. Cette amélioration est attribuée à la formation d'une couche de coulis de ciment sur la surface du GBR, contribuant à combler les fissures et les vides. De plus, elle renforce les (ITZ) lors du pré-mélange, ce qui, selon des études antérieures Tam et al (2005). [20] sur le béton ordinaire, conduit à une meilleure résistance à la compression. Les caractéristiques d'amélioration, telles que la microstructure plus dense et plus connectée, sont observées grâce à l'approche de mélange en deux étapes par rapport au mélange témoin correspondant).

Des résultats similaires ont été rapportés par V. Baroghel-Bouny et al (2008). [239] qui ont constaté que L'augmentation de la résistance à la compression à 28 jours du béton à base des (GBR) est d'environ 9 % pour les cylindres et de 12 % pour les cubes lors de l'ajout de 8 % de fumée de silice (FS) de la masse de ciment. De plus, la résistance moyenne à la traction par fendage a augmenté d'environ 12 % à 28 jours avec la même quantité de FS.

Shi et al. (2018). [43], ont observé que l'amélioration de la résistance à la compression des (BGR) est attribuée à l'ajout de FS, de cendres volantes (CV), et de pouzzolane naturelle (PN). Les ratios de l'addition par rapport au ciment étaient de 0,63 pour la FS, 0,76 pour les CV, et 0,13 pour la PN. Les augmentations de la résistance à la compression à 28 jours du (BGR) modifié avec FS, CV et PN étaient respectivement de 55,2 %, 39,4 % et 17,6 % plus élevées par rapport au (BGR) sans addition.

Dans l'étude de Tam et al (2005). [20] et Tam et al (2008). [240], deux approches de mélange ont été examinées pour améliorer les propriétés des (GBR) avec l'addition de la fumée de silice. Ces approches, désignées sous les noms de méthode de mélange en deux étapes (TSMA) et méthode de mélange en deux étapes modifiée (TSMA modifiée), qui impliquent l'incorporation de fumée de silice et de ciment à différentes étapes dans le processus de mélange. Les résultats des expériences ont démontré des améliorations significatives de la résistance du béton obtenues grâce à ces approches. L'addition de fumée de silice et de ciment renforce les (ITZ) des GBR, conduisant ainsi à une couche interfaciale plus robuste et à une meilleure résistance globale du béton.

Les différents procédés de mélange modifié comprennent :

a) La méthode du double mélange, Le mélange en deux étapes et La méthode du triple mélange. L'utilisation de la méthode du double mélange a permis d'augmenter la résistance à la compression et d'améliorer de manière significative les propriétés à long terme telles que la pénétration des chlorures et la profondeur de carbonatation par rapport au béton produit par la méthode de mélange normale [132].

Cette méthode (TSMA), consiste à diviser le processus de mélange en deux étapes, l'ajout d'eau dans le mélange de béton se produisant à des moments différents. Au départ, la moitié de l'eau calculée est ajoutée aux granulats, suivie par l'ajout des liants pour faciliter la densification de la (ITZ), le reste de l'eau étant ajouté à des intervalles ultérieurs [240]. Cette méthode a permis d'augmenter la résistance à la compression du GBR jusqu'à 21 %, grâce au développement d'une (ITZ), efficace et solide par le remplissage des vides et des fissures à la surface du (GBR) [240]. La TSMA a également démontré son efficacité dans l'amélioration de la durabilité, potentiellement en raison des améliorations de l'interface de surface des granulats. D'autres modifications de la TSMA, appelées TSMA modifiées, ont été proposées par Tam et al (2005). [20] et Tam et al (2008) [240].

L'approche du mélange triple, implique un revêtement de surface des GBR) et l'ITZ par les matériaux pouzzolaniques pour améliorer davantage la surface, (Il a été rapporté que cette

approche influence de manière significative diverses propriétés techniques du béton frais et durci par rapport à la méthode du double mélange [180].

La figure. II. 11 présente les différentes approches de mélange développées dans le but d'améliorer les propriétés des GBR grâce au revêtement de surface. L'image explique clairement comment les différentes méthodes de mélange contribuent à développer une microstructure plus homogène et densifiée.

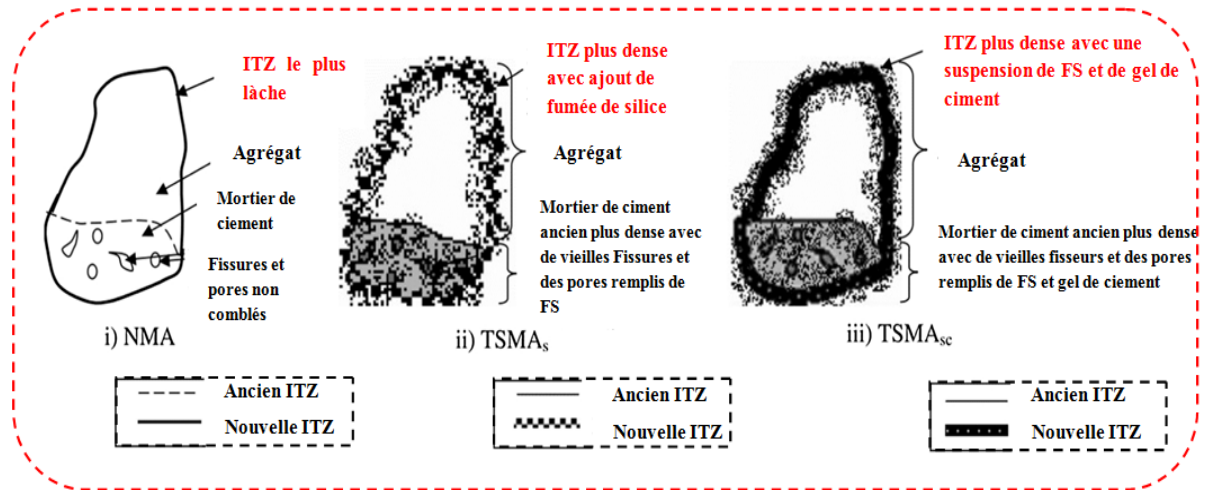


Figure. II. 11. Structure du GBR après l'adoption de différentes approches de mélange (i) NMA, (ii) TSMA_s and (iii) TSMA_{sc} [240].

II. 3. 2. Revêtement antérieur des GBR (pré-encapsulation)

La méthode d'encapsulation a été adoptée par une équipe de recherche composée de scientifiques de l'Université Centrale de las Villas (Cuba), de l'Université des sciences appliquées de Karlsruhe (HsKA) et de l'Université de Kassel (Royaume-Uni) pour améliorer la qualité des gros (GBR). Le processus consiste à encapsuler la fraction 5 -10 mm des GBR par une fine couche de pâte de ciment. Cette fraction particulière est choisie pour deux raisons principales. Premièrement, elle présente un taux d'absorption d'eau plus élevé que les autres fractions grossières, probablement en raison de la présence d'une plus grande quantité de mortier attaché dans la fraction intermédiaire. Cette observation est cohérente avec les résultats de T. T. Kien, L et al. [143], qui ont constaté que la fraction 4-8 mm contient 60 % de mortier ancien, tandis que la fraction 8-16 mm en contient 40 %. Deuxièmement, le traitement de la fraction de 10-5 mm de GBR est avantageux en raison de sa surface spécifique plus élevée que celle de la fraction de 9-19 mm, 16-25 mm, ce qui permet un traitement plus efficace et la couverture d'une plus grande surface. Alors qu'Allal et al. [241] et al. indiquent dans leur article que l'encapsulation de la fraction 16/25 puis son incorporation dans le mélange entraîne une

augmentation de la résistance mécanique à court et à long terme, avec des résultats significatifs à long terme en termes de durabilité.

II. 3. 2. 1. Technique de revêtement cimentaire des GBR (méthode d'encapsulation)

L. Li, D. Xuan et al [97], a fait son expérience Pour évaluer l'effet du dosage de la nano-silice (NS) en suspension sur les GBR, la NS a été appliquée à la surface des GBR. Les GBR traités sont ensuite stockés à l'extérieur à une température d'environ 20°C et à une humidité relative d'environ 75% pendant un mois. Pour assurer une distribution uniforme de la suspension NS, des lots de GBR, pesant chacun 5 kg, ont été soumis à une rotation continue dans un malaxeur incliné mesurant $\Phi 500\text{mm} \times 170\text{ mm}$, comme le montre la figure. II. 12



Figure. II. 12. Mélangeur incliné avec pulvérisateur de liquide portatif [97].

II. 3. 2. 2. Performance physique de la méthode d'encapsulation de GBR en fonction de différentes immersions E/C

Dans une autre recherche, Zhao et al (2013) [66] ont mené des essais expérimentaux sur la durabilité des bétons incorporant des GBR traités par encapsulation. Le traitement de la surface du GBR est réalisé en utilisant plusieurs types de pâte, et un processus d'imprégnation a été réalisé dans un environnement de laboratoire contrôlé. Les résultats des tests montrent que les performances physiques de l'agrégat recyclé pré-revêtu étaient dans la plage des exigences spécifiées, et que l'agrégat recyclé revêtu en surface avec une épaisseur de pâte de 0,035 mm présentait une performance physique supérieure. De plus, la résistance à la compression du béton a augmenté avec l'augmentation du rapport eau-ciment de la pâte de revêtement. Après 56 jours de durcissement, la résistance à la compression a augmenté jusqu'à 10 % par rapport au BGR correspondant. Les résultats des tests de résistance à l'attaque par les sulfates montrent que la perte de résistance du mortier a été significativement réduite après la modification de

l'agrégat fin recyclé. La figure. II. 13 indique que l'absorption d'eau et la valeur de l'indice d'écrasement du GBR pré-enrobé diminuent avec une augmentation du rapport E/C, puis augmentent, tandis que la densité apparente augmente d'abord et diminue ensuite. Plus précisément, le GBR revêtu en surface par un ciment Portland avec un rapport E/C de 0,8 (la valeur extrême) a donné des performances physiques plus élevées, avec une épaisseur de pâte correspondante de 0,035 mm, ce qui suggère qu'une pâte d'enrobage excessive ou insuffisante réduit la résistance à l'écrasement des agrégats [66]. Ce phénomène peut être attribué à l'effet de charge de la pâte et à son effet réactif pouzzolanique, qui améliorent les performances physiques des GBR pré-enrobés. Toutefois, une pâte de revêtement trop épaisse ou trop fine nuit à l'amélioration des performances physiques des GBR pré-enrobés: une pâte de revêtement excessive augmente l'absorption d'eau des GBR pré-enrobés, une pâte de revêtement excessivement fine ne peut pas contrer efficacement les effets néfastes du vieux mortier adhérent.

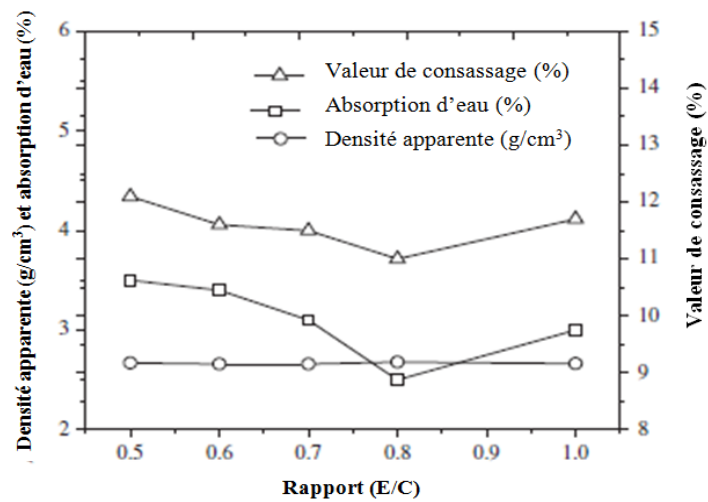


Figure. II. 13. Corrélation entre les performances physiques du GBR pré-encapsulé et le rapport E/C de la pâte de revêtement [66].

Le tableau II.2, présenté par Zhao et al (2013). Montre que les performances physiques du BGR pré-encapsulé sont conformes aux exigences spécifiées et aux normes en vigueur.

Tableau. II. 2. Performance physique du GBR pré- encapsulé [67].

performance Physique	GN	(GBR)					
		Contrôle	E/C=0,5	E/C=0,5	E/C=0,7	E/C=0,8	E/C=1
Absorption d'eau (%)	0,7	4,1	3,5	3,4	3,1	2,5	3,0
Densité apparent (kg/m³)	2730	2650	2670	2660	2660	2680	2650
Valeur de fragmentation (%)	10,1	14,2	12,1	11,6	11,5	11,0	11,7

GN: gros granulat naturel- Contrôle: GBR non encapsulé : E/C : 0,5: pré-encapsulé de ciment Portland avec un rapport E/C de 0,5.

II. 3. 2. 3. L'effet de l'incorporation du (GBR encapsulé) sur la résistance mécanique

Li et al (2021). [97] a utilisé trois méthodes de traitement des GBR à la nano-silice (NS): pré-pulvérisation plus séchage à l'air, pré-pulvérisation sans séchage à l'air, et pré-trempeage plus séchage à l'air. La résistance à la compression, le taux d'absorption d'eau et la résistance à la pénétration des chlorures dans le BGR sont améliorés avec tous les traitements NS, mais le module d'élasticité n'a pas été affecté.

Une méthode de pulvérisation des (GBR) est proposée par li et al (2021). [97] démontrant une efficacité notable. Les résultats expérimentaux de résistance à la compression pour 8 groupes de béton à 28 jours sont présentés. Le (BGN) a manifesté une résistance à la compression supérieure de 14,8% par rapport au (BGR-1) préparé avec GBR. Le traitement des (BGR-2), (BGR-3) et (BGR-4) a impliqué la pré-pulvérisation suivie de séchage à l'air en utilisant des suspensions de nano-silice (NS) avec des ratios (N/A) de 1%, 3% et 5%, ce qui a entraîné des augmentations de résistance à la compression d'environ 9,5%, 11,2% et 6,1% respectivement. Cette tendance suggère une amélioration initiale de la résistance à la compression suivie de rendements décroissants avec l'augmentation du dosage de la suspension de NS. Le traitement du (BGR-5) avec la pré-pulvérisation de NS-2 à un ratio N/A de 3% a conduit à une augmentation de 13,9% de la résistance à la compression par rapport au (BGR-1), surpassant ainsi l'amélioration observée avec le (BGR-3). Ces observations suggèrent que l'utilisation de particules de NS plus grandes pour la pré-pulvérisation pourrait générer des améliorations plus significatives, probablement en raison d'une meilleure pénétration dans les GBR, où la majorité des pores ont une taille inférieure à 100 nm. En contraste, les particules de NS-1 plus petites pourraient pénétrer plus profondément dans les pores des GBR, tandis que les particules de NS-2 plus grandes ont tendance à se localiser davantage en surface, améliorant ainsi la (ITZ).L. Li, D. et al (2021).[97] Montre une analyse comparative des différentes méthodes de traitement de NS dans cette étude expérimentale, révélant que la pré-pulvérisation sans séchage à l'air a engendré la plus grande amélioration de la résistance à la compression, suivie de la pré-pulvérisation avec séchage à l'air, tandis que le pré-trempeage avec séchage à l'air a produit la plus faible amélioration.

Les résultats expérimentaux présentés par Zhao et al (2013). [66] concernant Les résistances à la compression et à la flexion du mortier préparé avec un GBR pré-revêtu sont présentées dans la figure. II. 14. Elle montre que la résistance à la compression du mortier durci pendant 28 jours a augmenté de 34,8 % lorsque le GBR a été traité avec du ciment de sulfo-aluminate et

des cendres volantes, et de 32,4 % lorsqu'il a été traité par imprégnation dans le silicate de sodium. Cette augmentation est liée à la pâte de ciment et des cendres volantes qui ont exercé leur effet de dilution, leur effet de nucléation et leur effet de réaction d'hydratation secondaire pour améliorer les performances mécaniques du mortier. De plus, le gel d'acide silicique dérivé du durcissement et de la cristallisation du silicate de sodium a pu remplir directement les pores afin d'améliorer la structure des pores, et ainsi renforcer les performances mécaniques du mortier.

Les abréviations utilisées sont : RFA-1.2S-FA : mortier pré-enrobé avec du ciment sulfoaluminate contenant des cendres volantes, avec un rapport E/C de 1,2 ; RFA: agrégat fin recyclé, SC : silicate de sodium, O : silicium organique pur, P : ciment Portland, S : ciment au sulfoaluminate, SF : fumée de silice.

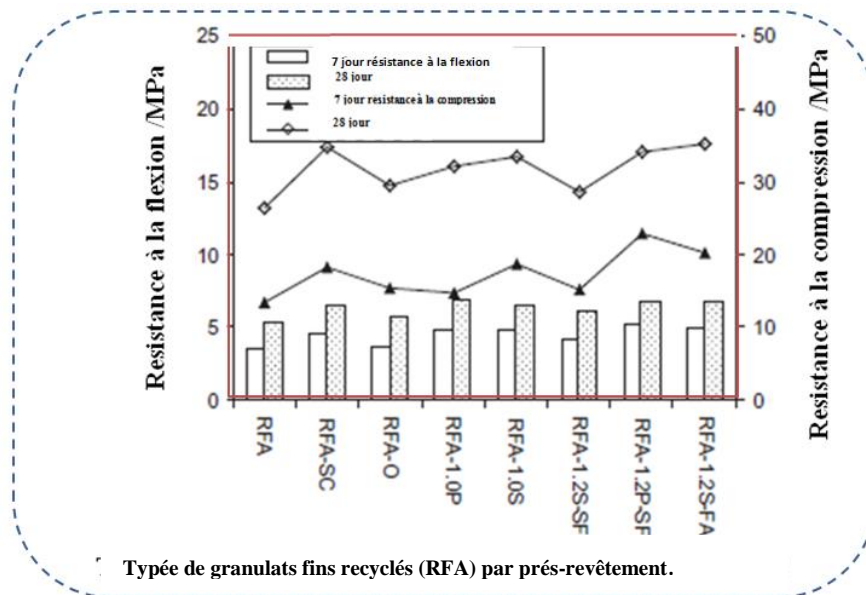


Figure. II. 14. Résistance à la compression et à la flexion du différence mélange [66].

II. 3. 2. 4. L'effet de la pré-encapsulation : analyse microstructurale

Sur la base des microstructures (MEB) des BGR et des résultats de micro-dureté, le mécanisme d'amélioration de la méthode de pré-pulvérisation et de séchage à l'air NS est discuté ci-dessous. Les microstructures des BGR avant et après l'utilisation de la méthode de pré-pulvérisation de NS et de séchage à l'air sont illustrées à la figure. II. 15 Après la pulvérisation de la suspension NS sur la surface du GBR, une partie du NS s'est infiltrée dans la couche de surface poreuse du BGR, dont l'épaisseur était d'environ 200 μm [28].

Les microstructures du GBR non traité et du GBR traité par la méthode de pré-pulvérisation et de séchage à l'air de la nano-silice sont montrées par (MEB-EDX).

Dans la figure. II. 15 elle montre que la surface du GBR non traité était poreuse et que la composition de la phase principale était C-S-H, comme le montre la figure. 15. 2 (a). Après avoir utilisé la méthode de traitement par pulvérisation préalable de NS plus séchage à l'air, la surface du GBR était recouverte d'une couche de gel de silice, dont l'épaisseur était d'environ 10 μm , et il y avait de nombreuses particules de NS agglomérées attachées à la surface du couche de gel de silice, comme le montrent les figure. II. 15. (a), (b) et (c).

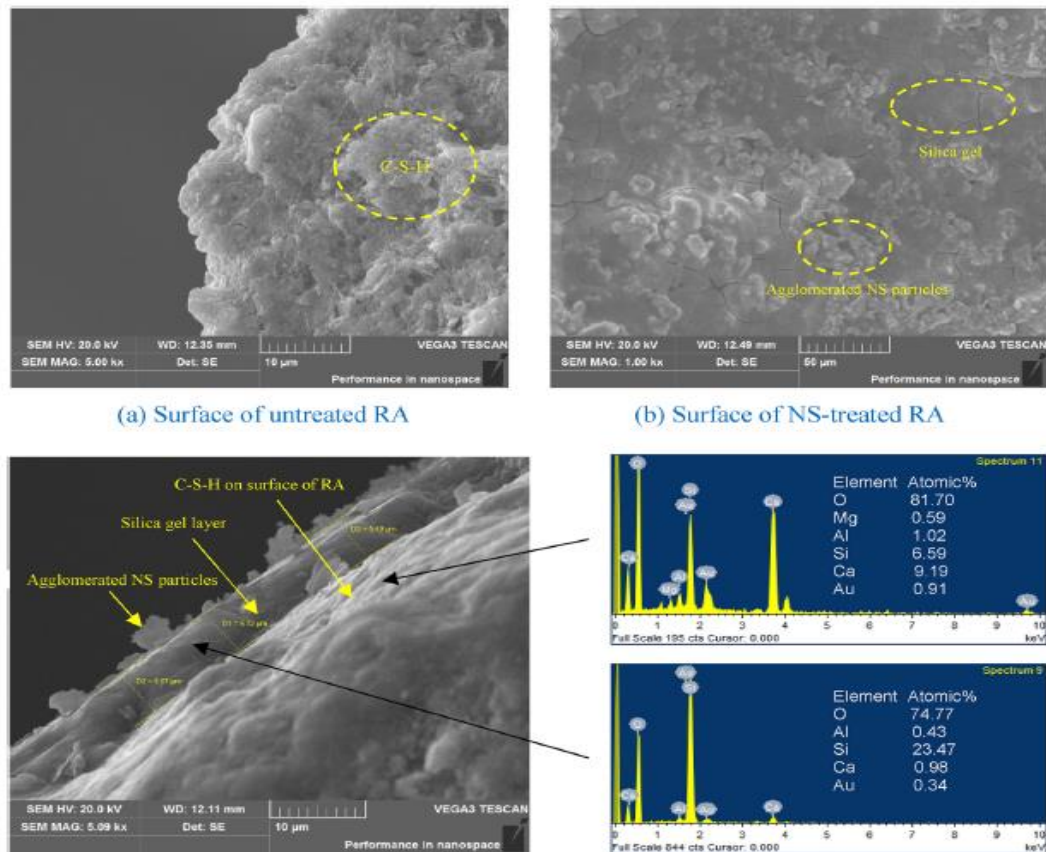


Figure. II. 15. Microstructures SEM de GBR non traité et de GBR traité par pulvérisation de 3% de Nano-Silice avec méthode de séchage à l'air [97].

L. Li, D. et al. (2021). [97], a recommandé un dosage optimal de 3% de suspension de NS par masse de GBR pour la pré-pulvérisation avec séchage à l'air, avec une taille de particules NS plus importante pour obtenir de meilleurs résultats. La pré-pulvérisation sans séchage à l'air s'est avérée être la méthode la plus efficace.) L'utilisation de 3 % de la nano-silice pour l'encapsulation a permis une amélioration significative de la micromécanique en termes de micro dureté, à la fois pour l'ancien mortier à la surface des GBR et pour le nouveau mortier près de l'interface BGR, avec tous les traitements avec NS. Cette amélioration de la performance est particulièrement attribuable à l'optimisation de la microstructure près de l'interface.

A. Katz et al(2004). [242] a observé que la résistance à la compression à 28 jours du (BGR) augmentait d'environ 15% lorsque les (GBR) étaient initialement trempés dans une solution de (FS), (avec une concentration de 1 kg/L) pendant 24 heures, puis séchés avant le coulage du béton.

II. 4. L'EFFET DU TRAITEMENT PAR ENCAPSULATION DES GBR SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON DURCI

II. 4. 1. L'effet de la BGRT sur l'attaque chimique dans un environnement agressif

Zhao et al. [66] ont examiné L'impact de l'GBR pré-revêtu sur la résistance du mortier à l'attaque par les sulfates a été étudié en utilisant la résistance à la flexion et le coefficient de corrosion, comme indiqué dans le tableau. II. 3 et la figure. II. 16, Il est indiqué que la résistance à la flexion du mortier témoin, durci dans une solution de sulfate, a diminué de 20 % par rapport au mortier durci dans de l'eau pure. Cependant, le béton préparé avec de l'GBR pré-revêtement n'a diminué que de 2,9 %, démontrant ainsi une réduction significative de la perte de résistance après la modification de l'GBR. La raison en est probablement que le ciment et les cendres volantes ont réagi avec les cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présents dans le vieux mortier attaché, entraînant ainsi une réduction de la teneur en ettringite ainsi qu'une expansion volumétrique due aux dommages structurels. Le principe de la réaction chimique est décrit comme suit :

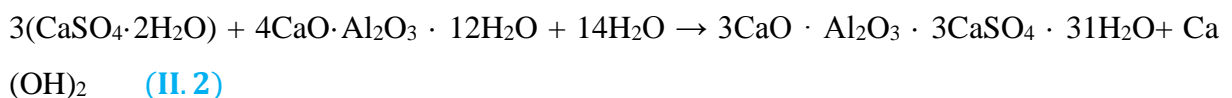
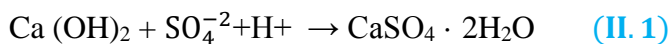


Tableau. II. 3. Effet de GFR pré-encapsulé sur la résistance aux attaque de sulfate mortier de ciment ASTM C452-2006 [243].

type	Résistance de flexion		Flexion maximale force(KN)		Corrosion résistance coefficient (%)
	Frais eau	Sulfate solution	Frais eau	Sulfate solution	
GFR (contrôle)	5,5	4,4	0,073	0,058	80,0
GFR-1,2s- FA	7,0	6,8	0,094	0,090	97,1

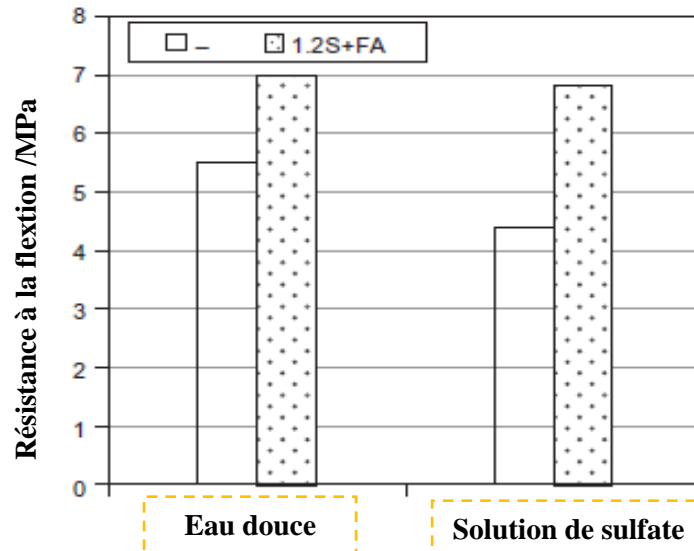


Figure. II. 16. Résultats de la résistance à l'attaque des sulfates pour le mortier [66].

D'autres études et tests, menés par Boubekeur et al. (2019), ont également été réalisés.[244] met en lumière l'influence de la combinaison de poudre de calcaire (PC) et de laitier granulé au haut fourneau (LGHF) sur les propriétés mécaniques et la performance en durabilité du ciment ternaire mélangé (.). Des échantillons de mortier ont été soumis à des tests de flexion et de compression ainsi qu'à des attaques de 1 % d'acide chlorhydrique (HCl), de 3 % d'acide sulfurique (H₂SO₄), de 5 % de sulfate de sodium (Na₂SO₄) et de 5 % de sulfate de magnésium (MgSO₄). L'incorporation de LGHF améliore la résistance aux sulfates et acides. Une équation prédit avec précision la durabilité du ciment ternaire en solution acide/sulfate, corrélée à la résistance à la compression, avec une bonne concordance expérimentale. La figure. II. 17 .montre les résultats de la perte de poids en fonction du temps pour le mortier exposé à des solutions de H₂SO₄ à 3 % et de HCl à 1 % pendant 6 mois. Après une exposition de 180 jours à une solution de HCl à 1 %, les mortiers contenant (60 % de PC + 10 % de LP + 30 % de GGBFS) et (50 % de PC + 10 % de LP + 40 % de GGBFS) ont présenté une perte de poids inférieure à celle du PC de 22 % et 25 % respectivement, comme illustré dans la figure. II. 18 (a). La pénétration des acides dépend de la porosité ouverte du mélange de mortier. Le remplacement d'une partie du ciment Portland par les adjuvants minéraux a augmenté la résistance du mortier à l'attaque acide. Z. Makhloufi et al (2015).[245], ont montré que le mortier contenant (10 % de LP + 30 % de GGBFS + 10 % de pouzzolane) présente une légère perte de poids, tandis que le mortier contenant du PC montre une importante perte de poids après 90 jours d'immersion. D'autre part, après une exposition de 180 jours à une solution de HCl à 1 %, les combinaisons 60PC10LP30S et 50PC10LP40S ont montré une meilleure résistance à l'attaque acide, leur perte de poids étant inférieure à celle du PC de 39 % et 32 % respectivement, comme illustré dans la figure. II. 17 (b).

L'addition de GGBFS conduit à améliorer la résistance à l'attaque acide ; en raison de la composition chimique et de phase ainsi que de l'hydraulique latente du laitier, qui confère une bonne résistance à la compression à long terme. À partir de ces résultats, on constate l'effet bénéfique de l'incorporation de GGBFS dans le ciment contenant de la poudre de calcaire, ce qui réduit la pénétration des agents agressifs.

L'influence positive du GGBFS sur la résistance chimique se traduit par la réaction pouzzolanique, qui fixe la portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment pour former des gels C-S-H supplémentaires de deuxième génération et donc l'augmentation de la compacité des hydrates de calcium, entraînant une réduction de la porosité, ce qui empêche la pénétration des acides dans la matrice cimentaire. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés par A. Aghaeipour et al (2017). [246] où ils ont constaté que l'incorporation de 40 % de GGBFS réduisait la porosité, l'absorption d'eau et la perméabilité du béton. Une réduction significative de la détérioration acide a été enregistrée pour le béton contenant du GGBFS, principalement attribuée à la composition chimique différente du liant [247], [248].

T. Bakharevet al (2003). [249] ont rapporté que l'utilisation de GGBFS n'avait qu'un effet positif sur l'augmentation de la résistance acide. Par conséquent, on peut conclure que le GGBFS peut être utilisé pour améliorer la résistance à l'acide sulfurique et chlorhydrique. L'inspection visuelle des spécimens de mortier durci stockés dans des solutions acides pendant 180 jours est présentée dans les figures. II. 18 et 19 Une perte de poids importante est observée pour le mortier contenant du PC et celui contenant du LP par rapport aux autres spécimens. Aucune détérioration évidente n'a été observée lors de l'inspection visuelle pour les spécimens (70PC10LP20S), (60PC10LP30S) et (50PC10LP40S).

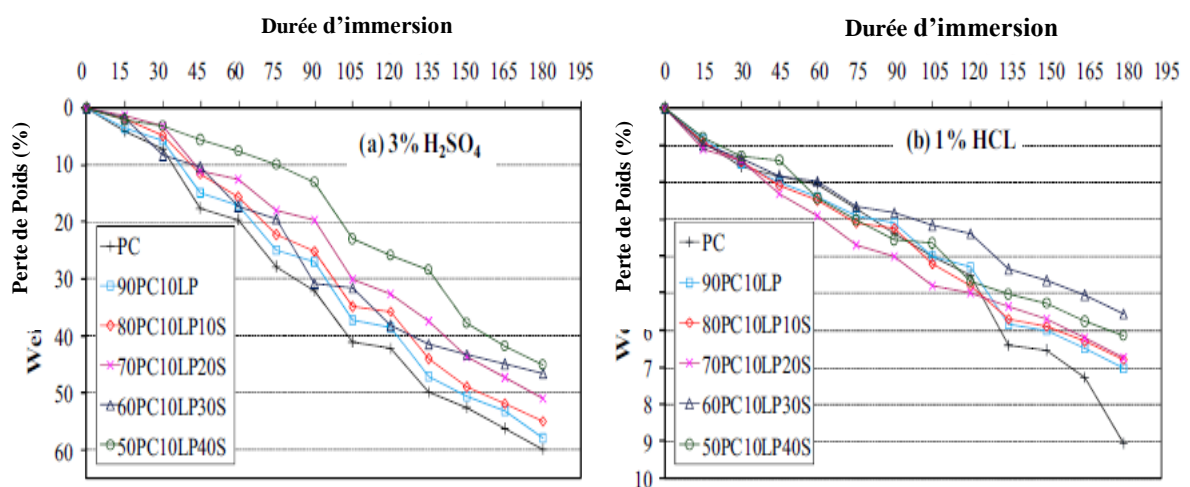


Figure. II. 17. Perte de poids du mortier immergé dans (a) 3% H₂SO₄ et (b) 1% HCl [244].

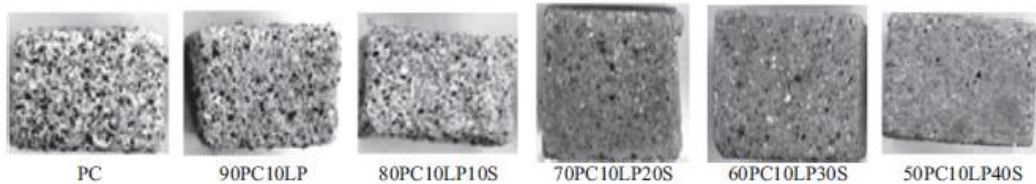


Figure. II. 18. Échantillons de béton immergés dans 3% H_2SO_4 pendant 180 jours [244].

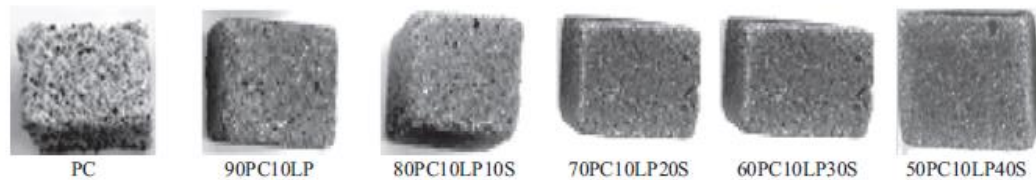


Figure. II. 19. Échantillons de béton immergés dans 1% HCl pendant 180 jours [244].

II. 4. 2. Perte de résistance à la Mécanique du BGRT soumis à diverses charges et actions environnementales

Dans leur étude, Lei, Li et Tang (2020) [250] ont évalué la durabilité du BGR exposé à diverses conditions environnementales telles que la saumure, le chargement mécanique, et les cycles de gel/dégel avec saumure. Ils ont analysé l'impact des granulats recyclés de qualité (GBR) sur le (BGR), en variant l'épaisseur et la couverture du vieux mortier autour des granulats recyclés (MGR) et en considérant les dommages initiaux. Des traitements incluant l'imprégnation des GBR avec une émulsion de PVA ou des solutions de nano- SiO_2 , ainsi que le renforcement avec des cendres volantes, ont été testés. Les résultats ont montré que la combinaison de cycles de gel-dégel salins et de chargement mécanique provoquait la dégradation la plus sévère du BGR, suivi des cycles de gel-dégel salins seuls, du chargement mécanique seul, et de l'exposition à la saumure. Les interfaces anciennes des GBR étaient les plus vulnérables, où l'augmentation de l'épaisseur ou de la couverture du vieux mortier, ainsi que les dommages initiaux aux GBR, réduisaient la durabilité du BGR. Les traitements avec 1,5 % de nano- SiO_2 ou une émulsion de PVA, ainsi que le remplacement partiel du ciment par des cendres volantes, ont significativement amélioré la résistance du BGR [250].

Dans l'étude menée par Lei et al (2020). [250] les conclusions principales se présentent comme suit :

1. La dégradation du BGR est accentuée par la charge mécanique et les cycles de gel-dégel en solution saline, avec une réduction significative de sa durabilité à mesure que les cycles de charge augmentent.

2. Les fissures se développent principalement aux interfaces entre le vieux mortier et les agrégats recyclés, amplifiant la vulnérabilité du BGR. Les dommages initiaux au vieux mortier ont un impact plus prononcé que son épaisseur ou sa couverture.
3. Le traitement des agrégats recyclés avec 1,5 % de nano-SiO₂ et 1,5 % d'émulsion de PVA, combiné au remplacement de 10 % du ciment par des cendres volantes, améliore considérablement la résistance du béton recyclé aux charges mécaniques et aux cycles de gel-dégel en solution saline.
4. Après exposition aux charges mécaniques et aux cycles de gel-dégel en solution saline, des fissures et des grandes particules apparaissent dans les (ITZ), présentant une micromorphologie désordonnée [250].

II. 4. 2. 1. La perte de résistance à la compression sur l'impact d'action cycles de gel-dégel

Selon Lei et al. (2020), les performances de durabilité du BGR sont avérées. [250], Les valeurs de perte de résistance à la compression selon de chaque groupe sont présentées dans la figure. II. 20 On peut constater que la perte de résistance à la compression du groupe soumis aux actions combinées de charge mécanique et de cycles de gel-dégel en solution saline est la plus élevée, suivie des cycles de gel-dégel en solution saline et de la charge mécanique seule. La perte de (R_C) du groupe soumis à la solution saline (RC-C10-L0) est la plus faible, ce qui implique que l'effet de la corrosion par le sel sur la durabilité du BGR est négligeable. Les résultats des tests montrent également que la perte de résistance à la compression du groupe soumis à la solution saline (RC- C10 -L0) était de 2,8 %, tandis que la perte de résistance à la compression du groupe soumis aux cycles de gel-dégel en solution saline (RC-F10-L0) était de 15,5 %. Autrement dit, la perte de résistance à la compression est considérablement accrue en raison de la combinaison des cycles de gel-dégel. De plus, la perte de résistance à la compression est passée de 12,8 % à 27,5 % lorsque l'action environnementale est passée de la charge mécanique (RC -C0- L50) aux actions combinées de charge mécanique et de cycles de gel-dégel en solution saline (RC-F10-L50-5). Cela indique que la perte de résistance à la compression est considérablement accrue en raison de la combinaison des cycles de gel-dégel en solution saline. Apparemment, les cycles de gel-dégel affectent significativement les performances du béton armé. De même, la perte de résistance à la compression est passée de 15,5 % à 27,5 % lorsque l'action environnementale est passée uniquement des cycles de gel-dégel en solution saline (RC-F10-L0) aux actions combinées de charge mécanique et de cycles de gel-dégel en solution saline (RC-F10-L50-5).

Cela indique l'influence significative de la charge mécanique sur les performances du béton armé. D'autre part, les résultats du groupe soumis à la charge mécanique montrent que la perte de résistance à la compression est passée de 6,4 % (RC-F0-L30) à 12,8 % (RC-F0-L50), avec l'augmentation du niveau de contrainte. Cela démontre que l'effet néfaste de la charge mécanique sur les performances du béton armé est plus évident à des niveaux de contrainte élevés. De plus, dans le groupe soumis aux actions combinées de charge mécanique et de cycles de gel-dégel en solution saline, la perte de résistance à la compression est passée de 17,3 % (RC-F10-L50-1) à 27,5 % (RC-F10-L50-5) avec l'augmentation du nombre de fois de chargement répétitif de 1 à 5. [250].

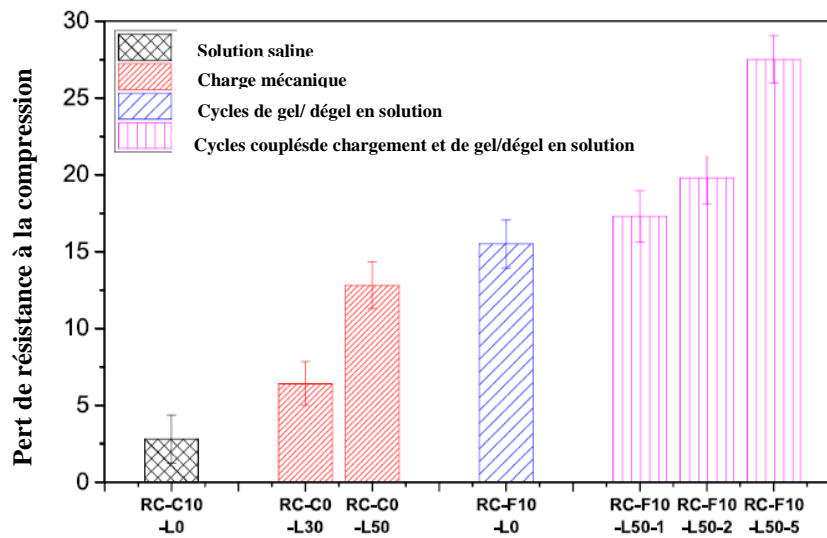


Figure. II. 20. Perte de résistance à la compression du BGR soumis à diverses charges et actions environnementales [266].

II. 4. 2. 2. L'Effet de la qualité de GBR (Modèle de panne Pendant)

Lei et al (2020). [250] lors du test de compression des spécimens après des actions couplées (voir figure. II. 21), des fissures sont apparues initialement à l'interface entre l'ancien mortier et l'agrégat naturel. Cela signifie que l'interface entre l'ancien mortier et GN est la région la plus faible dans le béton armé. Par la suite, des fissures se sont formées à l'interface entre l'ancien mortier et le nouveau mortier. Finalement, les spécimens ont échoué en raison de la connexion des fissures et de l'écaillage du mortier.

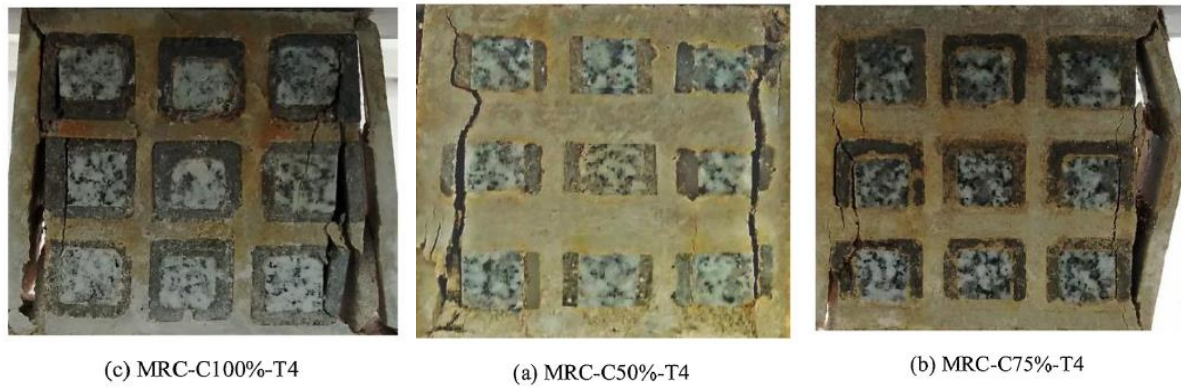


Figure. II. 21. Modèles de dommages du béton recyclé modélisé sous compression [250].

II. 4. 2. 3. La perte de résistance à la compression sur l'impact de action cycles de gel/dégel / chargement mécanique

Les conclusions de l'étude réalisée par Lei et al. [250] sur la résistance à la compression et la perte de résistance à la compression du BGR suite aux actions conjointes de charge mécanique et de cycles de gel-dégel en solution saline sont présentés dans la Figure 11. Comme illustré dans la figure. II. 22 (a), la résistance à la compression du BGR diminue tandis que la perte de résistance à la compression augmente avec l'augmentation du nombre de cycles de gel-dégel du BGR. Par exemple, la résistance à la compression du BGR chute de 32,1 à 23,2 MPa et la perte de résistance à la compression du BGR passe de 15,3% à 38,7% lorsque le nombre de cycles de gel-dégel du BGR évolue de 0 à 50. Ces résultats suggèrent que la durabilité du BGR est impactée négativement par l'augmentation des dommages initiaux du BGR. Dans la figure. II. 22 (b), Lei et al (2020). [250] montre que la résistance à la compression et la perte de résistance à la compression du BGR diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur du vieux mortier. Par exemple, la résistance à la compression du BGR diminue de 24,8 à 21,8 MPa et la perte de résistance à la compression du BGR augmente de 37% à 39,8% lorsque l'épaisseur du vieux mortier est augmentée de (2 à 6) mm Par conséquent, la durabilité du BGR montre une légère diminution avec l'augmentation de l'épaisseur du vieux mortier fixé au BGR.

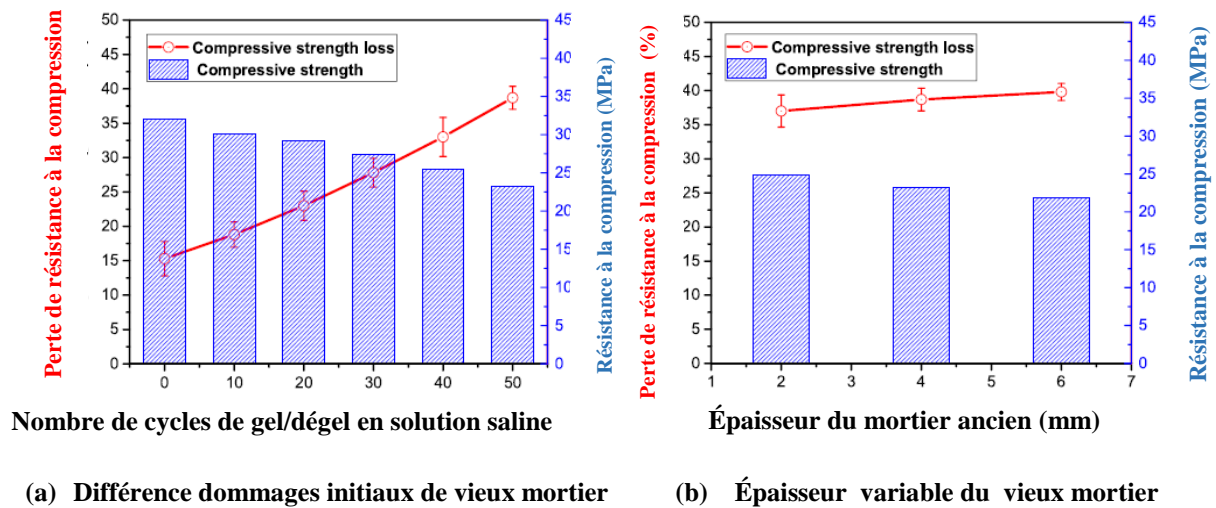


Figure. II. 22. Résistance à la compression et perte de résistance à la compression du BGR après des actions couplées de charges mécaniques et de cycles de solution saline [250].

II. 5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré deux approches visant à améliorer les propriétés du (GBR). La première consistait à la suppression du mortier attaché au GBR, une pratique coûteuse et complexe à mettre en œuvre. En effet, elle entraîne une baisse significative de la productivité, surtout compte tenu de la grande quantité de gravier nécessaire (BGR traité).

Les méthodes telles que la bio-précipitation, la géo polymérisation et l'auto-cicatrisation bactérienne présentent un potentiel remarquable, mais leur mise en œuvre peut être complexe et coûteuse. Nous avons observé que bien que les méthodes scientifiques et les techniques visant à améliorer la durabilité et la résistance mécanique du mortier soient très efficaces, elles entraînent souvent des coûts considérables et nécessitent des procédures plus complexes, ce qui rend leur application sur site difficile.

C'est pourquoi nous avons conclu que le traitement par encapsulation des GBR par un coulis cimentaire, devient une solution réalisable et adaptée, particulièrement pour garantir la durabilité du (BGR traité). Cette approche complète efficacement d'autres méthodes de traitement. Elle est facile, simple, peu coûteuse et peut être mise en œuvre en fonction du temps disponible.

Dans ces chapitres qui suivent, nous explorerons l'effet du traitement par encapsulation sur la durabilité des bétons composés entièrement de BRG à 100 %, en le comparant avec un béton de référence. Cette comparaison ouvrira ainsi la voie à une compréhension plus approfondie et à des solutions innovantes pour l'industrie du (BGR traité).

Partie II : Démarche expérimentales

Chapitre III

MATÉRIAUX ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALES

TROISIÈMES CHAPITRE

MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

III. 1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les matériaux utilisés pour la formulation des différents mélanges de béton étudiés ainsi que la méthodologie adoptée lors de cette recherche expérimentale. Nous examinons en détail les caractéristiques des (GBR) issus des déchets de béton démolis ainsi que celles des (GN) dans la composition des bétons.

III. 2. LES CONSTITUANTS DES BÉTONS FABRIQUÉS

Pour cette campagne expérimentale à grande échelle, les bétons ont été composés de ciment, d'eau, de sable de dune, de GN et de GBR. Une caractérisation détaillée de ces matériaux a été effectuée pour évaluer leurs propriétés physiques et mécaniques. Aucun adjuvant n'a été ajouté lors des étapes de mélange des bétons étudiés. Cependant, dans le cinquième chapitre, nous avons utilisé de l'hydrofuge et de la fumée de silice dans le coulis destiné au traitement des GBR avant la phase de mélange.

III. 2. 1. Le ciment : Le ciment utilisé était le ciment Portland résistant aux sulfates de type CEM I 42.5N-SR3, fourni par l'usine de ciment de M'Sila (Algérie).

III. 2. 2. Fume de silice(FS) :

La fumée de silice a été fournie par BASF-Alegria

La composition chimique et les propriétés physiques du ciment et de la Fumée de silice(FS) utilisé sont répertoriées dans le tableau III.1.

Tableau. III. 1. Compositions chimiques et les propriétés physiques du ciment utilisé.

Oxides (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Loss	SSB(cm ² /g)	ρ (g/cm ³)
Ciment	63,63	21,54	4,31	4,50	1,47	1,54	0,35	0,07	0,07	3981	3,15
FS	0,99	92,94	0,367	0,042	0,434	00	0,899	1,909	4,86	24000	2,20

III. 2. 3. L'Adjuvant

Hydrofuge (105HF) Master pozzolith

Agent hydrofuge liquide, utilisé est le produit Hydrofuge (105HF) Master Pozzolith fourni par BASF Algérie. Ce produit est exclusivement utilisé pour la deuxième optimisation de l'encapsulation (GBR).

III. 2. 4. L'Eau:[EN 1008]

L'eau joue un rôle crucial en hydratant le ciment et en améliorant son ouvrabilité. Les exigences varient significativement entre les mortiers et le béton, où un faible rapport E/C. Elle doit être propre, exempte d'acides, d'alcalis ou de matières organiques nocives pour être utilisée. Dans notre étude, nous avons utilisé l'eau du robinet à notre université, conformément aux spécifications physico-chimiques du tableau III.2 et des normes XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211) de 200.

Tableau. III. 2. Analyse physico-chimique de l'eau de gâchage.

Élément	TC ⁰	PH	NO ⁻³	Cl ⁻	SO ⁻⁴	Ca ⁺²
Teneur (mg/l)	20,98	7,55	15,01	219,9	269,1	175,00

III. 2. 5. Le Sable et Les Granulats:[EN 933-1]

Pour la fabrication du béton, nous avons utilisé Des matériaux locaux ont été identifiés expérimentalement dans le laboratoire de génie civil de l'université de M'Sila:

- **Le sable :** Dans cette recherche, le sable employé provient des environs de (Wadi Maiter Boussaâda). Il s'agit de sable dunaire ou de sable éolien siliceux. Ses grains sont de forme arrondie et de surface lisse ; il se distingue par sa finesse et sa granulométrie. Le diamètre maximal d'un grain ne dépasse pas 3,0 mm et le module de finesse est de 1,5.

- **Pour les granulats :** nous avons utilisé deux types :

- **Type (01)** : Granulats ordinaires concassés provenant de la carrière de la station de concassage COSIDER à Bordj Bou Arreridj, située à 25 km de M'sila en direction de (B.B.A).

- **Type (02)** : Granulats recyclés (GBR) obtenus en concassant des grands spécimens de béton durci présentant une résistance à la compression comprise entre 35 et 40 MPa. Leur taille de particule a été corrigée pour être identique à celle des GN .Un concasseur à mâchoires, avec une ouverture de 100 mm x 60 mm et une taille de sortie initialement ajustable inférieure à 40 mm, a été utilisé figure III.1 et figure III.2

Le GN a été collecté en trois fractions sans nécessité de traitement supplémentaire. En revanche, le matériau recyclé a été soumis à un processus spécifique au laboratoire des matériaux et structures de M'Sila. Il a été d'abord concassé à l'aide d'un concasseur à pression de compression pour obtenir des matériaux dans la fraction de 30 à 50 mm Ensuite, avec un concasseur à mâchoires, nous avons obtenu les fractions 3/8 mm, 8/16 mm et 16/25 mm

Chaque type comprend trois fractions figure III.2

Type (01) (G.N), - Fraction (3/8 ,8/16 et 16/25).

Type (02) (G.B.R), - Fraction (3/8 ,8/16 et 16/25).



Figure. III. 1. Différentes étapes et procédure de concassage des blocs de béton.



Figure. III. 2. Stockage des différentes fractions du Gravier recyclé (3/8), (8/16), (16/25).

III. 3. LES PROPRIÉTÉS DES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX UTILISÉS

III. 3. 1. Les caractéristiques physiques du sable

III. 3. 1. 1. Analyse granulométrique : [NF EN 933-1] [251]



Figure. III. 3. Analyse granulométrique de Sable de dune.

L'analyse granulométrique par tamisage est un processus qui conduit à la séparation en fonction de la grosseur des composants présents dans l'échantillon. La Figure III.4 illustre l'analyse granulométrique du sable.

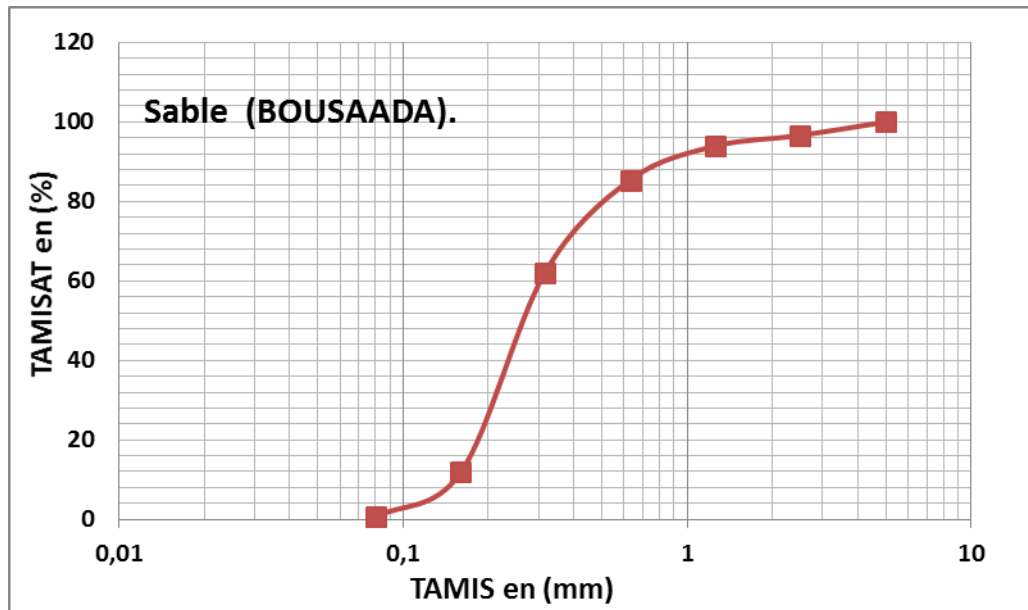


Figure. III. 4. Courbe d'analyse granulométrique du sable de Boussaâda.

III. 3. 1. 2. Module de finesse : [EN12620] [252]

Il est déterminé par :

$$M_f = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

$$M_f = 1,50$$

Il est à noter qu'une grande partie de la courbe granulométrique se situe hors du fuseau recommandé, indiquant que le type de sable testé est fin. Les Caractéristiques physiques du sable employé, sont résumées au tableau III.3

Tableau. III. 3. Caractéristiques physiques de sable d'oued M'aiter: Boussaâda (0/5) mm.

Caractéristiques	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne	Norme
Équivalent de sable visuel (après lavage) E_{sv} %	75,44	75,65	74,78	75,29	[EN 18-598]
Équivalent de sable au piston (après lavage) E_{sp} %	74,56	73,91	75,65	74,70	
La masse volumique apparente γ_{app} (g/cm ³)	1,43	1,43	1,42	1,43	[EN 18-555]
La masse volumique absolue γ_{abs} (g/cm ³)	2,60	2,50	2,50	2,53	
L'absorption d'eau (%)	1,64	1,67	1,65	1,65	
Teneur en eau (W) %	2,33	1,67	1,00	1,66	

III. 3. 2. Les caractéristiques physiques du gravier

III. 3. 2. 1. Définition des granulats et Origine du gravier utilisé

Les granulats utilisés pour la fabrication du BGN sont principalement des granulats calcaires. Il est donc essentiel d'estimer la proportion respective de granulats calcaires et siliceux dans le lot initial de granulats. À cette fin, une analyse chimique a été entreprise. Un échantillon représentatif du lot de GN a été broyé pour obtenir une poudre, à partir de laquelle 100 g ont été prélevés à l'aide d'un échantillonneur à riffle de taille réduite.

Cette poudre a ensuite été soumise à une analyse thermogravimétrique (ATG) pour quantifier la perte de masse due à la déshydratation de la calcite. Par la suite, un traitement acide a été effectué afin de déterminer le résidu solide (quartz). À l'issue de ces divers essais, les proportions massiques de silice et de calcaire ont été obtenues (en supposant que le lot de GN étudié est composé exclusivement de granulats calcaires et siliceux). Ces résultats seront discutés plus en détail dans le quatrième chapitre.

III. 3. 2. 2. Analyse granulométrique du GN et GBR : [EN 933-5] [253]

Critères à respecter pour l'échantillon comblé

L'étude granulométrique d'un échantillon a pour objectif de déterminer la dimension et les pourcentages des diverses particules présentes dans l'échantillon analysé.

III. 3. 2. 3. Échantillonnage et prélèvement

Nous avons effectué des essais sur des échantillons en laboratoire. Prélevés à partir des tas de granulats stockés. Lorsque des matériaux granulaires sont entreposés, les gros éléments ont tendance à se concentrer vers le bas du tas, tandis que le sommet est enrichi en éléments de plus petits diamètres. Ainsi, pour obtenir un échantillon le plus représentatif possible, nous avons prélevé des échantillons dans différentes zones, qu'ils soient naturels ou recyclés.

Ces différentes fractions ont été soigneusement mélangées. Les conclusions de l'étude granulométrique obtenue sont illustrées dans la Figure III.5.

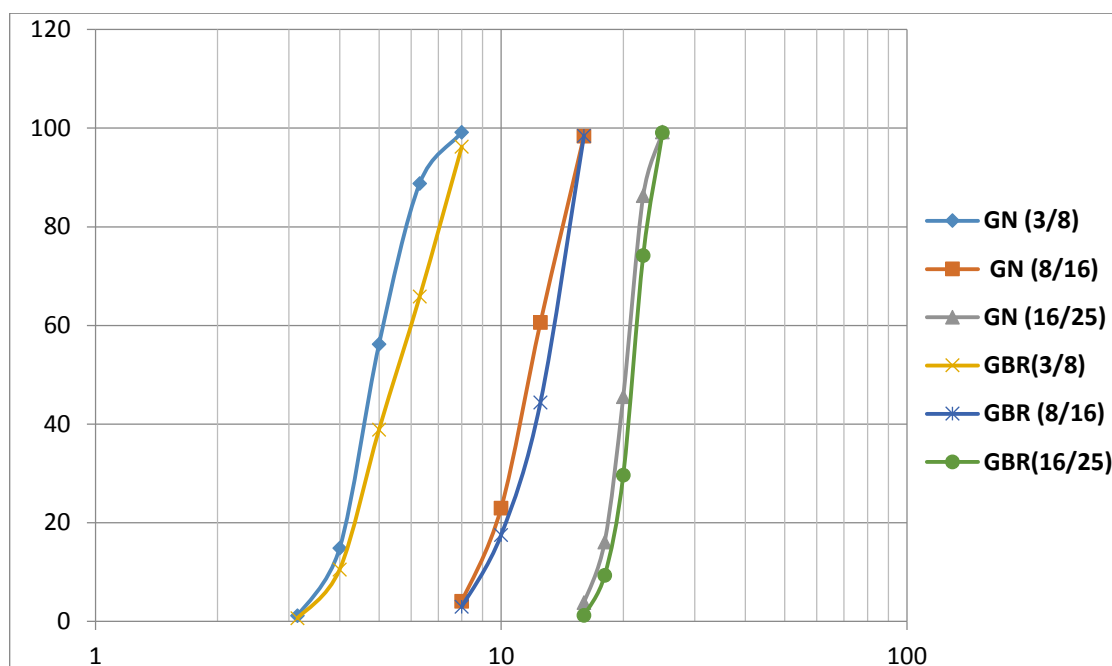


Figure. III. 5. Courbe d'analyse granulométrique présentant la distribution des différents types et fraction de granulats étudiée.

Les GN (3/8, 8/16 et 16/25) de la carrière COSIDER se distinguent par leur propreté et leur densité, présentant des courbes granulométriques qui se situent entièrement dans les intervalles de référence requis par les spécifications et normes techniques. Les GBR (3/8, 8/16 et 16/26) proviennent du recyclage des éléments après démolition, suivis d'un processus de tamisage. Le GBR utilisé pour la fabrication du béton est obtenu à partir de la démolition d'éprouvettes en béton. Après le concassage initial, des opérations de correction granulométrique sont effectuées. Les étapes suivies ainsi que les normes d'analyse granulométrique sont identiques à celles appliquées aux GN. Nous observons une correspondance significative entre les courbes granulométriques des deux types de graviers (GN et GBR) pour toutes les fractions 3/8 8/16 et 16/25, ce qui témoigne de la qualité et de la cohérence des produits de GBR obtenus.

III. 3. 2. 4. la Masse volumique [EN 1097-6] [254]

La masse volumique d'un objet correspond à sa masse pour chaque volume qu'il possède. On distinguera le volume apparent du volume absolu, car il existe :

a. La masse volumique apparente (γ):

Il s'agit du rapport entre la masse sèche ($M_2 - M_1$) de l'échantillon et le volume occupé (V) par les composants solides corporels et les espaces vacants présents dans les particules.

Il résulte que :

$$\rho = \left[\left(\frac{M_2 - M_1}{V} \right) \right] \quad (\text{III. 1})$$

Les conclusions tirées de la masse volumique apparente sont classées dans les tableaux tableau III.4

Tableau. III. 4. La masse volumique apparente (γ) du granulats étudiée.

Fraction et type des granulats		M ₂ (kg)	M ₁ (kg)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(3/8) V=7 L	GN	12,10	2,922	1,31	1,320
		12,15		1,32	
		12,21		1,33	
	GBR	11,00	2,922	1,155	1,156
		11,02		1,157	
		11,02		1,157	
(8/16) V=10 L	GN	17,38	3,497	1,38	1,380
		17,65		1,41	
		17,21		1,37	
	GBR	15,404	3,497	1,191	1,180
		15,354		1,187	
		15,344		1,184	
(16/25) V=20 L	GN	34,55	7,289	1,363	1,372
		35,58		1,414	
		34,10		1,340	
	GBR	31,57	7,289	1,214	1,210
		31,55		1,213	
		31,55		1,213	

La masse volumique apparente du (GN) de la classe 3/8 dépasse celle du (GBR) de 12,43 %. Pour la classe 8/16, nous avons observé que le GN dépasse le GBR de 14,49 %. Enfin, pour la classe 16/25, la masse volumique apparente du GN est supérieure de 11,80 % à celle du GBR, ce qui indique que la proportion de ce dernier est inférieure aux deux classes précédentes. Ces différences s'expliquent par plusieurs facteurs. D'abord, il y a la présence notable d'un mortier résiduel attaché formant une couche externe autour des GBR, ainsi que l'existence de la (ITZ). De plus, les vides intermédiaires entre les grains, causés par leur forme et leur taille irrégulières, contribuent également à réduire la masse volumique apparente.

Pour la fraction 16/25 du GBR, nous avons constaté un faible pourcentage de mortier attaché enroulé autour du GN, en partie à cause de la fragilité de cette couche de mortier et de sa perte lors de la démolition. Ces caractéristiques varient selon les propriétés des matériaux recyclés et le type de procédé de concassage utilisé, ce qui a une influence directe sur la masse volumique apparente du GBR.

b. La masse volumique absolue ou spécifique (ρ)

C'est le quotient de la masse sèche (M) de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu ou volume réel, ($V = V_2 - V_1$))

$$\rho = \left[\left(\frac{M}{V_2 - V_1} \right) \right] \quad (\text{III. 2})$$

L'opération est effectuée trois fois et on prend la moyenne. Les données recueillies sont organisées. dans les tableaux suivants tableau III.5 :

Tableau. III. 5. La masse volumique absolue (ρ) du granulats étudié.

Fraction et type des granulats		M (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	ρ (kg/l)	ρ_{moy} (g/ml)
3/8	GN	300	400	516	2,586	2,594
				515	2,608	
				516	2,586	
	GBR	300	400	522	2,459	2,432
				524	2,419	
				524	2,419	
8/16	GN	300	400	517	2,564	2,569
				518	2,542	
				516	2,586	
	GBR	300	400	520	2,500	2,528
				516	2,586	
				520	2,500	
16/25	GN	300	400	515	2,608	2,593
				516	2,586	
				516	2,586	
	GBR	300	400	516	2,586	2,543
				520	2,500	
				518	2,543	

La masse volumique absolue du (GN) de la classe 3/8 est supérieure à celle du (GBR) de 6,24 %. Pour la classe 8/16, nous avons constaté que le GN dépasse le GBR de seulement 1,59 %. Enfin, pour la classe 16/25, la masse volumique absolue du GN est très proche de celle du GBR, avec une différence de seulement 1,92 %. Cette convergence des proportions dans la masse volumique absolue contraste avec les variations observées dans la masse volumique apparente entre le GN et le GBR selon les différentes classes.

Ainsi, on observe que le GBR présente une masse volumique absolue inférieure comparée au GN. Donc, les GBR présentent une faible masse volumique et faible densité.

III. 3. 2. 5. La porosité : [EN 1097-6]

Le rapport entre le volume des vides d'un matériau et son volume total est appelé porosité. Ainsi, elle symbolise le degré d'occupation du volume par les vides. La porosité, qui est

exprimée en pourcentage, est déterminée par la relation suivante :

$$P(\%) = \left[\left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \right) \right] \times 100 \quad (\text{III. 3})$$

III. 3. 2. 6. La compacité : [EN 1097-6]

Il s'agit du rapport entre le volume des particules solides et le volume total du matériau, exprimé en pourcentage (%) et illustré par la relation suivante : $C(\%) = 1 - P$ (III. 4)

III. 3. 2. 7. L'indice des vides [EN 1097-6]

L'indice de vide est exprimé en pourcentage (%) et est calculé selon la relation suivante $e =$

$$\frac{V_V}{V_S} = \frac{P}{(100-P)} \quad (\text{III. 5})$$

V_V : représente le volume des vides, c'est-à-dire l'espace non occupé par les grains solides

V_S : représente le volume des grains solides.,

P : est la proportion des vides par rapport au volume total (exprimée en pourcentage).

Le tableau III.6 ci-après présente les données concernant la porosité, la compacité et l'indice des vides des granulats.

Tableau. III. 6. Porosité, compacité et indice des vides du granulats étudié.

Fraction	Porosité P (%)	Compacité C(%)	Indice des vides (e)(%)
(3/8) Recyclé	52,47	47,53	1,10
	Naturel	49,11	50,88
(8/16) Recyclé	53,32	46,67	1,14
	Naturel	46,28	53,71
(16/25) Recyclé	52,41	47,58	1,10
	Naturel	47,09	52,91

La différence de proportion de porosité entre les (GN) et (GBR) dans la classe 3/8 est très faible, estimée à 6,40%. Cette différence s'explique par les caractéristiques géométriques et la composition des grains de cette classe, qui sont semi-réguliers en dimension et compacts en raison de leur petite taille pour les deux type naturel au recyclé.

En revanche, la différence de proportion de porosité entre le GN et le GBR dans la classe 8/16 est significativement plus élevée, estimée à 13,20%. Cette différence est due à la forme géométrique irrégulière de la zone de GBR et de mortier attaché, formant une surface irrégulière propice à la formation de vides. De plus, la présence importante de mortier résiduel sous forme d'une couche externe enroulée autour de (ITZ) du (GN/mortier attachée) contribue aux vides intermédiaires entre les grains, accentuée par la forme et la taille irrégulières lors de l'incorporation du squelette granulaire. Cette observation est cohérente avec notre interprétation de la masse volumique apparente pour cette classe granulaire. La différence de pourcentage de porosité dans la classe 16/25 est estimée à 10,15%, une différence de niveau moyen qui correspond également à la masse volumique apparente observée pour cette même classe. Cette analyse met en lumière les variations significatives de porosité entre les GN et recyclés selon les classes granulométriques, influencées par leurs caractéristiques géométriques et la présence de mortier résiduel. Donc le GBR présente une porosité élevée.

III. 3. 2. 8. Résistance à la fragmentation et à l'usure [EN 1097- 2] [255]

Pour évaluer la résistance à la fragmentation par choc ou la dureté (**Los Angeles**) des chaque type et fraction (GBR et GN), Un échantillon de 5 kg de granulat est placé Dans un tambour, Figure. III.6 un système rotatif capable de se déplacer autour de son axe, soutenu par une charge de 7 à 12 boules d'acier ajustée selon les spécifications pour la classe granulaire choisie.



Figure. III. 6. L'échantillon et les boules avant l'essai et après l'essai.

À la fin de l'essai, La relation suivante permet de calculer le coefficient pour Los Angeles. La relation suivante permet de calculer le coefficient pour Los Angeles, LA :

$$LA = 100 (P/5000) \text{ (III. 6)}$$

Où **P** représente le passant à 1,6 mm

Tableau III.7 et tableau III.8 suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :

Tableau. III. 7. Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A .

Coefficient L_A (%)	Évaluation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Le tableau ci-dessous présente les résultats acquis :

Tableau. III. 8. Résultats d'essai de Los Angeles du GBR et GN.

Fraction granulaire	Type de granulats L_A (%)	
	GN	GBR
(3/8)	21	28,76
(8/16)	20,74	26,64
(16/25)	22	30,44

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que les résultats suivants

- Le GN (3/8) : assez dur ($L_A = 21$ %) / (L_A entre 20 et 25),
- Le GN (8/15) : très dur ($L_A = 20,74$ %) / ($L_A < 20$),
- Le GN (15/20) : dur ($L_A = 22$ %) / (L_A entre 20 et 25),
- Le GBR (3/8) : assez dur ($L_A = 28,76$) / (L_A entre 25 et 30),
- Le GBR (8/16) : assez dur ($L_A = 26,64$) / (L_A entre 25 et 30),
- Le GBR (16/20) : gravier moyennement dur ($L_A = 30,44$) / (L_A entre 25 et 30). Donc, les (GBR) présentent une faible résistance à la fragmentation et à l'usure.

III. 3. 2. 9. Degré d'absorption d'eau et teneur en d'eau: [EN 1097-6]

Il est crucial de connaître le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat pour modifier la quantité d'eau dans le mélange employé dans la production du béton (Figure. III.7).



Figure. III. 7. Essais de la tenue en eau et l'absorption du GN et GBR.

Les mesures d'absorption d'eau sur les granulats sont effectuées conformément à la norme [NF EN 1097-6, 2001]. Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport entre l'augmentation de masse de l'échantillon après son immersion dans l'eau et sa masse sèche initiale. Il mesure la capacité d'un matériau à absorber et à retenir l'eau.

Ce coefficient est exprimé en pourcentage (%) et calculé selon la formule suivante :

$$A(\%) = \left[\frac{M_H - M_S}{M_S} \right] \cdot 100 \quad (\text{III. 7})$$

M_H : La masse des granulats après immersion dans l'eau (en g) pendant 24 heures

M_S : La masse des granulats secs en (g) après 24 heures.

Le tableau III.9 ci-après rassemble les résultats :

Tableau. III. 9. Degré d'absorption et teneur en d'eau du GN et GBR.

fraction	type	A (%)	W (%)
(3/8)	GN	1,6	0,425
	GBR	7,46	0,875
(8/16)	GN	1,33	0,2
	GBR	6,17	1,125
(16/25)	GN	1,10	0,125
	GBR	5,59	0,875

Nous observons des différences marquées dans le processus d'absorption entre trois fractions granulaires pour les deux types de (GN) et (GBR). Dans la fraction (3/8), le granulat recyclé présente une absorption élevée en comparaison du GN, dépassant ce dernier de 78,55 %. De même, dans la fraction (8/16), l'absorption élevée du GBR dépasse celle du GN de 78,44 %. Pour la dernière fraction (16/25), le GR montre également une absorption très élevée, surpassant celle du GN d'environ 80,32 %. Cette forte absorption est en partie due à la présence de mortier résiduel attaché sous forme d'une couche externe enroulée autour des GBR, ainsi que des micropores dus à l'ITZ.

Le mortier possède la propriété d'absorber l'eau, principalement en raison de sa composition riche en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui est très absorbant dans l'eau. En revanche, le GN, constitué principalement de plus de 95 % de calcite (CaCO_3), présente une composition minéralogique qui limite son absorption par immersion. Il est notable que les GBR montrent une absorption élevée, atteignant jusqu'à cinq fois celle des (GN).

III. 4. FORMULES ET FABRICATION DU BÉTON DE RÉFÉRENCE (BN, BGR)

III. 4. 1. Formulations adoptées (Données de calcul)

Le béton est formulé par la méthode de DREUX GORISSE qui repose sur les abaques et sur un choix préalable à fixer à l'avance.

Diamètre maximal $D_{\max}=25$ mm. Et le dosage en ciment à 350 kg/m^3 , la résistance à la compression de 25 MPa à 28 jours (béton ordinaire), vibration normale Le ciment utilisé est un **CEMI 42,5** CRS, béton plastique de serrage d'un vibration courant et très plastique avec **affaissement =7** cm), Module de finesse du sable= $1,5$, Coefficient de compacité = $0,826$, Coefficient de granulaire $G = 0,5$, et le Pour la détermination des pourcentages des différentes classes granulaires entrant dans la formulation du squelette du béton avec un minimum de vides, on a tracé :

- Les courbes granulométriques des différents granulats (G3/8, G8/16 et G16/25 Sable de dune)
- La courbe théorique de référence d'un matériau à minimum de vide schématisée par une droite brisée.
- La droite de référence de Dreux Gorisse est définie par son abscisse X et son ordonnée Y :

Le point **O (0,08, 0)%**.

Le point **B (D_{\max} , 100%)** Donc, **B (25, 100%)**

Le point **A (X_A , Y_A)** :

$$X_A = \frac{D_{\max}}{2} \text{ Alors } X_A = \frac{25}{2}$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_S + K_P = 41,00$$

Avec :

- Coefficient $K = 2$
- Facteur $K_P = -6$
- Coefficient $K_S = 0,00$

Donc **A (12,5, 41)**.

III. 4. 1. 1. Formulation de bétons de référence

Les (BGN) et (BGR) ont été formulés selon la méthode Dreux-Gorisse. Ainsi, le volume de béton nécessaire pour 1 m^3 de béton à granularité continue est répertorié dans le tableau.III.10.

Tableau. III. 10. Composition du béton dosé à 350 Kg / m³ de ciment.

Constituants	Composition du béton dosé à 350 Kg / m ³ de ciment			
	Proportion%	Volume (l)	Densité	Poids (Kg/m ³)
Sable de dune	32	218,27	2,53	552,22
G3/8	8	54,57	2,59	141,34
G8/16	24	163,7	2,56	419,07
G16/25	36	245,56	2,59	636,07
Ciment	350kg/ m ³	112,9	3,15	350
Eau	197 L/ m ³	197	1	197 L
Adjuvant		San adjuvant		

III. 4. 2. Fabrication des bétons

III. 4. 2. 1. Identification des mélanges des bétons

Dans ce chapitre, deux mélanges de béton de référence ont été utilisés : un (BGN) et un (BGR), ainsi que les deux mélanges sans adjuvant. L'objectif est de comparer les caractéristiques des bétons élaborés à l'état frais et durci à ces derniers ; ils sont identifiés comme suit:

- **Mélange 01 : (BGN)** béton à base de 100% de GN.
- **Mélange 02 : (BGR)**: Béton à base de 100 % de GBR

III. 4. 2. 2. Préparation des mélanges et procédure de malaxage des bétons

III. 4. 2. 2. 1. Méthode de pré-saturation des GBR

Il a été démontré que la méthode de pré-saturation permet de mesurer l'absorption des différentes fractions de GBR dans une période estimée à 5 min après immersion. Cette méthode donne les mêmes vitesses et valeurs d'absorption finale. De plus, pour les trois fractions de GBR, une absorption d'eau significative a été observée entre le moment de l'immersion et la première mesure. Notons que les GBR sont dans un état pré-saturé. Dans ce contexte, plusieurs chercheurs [256][257] ont indiqué que la pré-saturation des GBR contribue à améliorer les propriétés du GBR à l'état frais et durci. Il faut également noter que les 3 fractions de GBR utilisées ont été trempées dans l'eau jusqu'à ce que l'absorption soit fixée, comme le montre la figure III.8 et 9. De plus, les GBR ont été essuyées avec un tissu pour éviter la formation d'une (ITZ), plus poreuse [258][259].



Figure. III. 8. Méthode de pré-saturation des GBR Après 24 heure.

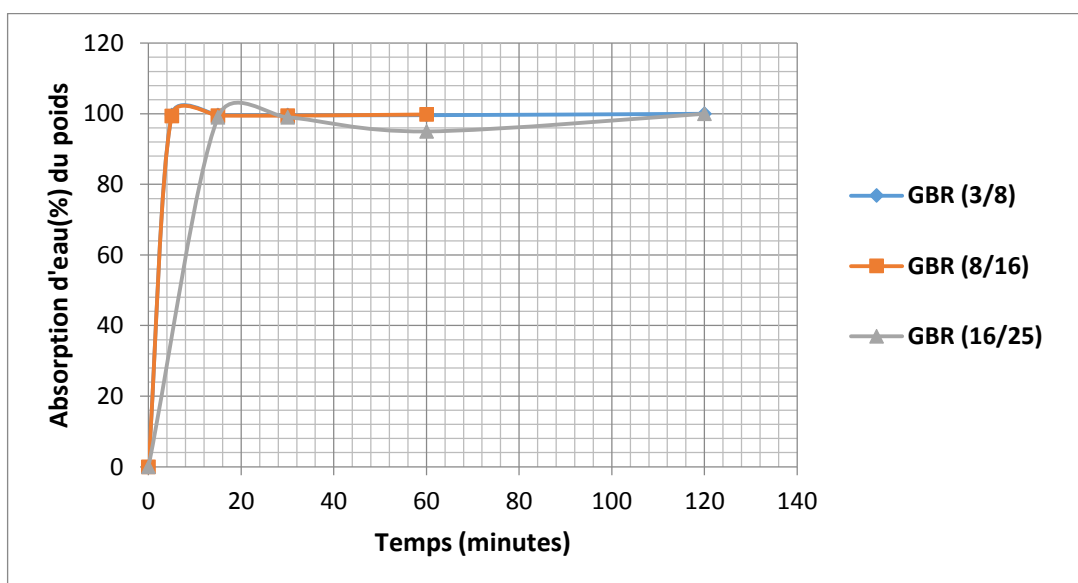


Figure. III. 9. Évolutions de l'absorption(%) par la méthode de pré-saturation durant la 24 heure des GBR.

III. 4. 2. 2. Malaxeur [EN 196-1] [260]

Figure. III. 10 illustre le malaxeur utilisé. Le malaxeur utilisé est un malaxeur de béton planétaire à axe rotatif vertical, avec une capacité de 50 litres. Le processus de malaxage des constituants s'effectue selon les étapes suivantes :

On introduit les composants dans le malaxeur de la manière suivante :

GBR pré-saturé ou GN, Liant (ciment), Sable, Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min, Ajouter l'eau pour le gâchage et continuer le mélange pendant 2 minutes.

Chaque fois, on mesure l'affaissement Figure III. 11 en utilisant le cône d'Abrams.



Figure. III. 10. Malaxeur planétaire à axe vertical.

III. 4. 2. 2. 3. Confection des éprouvettes

Deux types de moules sont utilisés pour fabriquer les éprouvettes des bétons :

1. Moules cylindriques en plastique ($\varnothing 160$ et 320 mm).
2. Moules cubique en acier ($100 \times 100 \times 100$ mm³).

- Les éprouvettes cubiques ($100 \times 100 \times 100$ mm³) sont utilisées pour mesurer respectivement la (R_c) du béton, et : l'absorption, la porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire.
- Les moules cylindriques ($\varnothing 16$ et 32 mm³) en matière plastique (PE) sont destinées à la mesure de la résistance en traction par fendage (R_t).

III. 5. PROCÉDURES EXPÉRIMENTAL

III. 5. 1. Essais à l'état frais

III. 5. 1. 1. Essais de cône d'Abrams [NF P 18 451]

Le béton est versé dans le moule en trois couches de hauteurs égales, chaque couche étant compactée à l'aide d'une tige de piquage actionnée 25 fois voir figure III.11 le démoulage s'effectue en soulevant le moule avec précaution et la mesure doit être prise sur le point le plus haut du béton, et ce dans la minute suivant le démoulage.



Figure. III. 11. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Les résultats des différents mélanges frais sont résumés au tableau III.11:

Tableau. III. 11. Caractéristiques rhéologique des BGN et BGR.

Mélange	Valeur en (cm)	Classe	Masse volumique (g/cm ³)
(BGN)	7	S2	2.47
(BGR)	8	S2	2.28

L'ouvrabilité des BGN est similaire à celle des bétons ordinaires en termes de plasticité, même sans substitution des GN. Cependant, une légère augmentation de la masse volumique à l'état frais est observée. En revanche, l'ouvrabilité du BGR est supérieure à celle du BGN, car le BGR utilise des GBR (pré-saturés) qui nécessitent moins d'absorption d'eau pendant le processus de mélange du béton à l'état frais. De plus, cette pré-saturation des GBR entraîne une augmentation de l'écoulement et de l'affaissement.

III. 5. 1. 2. la masse volumique a l'état frais [EN12390-7]

On observe que la masse volumique à l'état frais du BGN est plus élevée que celle du BGR, surpassée en moyenne de 8,30%.

La Figure III.12 (a, b) illustré la Préparation des échantillon.

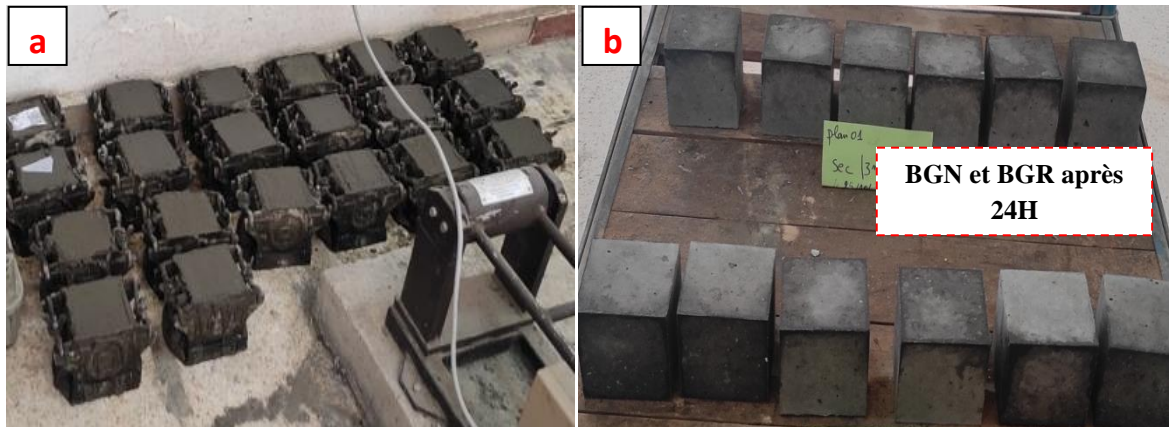


Figure. III. 12. Préparation des échantillons du (BGR et BGN).

III. 5. 1. 3. Mode de conservation des éprouvettes [EN 12390-2]

Les échantillons des deux mélanges de béton (BGN) et (BGR) sont conservés au laboratoire dans un endroit conditionné jusqu'au jour de l'essai. Après démoulage, les éprouvettes destinées aux essais de compression, traction par fendage et durabilité sont immergées dans l'eau à l'intérieur du laboratoire, à une température maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pendant 28 jours et 6 mois, Figure III.13



Figure. III. 13. Conservation des éprouvettes de béton.

III. 5. 2. Essais à l'état durci

Dans cette campagne d'expérimentation, des tests mécaniques ont été effectués à court terme (14 à 28 jours) et à long terme (180 jours), et des tests de durabilité générale ont été également menés à 545 jours.

III. 5. 2. 1. Les essais mécaniques

Incluent principalement la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage.

III. 5. 2. 1. 1. essais de Résistance à la compression EN 12390-3

Les résistances ont été mesurées à (14-28) jours selon la norme européenne [EN 206-1], La moyenne arithmétique des valeurs les plus proches a été retenue comme résistance à la compression figure III.14.

On met la presse en marche de nouveau avec la même vitesse (0.5 KN/s) jusqu'à la rupture, on décharge et on note la charge de rupture F et la résistance R_c . On calcule la résistance avec cette formule

$$:R_c = \frac{F}{S} \quad (\text{III. 8})$$



Figure. III. 14. Dispositif pour l'essai des résistances à la compression EN [12390-4].

III. 5. 2. 1. 2. Résistance à la traction par fendage [EN 12390-6]

L'essai consiste à écraser un cylindrique de béton suivant deux génératrice opposées entre les plateaux d'une presse : cet essai est souvent appelé « essai brésilien » (figure III.15), la charge de compression maximale produisant l'écrasement du cylindre par mise en traction du plan diamétral vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \quad (\text{III. 9})$$

Avec :

j = âge du béton (en jours) au moment l'essai :

D et L = diamètre et longueur du cylindre.



Figure. III. 15. Dispositif de l'essai de traction par fendage.

Les résistances mécaniques et la masse volumique des BGN et BGR obtenues sont regroupés dans le tableau III. 12 :

Tableau. III. 12. Caractéristiques mécanique et physiques des BGN et BGR.

	Résistance en compression (Mpa)	Résistance en traction par fendage (Mpa)	Masse volumique (g /cm ³)
BGN	33.37	3.51	2.45
BGR	24.80	2.49	2.27

La figure III.16 illustre l'expérience décrite met en lumière les différences significatives entre le (BGN) et (BGR) en termes de résistance à la traction par fendage et de comportement sous charge. L'appareil hydraulique utilisé est équipé de supports en V pour centrer précisément les éprouvettes, réduisant ainsi les concentrations de contraintes induites par les imperfections.

Il est crucial de noter que tout écart dans le centrage de l'éprouvette peut fausser les résultats de l'essai, rendant les données non exploitables. Après la rupture, la symétrie des parties fendues des éprouvettes doit être vérifiée pour assurer la validité des résultats obtenus.

Les résultats montrent une résistance à la traction par fendage plus faible pour le (BGR) par rapport au (BGN). Cette différence de performance est attribuée aux propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques distinctes des deux types de béton. Notamment, les ruptures observées révèlent différents types de dommages, comme la dégradation due au mortier attaché dans le (GBR), entraînant une porosité accrue et une diminution de la densité du béton. La microstructure du BGR présente une surface rugueuse en raison de l'impact du processus de démoulage et du concassage aléatoire des GBR, ce qui contribue à une faiblesse de la (ITZ) entre la pâte de ciment et les granulats. Cette faiblesse de l'ITZ diminue la cohésion et l'efficacité de l'interaction entre les composants, affectant ainsi négativement la résistance globale du matériau.

D'après ces résultats, nous constatons que la résistance à la traction par fendage dans cette expérience est assez faible par rapport à celle observée en compression. De plus, nous avons observé que le taux de valeur de traction par fendage pour le béton ordinaire BGN est supérieur à celui du BGR, estimé à 28,37% pendant 28 jours. Cette différence de rapport est due à plusieurs différences au niveau des propriétés physico-chimiques, mécaniques et rhéologiques entre les deux types de béton ordinaire et de béton recyclé. En examinant les sections de rupture des deux éprouvettes BGN et BGR, on observe différents types de dommages au niveau des faciès de rupture:

- Rupture des GBR : cette dégradation est due au mortier attaché des GR, ce qui conduit à une mauvaise classification du squelette granulaire et génère ainsi ce qu'on appelle la porosité. Il est bien connu que si le rapport de porosité augmente, le rapport d'absorption augmente aussi en proportion directe, entraînant une diminution de la densité du béton. Bien que les GBR distinguent une surface rugueuse due à l'impact du démoulage et du concassage aléatoire, cette situation est aussi une raison des événements pour faire la différence de propriétés physiques et mécaniques, et toutes ces caractéristiques conduisent à leur tour à une faiblesse de la résistance, comme indiqué sur les deux échantillons :

- Rupture de la pâte de ciment : à cause de l'augmentation de l'absorption des GBR, on le trouve en abondance dans la microstructure du BGR.
- Granulats déchaussés à l'interface entre la pâte de ciment et les GBR (notamment les plus gros) : cela est dû à la faiblesse de la (ZTI), autrement dit, au manque de cohésion et à l'absence d'action de réciprocité entre le mortier attaché et la grave origine, et on le trouve aussi au niveau de la surface du faciès du BGR.

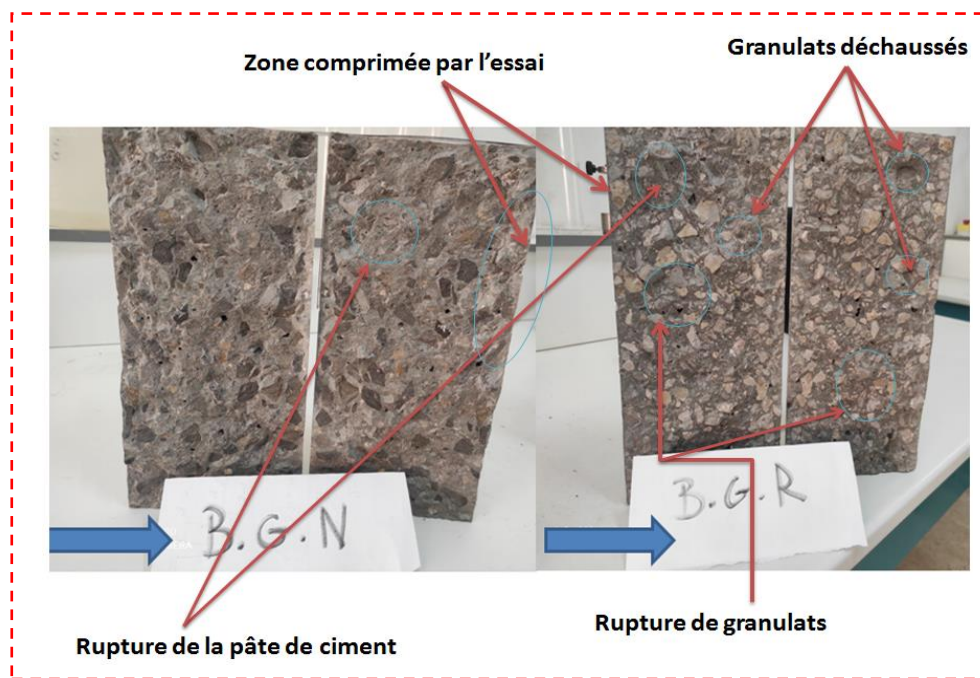


Figure. III. 16. Faciès des ruptures. Et Apparence des bétons de GBR et GN à l'état durci lors de l'essai de fendage.

III. 5. 2. 2. La Masse volumique a l'état durci [EN12363]

D'après le tableau III.12 , on observe que la masse volumique a l'état durci du (BGN) est plus grande que celle du (BGR) , elle le dépasse d'un pourcentage estimé à 7,35% après 28 j de durcissement , parce que le BGR se caractérise par un grand nombre de vides au niveau du squelette granulaire du fait qu'il contient des GBR plus légers qui se caractérisent par une masse volumique très faible et une forte porosité à cause de mortier attaché qui, à son tour, génère plusieurs pores capillaires dans la matrice du béton à base de GBR. En outre, la position et la forme angulaire du GBR sont deux facteurs critiques qui affectent considérablement la création d'un vide réciproque entre GBR.

III. 6. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES DES INDUCTEUR DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX

III. 6. 1. Absorption capillaire

Description de la Mode opératoire :

Selon la (procédure AFREM [AFPC 97]), L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (100x100x100 mm³), il consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par les éprouvettes de bétons :

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante

$$C_a = \frac{M_x - M_0}{A} \quad (\text{III. 9})$$

Où

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée en (kg).

M_0 : masse initiale de l'éprouvette en (kg).

A : section de l'éprouvette en (m²).

Suivre l'évolution de la masse des éprouvettes plongées à une profondeur de 3 mm dans de l'eau. La variation de masse entre deux pesées espacées de 24 heures doit être inférieure à un certain seuil. Chaque éprouvette est ensuite extraite de l'étuve, puis conservée pendant 12 heures à une température de 20 ± 2 °C.

La masse absorbée durant l'essai est mesurée, puis l'éprouvette est conservée environ 12 heures dans un dessiccateur à 20 °C. Les temps de mesure sont les suivants : ¼, ½, 1, 2, 4, 8 et 24 heures. La figure III.17 illustre le déroulement de l'expérience

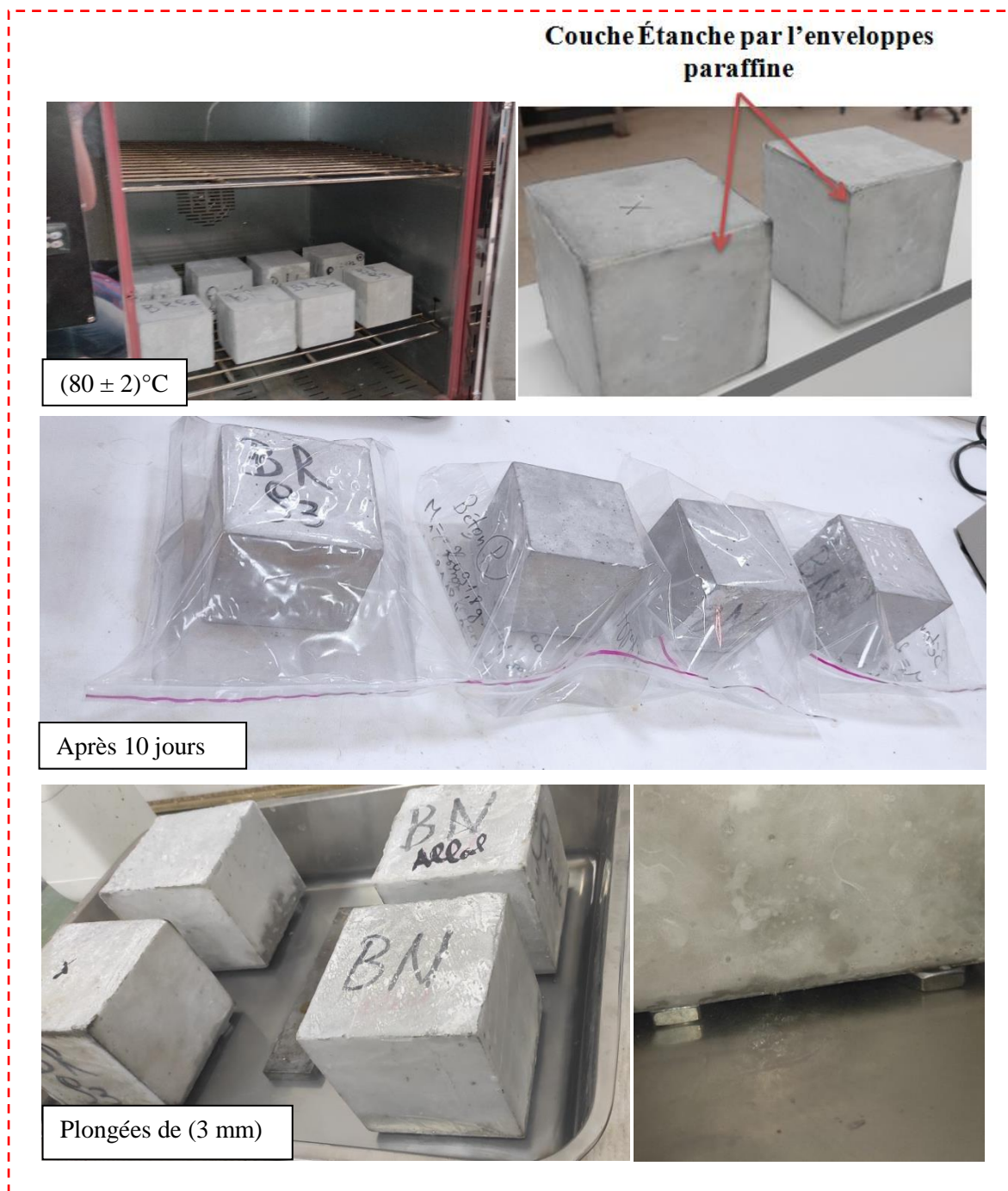


Figure. III. 17. Dispositif de détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Les résultats présentés dans Tableau. III. 13 sont la moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes pour chaque composition.

Tableau. III. 13. Coefficient d'absorption C_u à l'échéance (t) dans la différence mélanges après (28 j) en kg/m^2 .

Temps(Heur)	1/4	1/2	1	2	4	8	24
BN	3,130	3,325	3,560	3,935	4,400	5,005	6,340
BGR	4,710	5,095	5,640	6,500	7,500	8,810	11,575

III. 6. 2. porosité accessibles à l'eau [ASTM C09]

Cette méthode d'essai couvre les déterminations de densité, pourcentage d'absorption et pourcentage de vides dans le béton durci. Elle est utile pour développer les données nécessaires aux conversions entre masse et volume pour le béton. Les éprouvettes utilisées sont prismatiques ($100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$), les étapes de l'essai sont résumées en :

-Masse sèche au four : Déterminer la masse des portions et sécher dans une étuve à une température de 100 à 110 °C pendant au moins 24h. Après avoir retiré chaque échantillon du four, laissez-le refroidir à l'air sec (de préférence dans un dessiccateur) jusqu'à température de 20 à 25 °C et déterminer la masse, répéter la procédure jusqu'à ce que la différence entre deux valeurs successives soit inférieure à 0,5 % de la valeur la plus basse obtenue. Désignons cette dernière valeur A. La figure III.18 illustre cette étape.



Figure. III. 18. Conservation des éprouvettes dans l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation du poids.

-Masse saturée après immersion : Immerger l'échantillon, après séchage final, et détermination de la masse, dans de l'eau à environ 21 °C pendant au moins 48 h et jusqu'à ce que deux valeurs successives de masse de l'échantillon séché en surface à intervalles de 24 h montrent une augmentation de masse inférieure à 0,5 % de la plus grande valeur.

Séchez l'échantillon en surface en éliminant l'humidité de surface avec une serviette et déterminez la masse. Cette masse est désignée B. la figure III.19 illustre la conservation des éprouvettes.



Figure. III. 19. Conservation de l'éprouvette dans l'eau 48 h.

-Masse saturée après ébullition : Placer l'échantillon, traité comme en décrit, dans un récipient approprié, recouvert d'eau du robinet, et faire bouillir pendant 5 h, figure III.20 (a). Laisser refroidir par perte naturelle de chaleur pendant au moins 14 h jusqu'à une température finale de 20 à 25 °C. Enlevez l'humidité de surface avec une serviette et déterminez la masse du spécimen. Désigner la masse trempée, bouillie et séchée en surface C.

Masse apparente immergée : Suspender l'échantillon, après immersion et ébullition, par un fil et déterminer la masse apparente dans l'eau. Désignons cette masse apparente D comme figure III.20 (b)



Figure. III. 20. Appareil d'ébullition des éprouvette (a), Dispositif de la Pesée hydrostatique(b).

Grâce à cette méthode expérimentale, nous pouvons mesurer Porosité, l'absorption après immersion ainsi que la densité apparente :

$$1. \text{ Porosité accessible à l'eau (Volume d'espace poreux perméable } P\% = \frac{C-A}{C-D} \quad (\text{III. 10})$$

$$2. \text{ Absorption Après immersion : } A\% = \frac{B-A}{A} \quad (\text{III. 11})$$

$$3. \text{ Densité apparent : } P = \frac{A}{A-D} \quad (\text{III. 12})$$

Avec noté :

(A) : masse d'échantillon séché au four dans l'air, (g)

(B) : masse d'échantillon sec en surface dans l'air après immersion, (g)

(C) : masse d'échantillon sec en surface dans l'air après immersion et ébullition, (g)

(D) : masse apparente de l'échantillon dans l'eau après immersion et ébullition, (g)

Les résultats présentés dans ce tableau III.15 sont les moyennes des mesures effectuées sur trois éprouvettes pour chaque composition.

Tableau. III. 14. Le résultat est la moyenne de la mesure sur trois éprouvettes, pour chaque composition. Son récapitulés.

Mélange	(Volume d'espace poreux perméable « vides ») (%)	Absorption après immersion (%)	Densité apparent	P appasech
BGN	10,16	4,31	2,57	2,31
BGR	15,43	7,1	2,48	2,10

III. 6. 3. Les indicateurs de durabilité spécifiques aux attaques chimiques

- 5.1 attaque sulfate selon ASTM C 1012-89 [24].
- 5.2 et acide attaque selon ASTM C 267-97, [25].
- 5.3 résistance à la compression après l'attaque chimique [EN].
- 5.4. Tenure portlandite ATG.
- 5.5. valeur de PH avant et après l'attaque chimique.
- 5.6. confirmation de l'homogénéité des contacts ITZ réalisée par l'analyse SEM-EDS.

III. 7. CONCLUSION

Les essais réalisés ont permis de dresser un tableau précis des propriétés des (GBR) et des (GN), ainsi que des bétons correspondants (BGR et BGN). Il ressort clairement que les BGR présentent des caractéristiques inférieures à celles des BGN à 28 jours. En effet, les GBR se distinguent par une densité plus faible et un coefficient d'absorption d'eau plus élevé par rapport aux GN, accompagnés d'une forte porosité. Cette différence est attribuée au mortier adhérent aux GBR.

Au niveau macroscopique, il a été observé que les GBR, ayant subi un processus de concassage, présentent une proportion plus élevée de (ITZ). Cette particularité impacte directement les propriétés des bétons, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Par conséquent, les propriétés mécaniques des BGR, telles que la résistance à la compression et à la traction, sont significativement réduites. Cette diminution est due à la présence accrue d'ITZ, aux microfissures, ainsi qu'à une porosité importante

En conclusion, les caractéristiques faibles des BGR sont essentiellement attribuées aux propriétés intrinsèques des GBR, notamment à la présence d'ancien mortier attaché autour des GN, Ce qui engendre une proportion accrue des (ITZ). Pour pallier ces insuffisances, il est impératif de mener une caractérisation plus précise des phases présentes dans la microstructure des GBR, afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradation des propriétés mécaniques. Dans cette optique, les 2 prochains chapitres se concentreront sur les solutions possibles pour améliorer les propriétés des GBR et concevoir un nouveau béton (BGRT).

Chapitre IV

**TRAITEMENT DES GBR PAR REVÊTEMENT CIMENTAIRE
ET CARACTÉRISATION DES GBRT ET DES BGRT
(MODÉLISATION PAR LE LOGICIEL JMP)**

IV. 1. INTRODUCTION

Ce chapitre explore une méthode innovante visant à améliorer les GBR en les revêtant d'une fine couche de ciment. Ce traitement est effectué de manière préalable et séparée du mélange de béton.

IV. 2. ÉLABORATION DU COULIS D'ENCAPSULATION

La méthode choisie pour le traitement des GBR consiste en l'élaboration d'un coulis de ciment avec un rapport E/C = 0.50 (REF) [74]. Et d'embrober les GBR par immersion dans ce coulis, Seulement La fraction 16/25 sera traitée, Il est important de noter que les grandes fractions jouent un rôle essentiel dans le squelette granulaire, qui est constamment soumis à diverses contraintes. De plus, le traitement des granulats de petite fraction est un processus long en laboratoire et généralement difficile à appliquer sur le terrain.

Différents facteurs sont pris en considération afin d'aboutir à un traitement optimal, ce qui se reflète positivement sur les propriétés du béton.

Ces facteurs sont : états des granulats "GR", la durée d'immersion "DT" et le temps de durcissement "A")

Pour examiner l'effet de ces facteurs, leur interactions et conclure le traitement optimal, on a recours aux plans d'expériences et en particulier le plan factoriel complet qui le plus adapté dans le cas des facteurs indépendants.

IV. 3. GÉNÉRALITÉS SUR LES PLANS D'EXPÉRIENCES (PLAN FACTORIEL COMPLET)

IV. 3. 1. PLANS FACTORIELS COMPLETS A DEUX NIVEAUX

Ces plans comportent un maximum de deux niveaux par facteur. Durant l'expérimentation, toutes les combinaisons de niveaux sont réalisées. Ces schémas peuvent être appliqués sans distinction tant aux variables continues qu'aux variables discrètes.

Toutefois, il est possible d'accroître le nombre de facteurs. L'espace d'expérimentation comporte autant de dimensions qu'il y a de facteurs, et l'équation mathématique qui lui correspond est la suivante (IV. 1).

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k .

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

Il faut également noter que cette notation précise le nombre de tentatives à effectuer.

L'usage des unités codées présente une généralité supérieure à celui des unités physiques couramment utilisées. C'est l'approche la plus fréquemment employée et c'est celle que nous appliquerons par la suite.

Tableau. IV. 1. La configuration de la matrice de codage.

N° Essai	Facteur1 (X1)	Facteur 2 (X2)	Facteur 3 (X3)
(1)	-1	-1	-1
(2)	+1	-1	-1
(3)	-1	+1	-1
(4)	+1	+1	-1
(5)	-1	-1	+1
(6)	+1	-1	+1
(7)	-1	+1	+1
(8)	+1	+1	+1

IV. 3. 2. Notion de modélisation mathématique

On sélectionne initialement une fonction mathématique qui établit un lien entre la réponse et les facteurs. Nous utilisons une série de Taylor-Mac Laurine pour effectuer un développement limité. On considère que les dérivées sont constantes et l'expression se présente sous la forme d'un polynôme de degré variable : (IV. 1).

$$Y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \dots + \sum a_{ii} X_i^2 + a_{ij..z} X_i X_j \dots X_z \dots \dots \text{(IV. 1)}.$$

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- X_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} Il s'agit des coefficients du modèle mathématique préalablement choisi, On ne les connaît pas encore et il faut les déterminer à partir des résultats d'expériences.

IV. 4. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Le programme expérimental pour la conception de l'encapsulation a été divisé en trois étapes, pour obtenir une encapsulation améliorée pour la fraction de 16 à 25 mm.

IV. 4. 1. Optimisation du traitement des GBR par PFC

La technique retenue pour le traitement des GBR (fraction 16/25) est l'encapsulation dans un coulis de ciment, avec un (E/C=0,5) [74] Afin d'étudier l'influence des paramètres des GBR (état du GBR sec ou saturé , durée d'immersion dans le coulis de ciment, durée de durcissement du GBRT) sur l'efficacité du traitement un plan factoriel complet 2³ est utilisé . Une présentation graphique de la méthode utilisée est illustrée à la figure. IV. 1. En outre, la matrice de l'expérience est présentée dans le Tableaux IV.2. Et le processus d'encapsulation est décrit dans la figure. IV.2.



Figure. IV. 1. Étapes du dispositif expérimental choisi.

Tableau. IV. 2. Matrice d'expérience.

Numéro de mélange	Facteur 1 (GR)	Facteur 2 (DT)	Facteur 3(A)
	État de la GBR	Temps de trempage (min)	temps de durcissement (J)
1	sec	3	3
2	pré-saturation	3	3
3	sec	10	3
4	pré-saturation	10	3
5	sec	3	15
6	pré-saturation	3	15
7	sec	10	15
8	pré-saturation	10	15

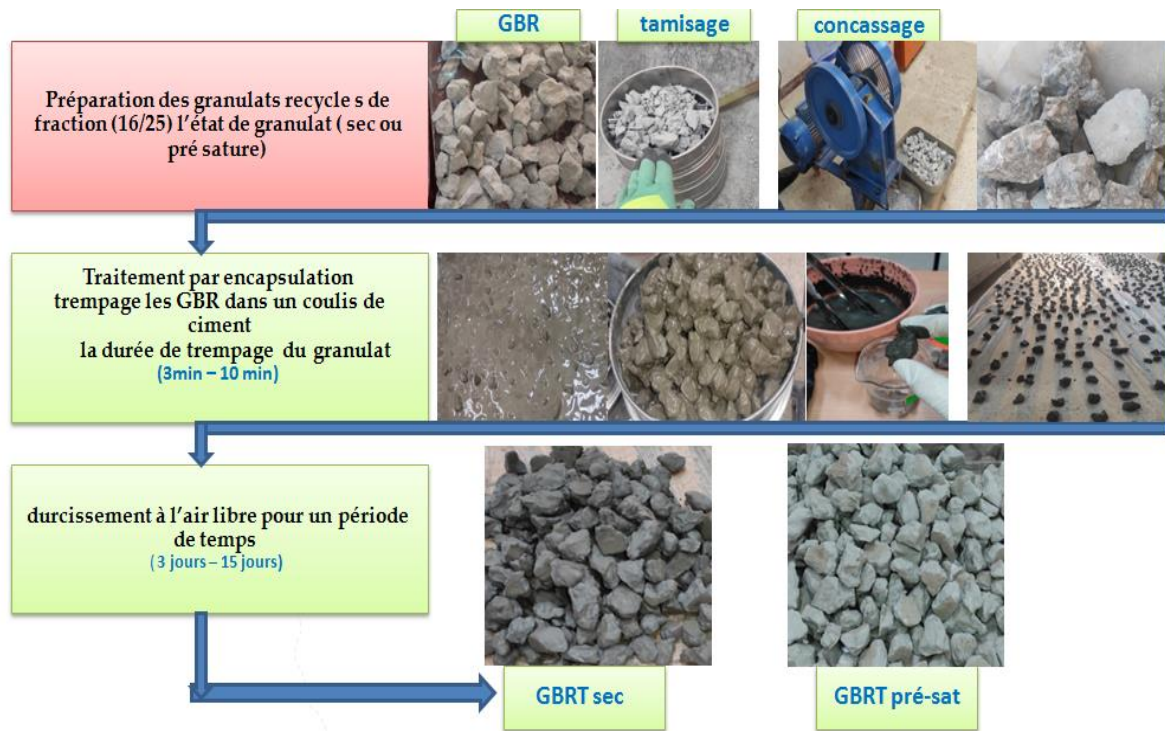


Figure. IV. 2. Schéma représentatif du processus d'élaboration et d'encapsulation des GBR.

IV. 4. 2. Réponses choisies

Pour évaluer l'effet du traitement adopté, deux caractéristiques essentielles du béton sont considérées comme réponses : l'une est la résistance à la compression et l'autre est la porosité accessible à l'eau.

IV. 5. CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS GBR ET GBRT

IV. 5. 1. Caractéristiques préliminaires

Suivant le plan factoriel, 8 types de GBRT sont obtenus en fonction des différents niveaux de facteurs choisis ($GBRT_{i=1, \dots, 8}$) ; Plusieurs techniques ont été utilisées pour les caractériser. Dans un premier temps, un certain nombre d'essais a été réalisé dans le but d'évaluer la masse volumique, la capacité d'absorption d'eau, la porosité et la compacité des granulats, selon la norme NF EN 1097-6., tandis que leur basicité a été déterminée par mesure de leur pH. Les caractéristiques des GN et GBR sont évaluées aussi afin de bien situer les différents types des $GBRT_i$. Le tableau. IV. 3, regroupe les différentes propriétés des granulats.

Tableau. IV. 3. Propriétés physiques des granulats traités GBRTi, GBR, et GN.

GBRTi utilisé	GBRT1	GBRT2	GBRT3	GBRT4	GBRT5	GBRT6	GBRT7	GBRT8	GBR	GN
Densité absolue (g/cm ³)	2,50	2,603	2,542	2,608	2,521	2,625	2,522	2,602	2,543	2,593
Densité apparente Kg/m ³	1214	1216	1228	1275	1235	1206	1251	1230	1210	1372
Absorption (%)										
Valeur de pH	9,45	6,44	9,50	7,03	9,60	6,55	9,72	7,01	5,9	1,10
	-	-	-	-	-	-	13,5	13	12	10

Les données des tableaux IV.3 permettent d'observer que le processus de traitement entraîne une augmentation de la masse des GBR traités par rapport aux granulats non traités. Il a également été noté que la densité absolue des GBR pré-saturés est supérieure à celle des GBR secs, ce qui indique que l'eau contenue dans ces granulats est la cause de cette augmentation de densité. En outre, la densité des GBRT secs était inférieure à celle des granulats non traités. La même remarque a été rapportée dans le travail de Güneyisi et al. [181] qui ont traité les GBR avec une boue de ciment et de fumée de silice. Il convient de noter que la masse des GBRT immergés dans le coulis de ciment pendant 10 minutes est supérieure à celle des GBRT immergés pendant 3 minutes. Ce comportement peut être attribué à la couche de ciment qui couvre le granulat, car pendant les 3 premières minutes, la viscosité du coulis est élevée, ce qui permet aux particules de pénétrer dans les pores du mortier des GBR et de former ainsi une fine couche qui s'épaissit au fur et à mesure que le temps d'immersion des GBRT (secs ou pré-saturés) augmente. De plus, l'absorption des GBR pré-saturés est inférieure à celle des GBR secs. La couche adhérente de ciment devient poreuse en raison du départ de l'eau, ce qui contribue à l'augmentation de l'absorption. Cela nous permet de conclure que la période de durcissement (15 jours) a une influence significative sur l'absorption.

IV. 6. FORMULATION DE BÉTONS À BASE DE GBRT

Les formulations pour le (BGN), et (BGR), ont été élaborées selon la méthode [Dreux gorisse] ; dont la composition est illustrée aux tableaux IV.4.

Seuls les granulats de fraction (16/25) ont été encapsulées; les fractions (3/8) et (8/16) ont été laissées sans encapsulation et ont donc été utilisées à l'état pré-saturé. Les GBR traités ont été laissés à l'air pour durcir figure. IV.3

Chapitre IV: Traitement des GBR par revêtement cimentaire et caractérisation des GBRT et des BGRT (Modélisation par le logiciel jmp)

Tableau. IV. 4. Composition de (BGN) et (BGR).

constituent	Fraction et taille des agrégats (mm)					
	ciment	eau	Sable	3/8	8/16	16/25
Quantité (kg/m ³)	350	197	550	142	420	637

Après préparation des GBRT, une série de bétons incorporant ces granulats a été réalisée (BGRT1...BGRT8), conformément à la matrice d'expérience présentée dans le tableau IV.2. En adoptant la même composition présentée dans le tableau. IV.4 [241].

Des moules cubiques de dimensions (100 x 100 x 100) mm³, conformes à la norme [EN 206-1], ont été utilisés. Ensuite, 24 heures après le coulage, les échantillons ont été conservés dans un environnement humide pendant 28 jours Figure. IV.3, après quoi les tests d'absorption d'eau, de porosité et absorption par immersions selon la norme [ASTM] C462-06, et de résistance à la compression selon la norme [EN 12390-3] ont été réalisés.



Figure. IV. 3. Protocole pour l'élaboration et la confection des BGRTi.

IV. 7. RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV. 7. 1. L'affaissement

Les résultats des différents mélanges de béton avec granulats recyclés traités (BGRT) frais sont exprimés dans le tableau. IV.5.

Tableau. IV. 5. Présenté la valeur d'affaissement au cône d'Abrams des mélange BGRTi.

Mélange (BGRTi)	BGRT1	BGRT2	BGRT3	BGRT4	BGRT5	BGRT6	BGRT7	BGRT8	BGR	BGN
Classe	A _r =5 pour tout BGRTi (S1)								S2	

L'ouvrabilité des (BGN), selon la formulation de béton ordinaire, est sensiblement inchangée. En revanche, l'ouvrabilité des (BGR) est supérieure à celle des (BGN). Cela s'explique par le fait que le (BGR) contient des granulats pré-saturés, nécessitant une quantité moindre d'absorption pendant le mélange du béton à l'état frais. De plus, la réduction des pores dans les GBR améliore l'écoulement et augmente l'affaissement. Pour les bétons à base des GBRT la maniabilité est très faible et l'écoulement est lent, ce qui conduit à la formation d'un béton frais ferme. Ainsi, l'affaissement a été estimé à moins de 5 cm pour le (BGRTsec) et autour de 5 cm pour le (BGRT pré-sat). Les résultats montrent que la maniabilité des bétons diminue avec l'augmentation de l'enveloppe d'encapsulation (GBR-sec). Les différents types de GBR traités (GBRTi) ont conduit à la formation d'un béton frais très ferme, principalement en raison de la grande absorption des granulats après traitement, qu'il s'agisse du (BGRT pré-sat) ou du (BGRTsec). De plus, les huit mélanges expérimentés (BGRT1-8) ne contenaient aucun adjuvant, et la forte absorption des (GBR+ épaisseurs d'encapsulation) a été identifiée comme les deux principales causes de la faible maniabilité [45], [261], [262].

IV. 7. 2. Masse Volumique à l'État Frais [EN12390-7]

Les résultats concernant la masse volumique apparente du béton frais sont illustrés à la figure. IV.4. Celle-ci montre que les (BGR) présentent les masses volumiques apparentes les plus faibles. Cette observation est directement liée au fait que ces bétons renfermant 100 % de GBR dans leur composition. En revanche, les (BGN) affichent des masses volumiques apparentes plus élevées en raison de la densité intrinsèque plus élevée des GN. Comme attendu, les (BGN) ont une masse volumique apparente supérieure à celle des bétons avec (BGR), avec une différence de +7,49 %. Il est courant d'observer dans ce type de plan expérimental que la masse volumique à l'état frais est généralement plus élevée qu'à l'état solide. Cette différence n'est

pas due aux variations entre les mélanges, mais résulte plutôt de la perte d'eau pendant le durcissement du béton, liée aux caractéristiques des (GBR) telles que la densité et la porosité, ainsi qu'à leur compatibilité. En effet, des GBR de faible densité conduisent à une diminution de la densité du BGR.

Le (GBRT) a significativement affecté leur capacité d'absorption d'eau. Cet impact dépend du mode de traitement ("GR" "DT" et A) et des caractéristiques des GBR utilisés dans les différents mélanges. La masse volumique du BGR est observée comme étant plus faible par rapport à celle des GN. Mais Après encapsulation à l'état frais saturé, une légère amélioration a été notée, avec des augmentations de 2,27 % pour BGRT2 et de 2,93 % pour BGRT8 par rapport au BGR. Enfin, un temps de durcissement de 15 jours, associé à une immersion de 3 jours, a conduit à une légère amélioration de la masse volumique du béton avec GBR, atteignant jusqu'à 0,56 % dans le cas de BGRT6 [77].

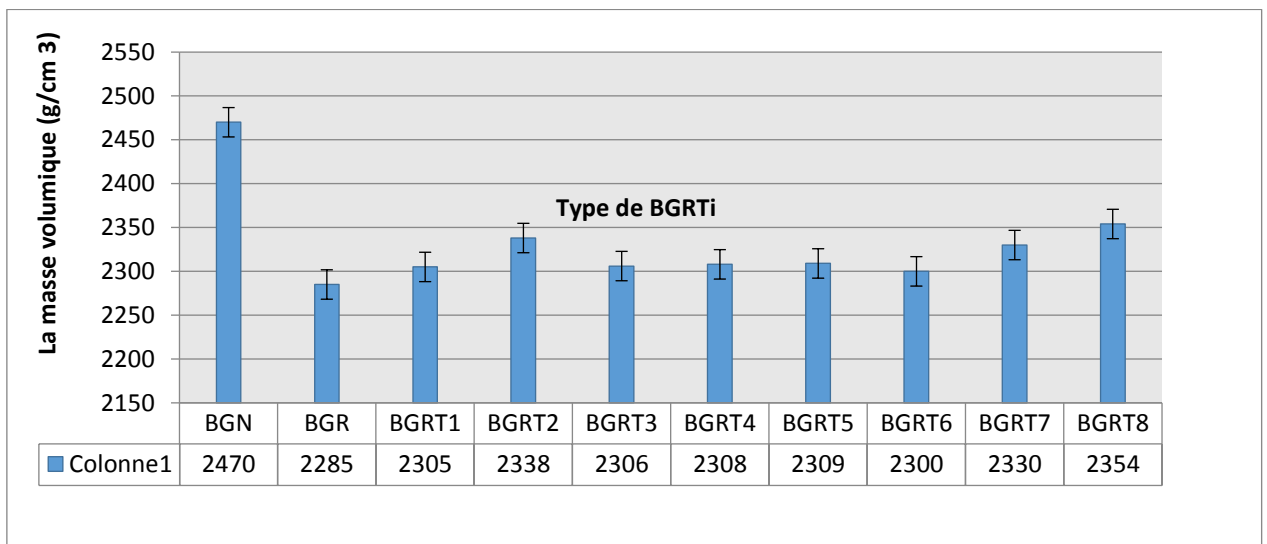


Figure. IV. 4. La masse volumique à l'états frais de différents Mélange(BGN),(BGR) et (BGRTi).

IV. 7. 3. La résistance à la compression des BGRTi.

La figure. IV. 5 montres la résistance à la compression à 28 jours de durcissement en milieu humide des différents bétons élaborés. On observe clairement que la résistance s'est améliorée de manière significative par rapport à celles du BGN ou du BGR. En effet, le taux d'amélioration a été trouvé entre 20,5% et 21,04% par rapport à celui du BGN et entre 41,55% et 41,94% par rapport à celui du BGR [263]. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres auteurs [36], [43], [96], [250], [264]–[269].

Les résultats du modèle statistique ont montré que la réponse (résistance) est significative, avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,99$).

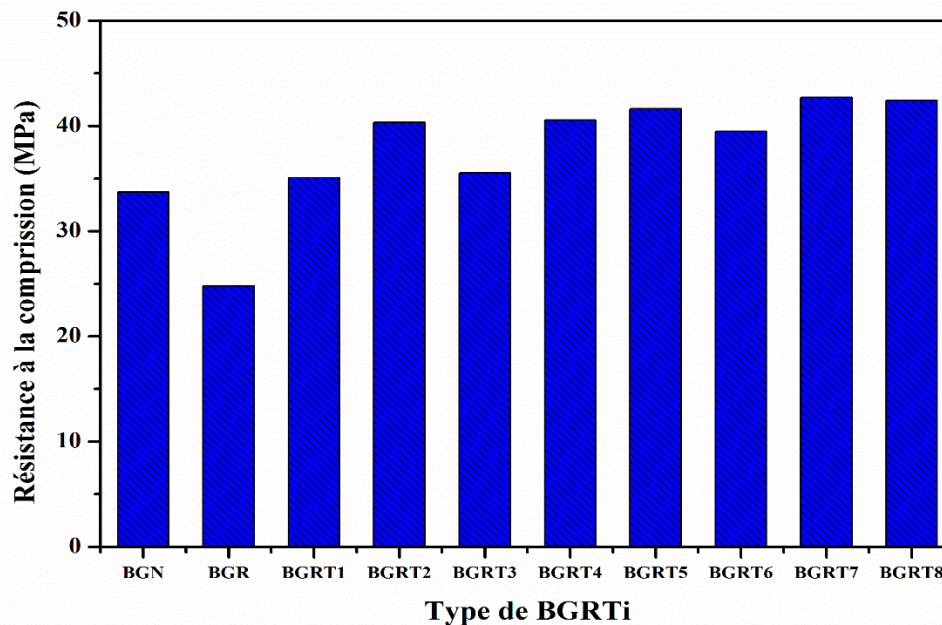


Figure. IV. 5. Effet du GBRTi sur la résistance à la compression des bétons étudiés.

IV. 7. 3. 1. Principaux facteurs

Les résultats obtenus montrent clairement que le temps de durcissement (A) semble être le principal facteur qui affecte la résistance à la compression, suivi de l'état GBR et, enfin, du temps de trempage DT dont l'impact n'est pas significatif. Il est à noter que l'interaction la plus forte a été observée entre le temps de durcissement et l'état des agrégats ; les autres interactions ((A).DT et GR.DT) sont moins importantes, ce qui est clairement illustré dans la figure. IV.8: (a). de plus, il a été constaté que l'augmentation du temps de durcissement a un effet positif sur l'amélioration de la résistance. En effet, il a été révélé qu'entre le 3^{ème} jour et le 15^{ème} jour, la compression a augmenté de 4 MPa ($39 + 2 * 1,845$)%. De plus, il a été révélé qu'un temps de durcissement plus long permet la poursuite des réactions d'hydratation, et conduit par conséquent à la création de nouveaux produits hydratés qui viennent renforcer la structure du (GBRT). Il est à noter que l'état pré-saturé du GBR est favorable à l'amélioration de la résistance qui augmente de 2 MPa ($39 + 2 * 0,997$)%, lors du passage de l'état sec à l'état présaturé. Cependant, le temps de trempage du GBR dans le coulis de ciment a une légère influence sur l'évolution de la résistance à la compression ($39 + 2 * 0,558$)%. La figure. IV. 6 montre clairement l'influence de ces paramètres sur la résistance à la compression du béton.

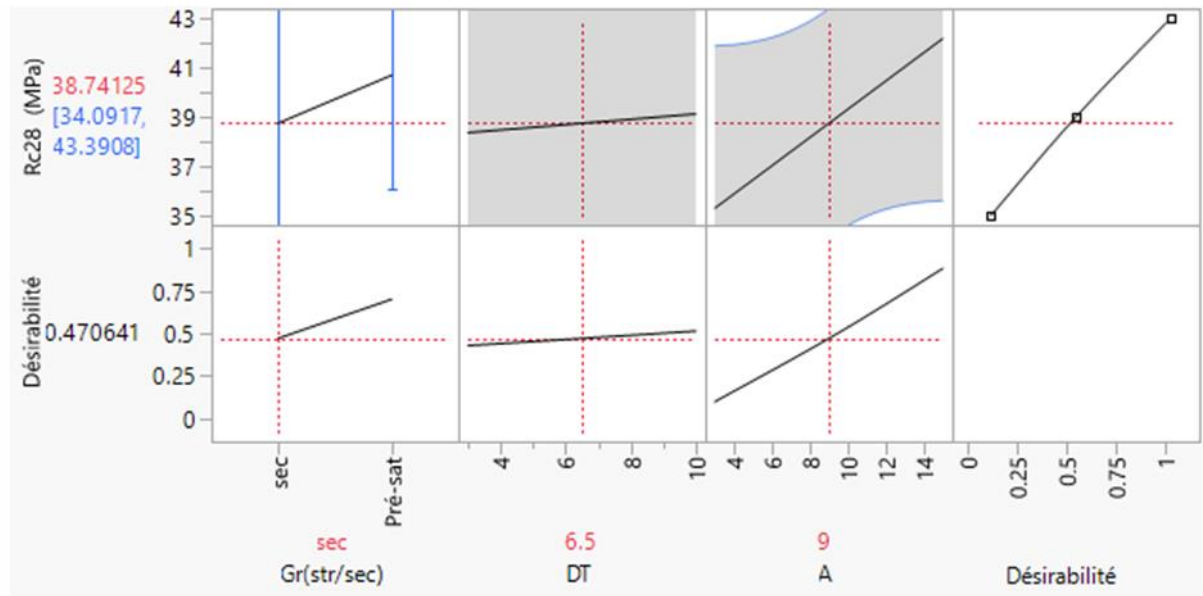


Figure. IV. 6. Graphique de l'effet principal pour différents BGRTi.

Les résultats indiquent que, pour une courte période de durcissement de trois jours, il est préconisé d'utiliser des GBRT à l'état présaturé, tandis que pour une période de 15 jours, l'état sec des GBRT contribue efficacement à l'amélioration de la résistance, ce qui justifie l'interaction significative entre la période de durcissement (A) et l'état des agrégats (GR).

La figure. IV. 7 (a) montre les courbes de réponse qui montrent toutes les combinaisons possibles de l'interaction ((A)/GR) pouvant générer soit une résistance maximale, soit une résistance minimale. En effet, pour obtenir des valeurs de résistance élevées, il est nécessaire d'adapter l'état des agrégats au temps de durcissement. Cela signifie que des résistances à la compression élevées peuvent être obtenues en utilisant des GBRT secs avec un temps de durcissement long.

L'amélioration de la résistance à la compression des bétons contenant des GBRT est attribuée aux agrégats traités eux-mêmes. En effet, le coulis de ciment fluide pénètre dans les pores du mortier adhésif jusqu'au (GN) sous l'effet de la gravité ; la surface rugueuse des GBRT améliore l'adhérence du coulis. Dès que le ciment et l'eau sont mélangés, les composants les plus solubles se dissolvent très rapidement dans l'eau, et la phase aqueuse ainsi obtenue est pratiquement saturée en ions Ca^{++} , Na^+ , K^+ , SO_4^- , OH^- . De plus, les silicates se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des hydrates de silicate de calcium (C-S-H) et de la portlandite (Ca OH_2). Il est à noter que les (C-S-H) sont des composés non cristallins qui ont les caractéristiques d'un gel. L'enchevêtrement des (C-S-H) améliore la résistance à la compression du ciment car ils se développent sur les grains de surface du ciment non hydraté.

Ensuite, ces (C-S-H) remplissent progressivement les interstices capillaires entre les grains en adhérant au GBR.

Cette adhérence est influencée par plusieurs facteurs tels que l'état de surface du GBR, sa composition minéralogique et son absorption. Une fois les GBRTi retirés du coulis de ciment, la couche d'hydrates qui recouvre les grains de ciment devient assez épaisse et ralentit la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. Il convient de souligner que l'excès d'eau contenu dans le coulis va s'évaporer progressivement par séchage naturel. Par la suite, le processus d'hydratation commence à ralentir, mais peut se poursuivre pendant le durcissement du GBRT, entre le 3ème et le 15ème jour (voir section microstructure). Un grand nombre de chercheurs ont confirmé l'amélioration de la résistance à la compression des GBR traités. En effet, [266] ont utilisé la méthode de traitement par pré-pulvérisation de nano-silice pour le traitement des GBR. Ainsi, une teneur optimale de 4% de nano-silice a donné une valeur de résistance de 42 MPa qui est comparable à celle obtenue dans cette étude. Concernant et al [43].

Il a indiqué que le traitement du GBR avec de la boue de fumée de silice est une solution efficace et pratique pour améliorer l'ITZ de cet agrégat, et ainsi produire une microstructure plus dense. L'amélioration de la résistance à la compression du BGRTi a également été attribuée à la baisse du rapport (E/C) en raison du fait qu'une fois que le GBRT était incorporé au béton, il absorbait l'eau de gâchage et n'avait donc pas assez d'eau libre pour s'évaporer.

IV. 7. 4. Porosité accessible à l'eau (BGR)

La figure. IV.7 illustre la porosité accessible à l'eau de différents bétons. Elle montre que la porosité du (BGN) est plus petite d'environ 39,01 % que celle du BGR, elle est également inférieure à celle du RACTi. En effet, les porosités du BGRT1 et du BGRT3, qui sont les valeurs les plus faibles, restent supérieures de 32,66 % et 33,69 % à celle du BGN, respectivement. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres auteurs [33], [81], [267], [270]. La diminution de la porosité dans les BGRT (à l'état sec) est attribuée à la couche de ciment adhérant au GBR sec. Cette couche est moins poreuse que celle autour du (GBRT pré-saturé). Lorsque le durcissement se poursuit jusqu'à 15 jours, la porosité des deux granulats augmente encore en raison de la perte d'eau. Les résultats obtenus à partir du modèle statistique indiquent que la réponse (porosité) est assez significative, avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,98$).

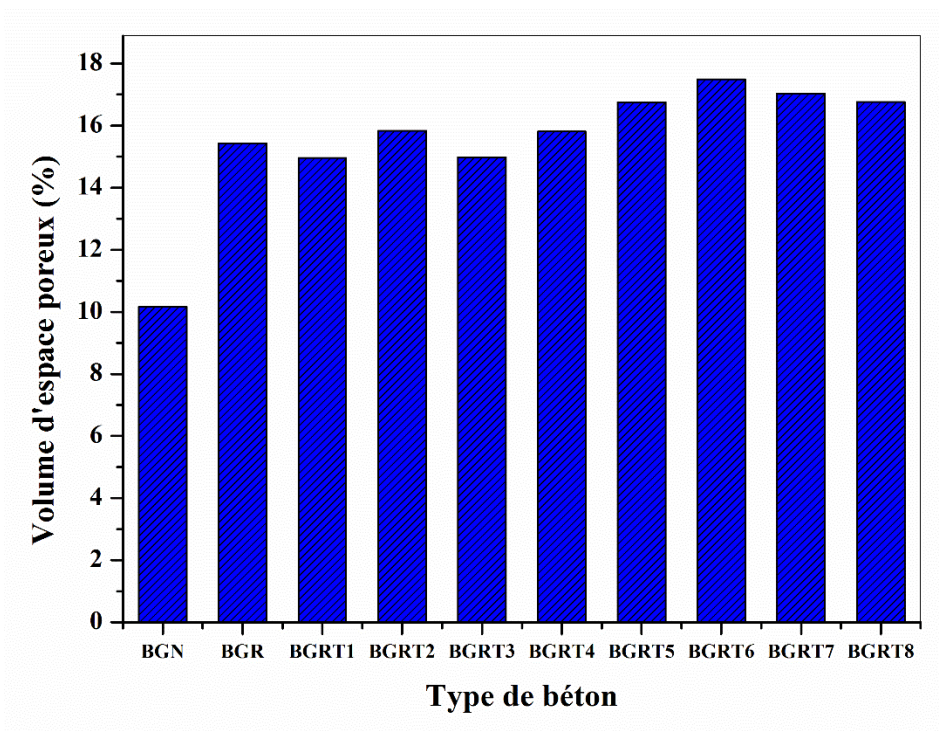


Figure. IV. 7. Effet du GBRTi sur la porosité accessible à l'eau des bétons étudiés.

IV. 7. 4. 1. Principaux facteurs

Les résultats du logiciel d'analyse de données (JMP) suggèrent que ((A)/GR) et (DT) sont les facteurs qui influent le plus sur la porosité, tandis que le temps de durcissement a plus d'influence sur la porosité que sur la résistance à la compression, comme le montre clairement la figure. IV.9 (b), tandis que le temps de durcissement (A) a plus d'influence sur la porosité que sur la résistance à la compression, comme le montre clairement la figure. IV.9 (a) et (b). De plus, l'état du granulat (sec – pré-saturé) exerce la même influence, tandis que l'interaction ((A)/GR) a plus d'influence sur la résistance que sur la porosité. Il a également été constaté que la porosité augmente de $(16,20 + 2*0,8075) \%$, entre le 3ème et le 15ème jour de durcissement. Elle augmente également de $(16,20 + 2*0,27) \%$, en passant d'un GBR sec à un GBR pré-saturé. La porosité reste inchangée lorsque les bétons sont trempés dans la boue entre 3 et 10 minutes. La figure. IV.8 illustre clairement l'influence de ces paramètres sur la porosité du béton.

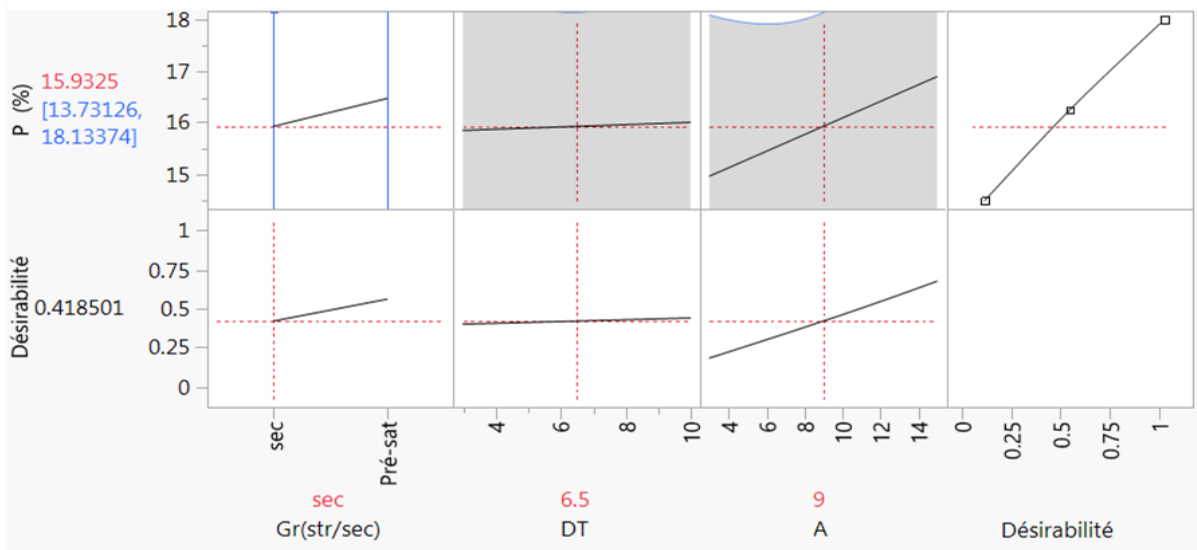


Figure. IV. 8. Graphique de l'effet principal pour différents BGRTi.

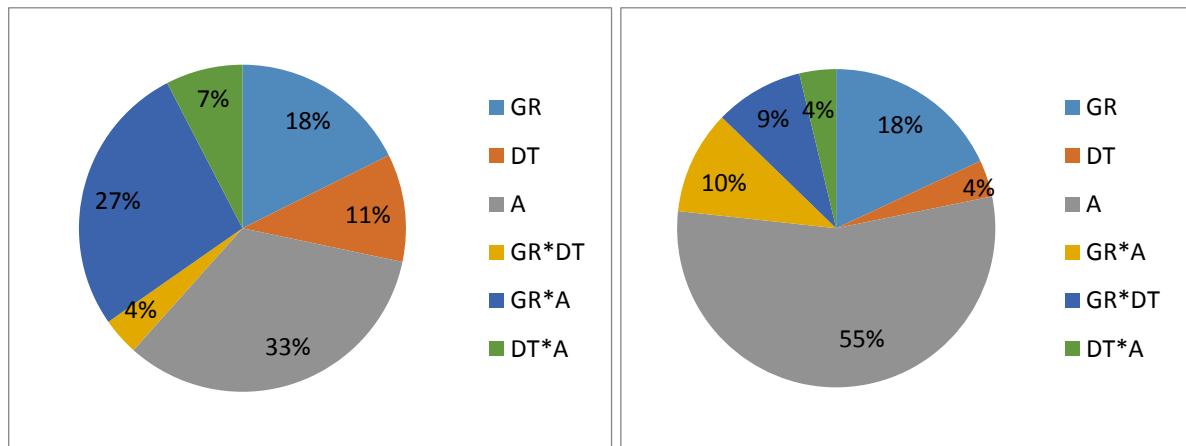


Figure. IV. 9. Facteurs influents (a) : Résistance à la compression, (b) : Porosité.

La figure. IV.10 (b) présente les surfaces d'iso réponses qui montrent toutes les combinaisons possibles de l'interaction ((A)/GR) sur la porosité accessible à l'eau. Ces différentes combinaisons peuvent générer des porosités maximales ou minimales. Les valeurs maximales sont obtenues en utilisant du BGR pré-saturé avec des temps de durcissement longs, tandis que les valeurs minimales sont obtenues en utilisant du BGR sec avec des temps de durcissement courts.

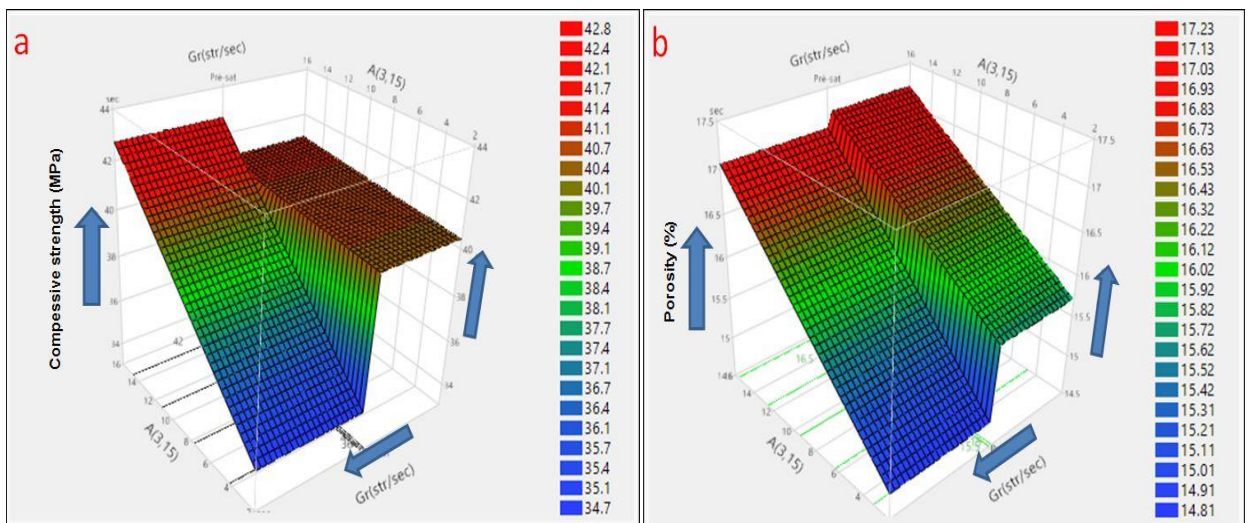


Figure. IV. 10. Surfaces d'iso-réponse, (a) : Résistance à la compression, (b) : Porosité.

IV. 7. 5. Absorption et densité du BGRTi

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau à 28 jours sont représentés sur la figure. IV. 11. Comme prévu, le BGR a montré une absorption beaucoup plus élevée que celle du BGN (+64,73%), ce qui est principalement attribué à la présence de mortier attaché dans les GBRT. Le traitement des GBRT a remarquablement affecté leur potentiel d'absorption d'eau, dont l'influence dépend du mode de traitement. Tout d'abord, l'effet du temps de durcissement est clairement perceptible, tous les bétons fabriqués avec du GBRT dont le temps de durcissement n'était que de 3 jours ont montré une diminution de l'absorption du RAC jusqu'à 9,86% (cas du BGRT1). Cependant, le temps de durcissement de 15 jours a provoqué une augmentation de l'absorption du GBR jusqu'à 9,3% (cas du BGRT6). Cette augmentation peut être attribuée à la fissuration retardée de la couche enveloppant les GBRT, qui deviennent par conséquent plus poreuse pendant ses longues périodes de durcissement (15 jours), par rapport aux courtes périodes de 3 jours. D'autre part, l'état du granulat pendant son traitement a également influencé l'absorption finale du béton. En général, les GBR traités à l'état sec ont entraîné une absorption plus faible par rapport aux GBR présaturés, l'absorption a diminué de 9,22% entre BGRT1 et BGRT2. Il semble que l'enrobage sec de GBR les entourait mieux, ce qui limitait la pénétration de l'eau dans leurs pores. Aussi, l'adhérence entre cette couche et le nouveau béton peut être à l'origine de la faible absorption d'eau que présentait le béton à base de GBRT sec. L'effet du temps de trempage ne semble pas évident puisqu'une variation insignifiante de l'absorption des BGRT a été notée. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de porosité, présentés sur la figure. IV.7. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres auteurs [63][181] Concernant la masse volumique, les GBR ont entraîné une perte de masse volumique du béton d'environ

3,5% par rapport au BGN, ce qui est certainement dû à la nature hétérogène de ces granulats et à leur forte porosité. Le traitement des GBR a amélioré significativement les masses volumiques des bétons obtenus, indépendamment des paramètres de traitement (temps de durcissement, temps de trempage et état des GBR). On peut affirmer que l'encapsulation a permis de réduire les pores des granulats et a conduit à une meilleure compacité du béton grâce à l'adhérence qu'elle assure entre le GBR et le béton qui l'entoure.

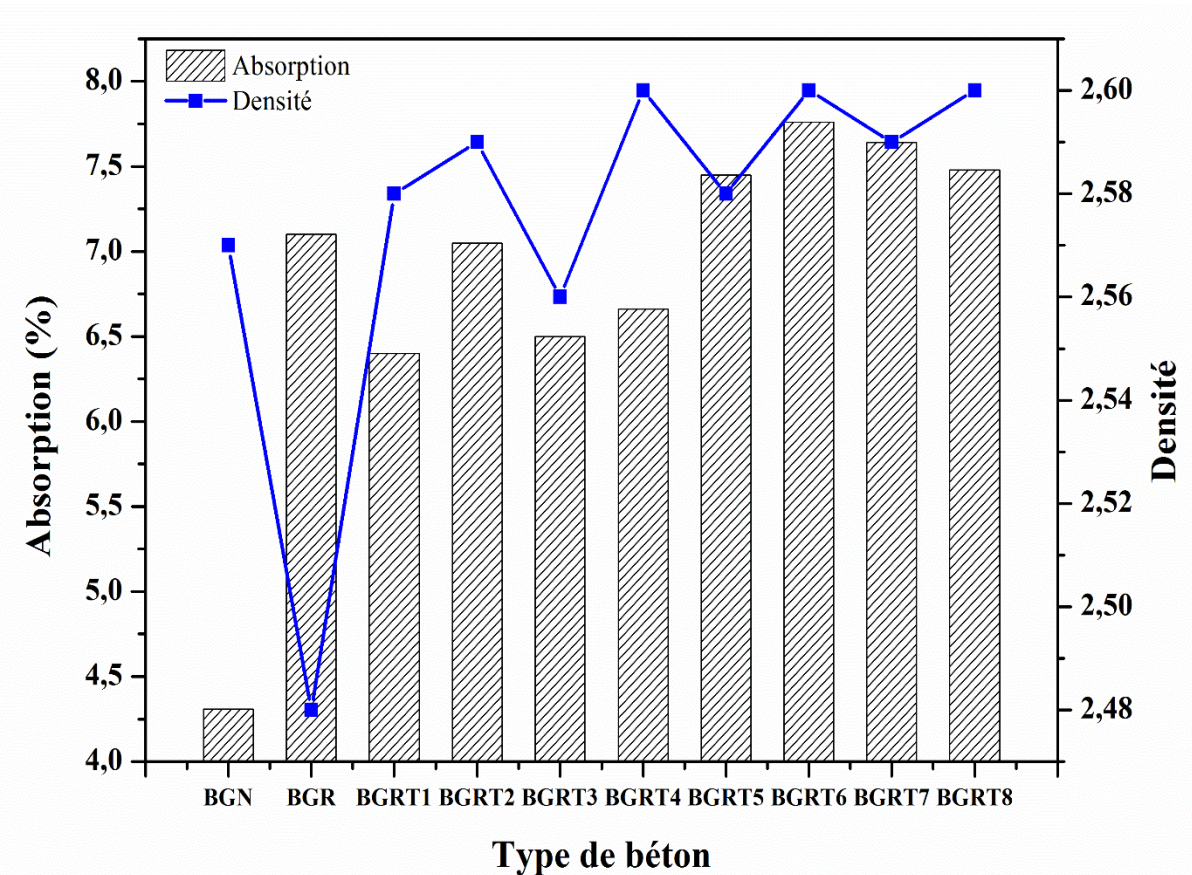


Figure. IV. 11. Densité et absorption après immersion du BGRT_i.

A partir de l'analyse de la résistance et la porosité des BGRT_i, le traitement optimal est (sec, 15 jours) (pré-saturé, 3 jours), pour la résistance et (pré-saturé, 3j), (sec, 3 jours) pour la porosité soit :BGRT₇, BGRT₄ en terme de résistance et BGRT₁, BGRT₄ en terme de porosité, sachant que les résultats de porosité concordent avec les résultats d'absorption.

IV. 8. CARACTÉRISTIQUES MICROSTRUCTURALES

Une deuxième optimisation est faite selon l'état de granulat (sec - pré sat) en gardant les deux autres paramètres constants (durée de trempage à 10min et la durée de durcissement à 28jours), les caractéristiques chimiques, physiques, mécaniques et microstructurales des GBRT seront les critères à considérer.

Les 4 types de granulats (GN, GBR, GBRT-sec et GBRT-pré-sat) sont soumis à des analyses microstructurales par les techniques suivantes :

- 1-Analyse Thermogravimétrique (ATG).
- 2-Diffraction des Rayons X (DRX).
- 3-Fluorescence X (FRX).
- 4-Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).
- 5-MEB-EDX

IV. 8. 1. protocole expérimental

Des échantillons de 100 g sont d'abord cassés en petits morceaux. Ces morceaux sont ensuite broyés dans un broyeur à billes et passés à travers un tamis de 80 microns ; figure. IV.12. Comme l'ettringite perd ses molécules d'eau et devient amorphe avec la chaleur, le broyage se fait en plusieurs étapes pour éviter un échauffement excessif de l'échantillon. Cette préparation est utilisée pour l'analyse ATG et DRX, ainsi que pour recueillir des informations qualitatives et quantitatives sur la composition chimique avec la FRX. Cette préparation permet également à l'analyse FTIR d'identifier les groupes fonctionnels présents dans le granulat étudié en détectant les pics caractéristiques des vibrations de liaisons chimiques spécifiques. Cela aide à comprendre la composition chimique du granulat étudié.



Figure. IV. 12. Préparation des échantillons de granulats pour leur analyse ATG, FTIR, et DRX.

IV. 8. 1. 1. Analyse par Diffractométrie des Rayons X (DRX)

La figure. IV.13 illustre le dispositif employé pour l'analyse de diffraction des rayons X (DRX), réalisée sur plusieurs échantillons représentatifs, finement broyés. L'analyse a été effectuée à l'aide d'un spectromètre de diffraction des rayons X MPD (PANalyticalX'Pert Pro).



Figure. IV. 13. Appareil Dispositif utilisé pour l'analyse DRX.

IV. 8. 1. 2. analyse Thermogravimétrique (ATG)

De plus, les échantillons broyés des 4 types de granulats ont été soumis à une analyse thermogravimétrique (TGA) dans une plage de températures allant de 20 à 1000°C, avec un taux de montée en température de 10°C/min. (figure. IV.14)

L'objectif de cet essai est de déterminer les teneurs de certaines phases solides caractéristiques du granulat. Il est ainsi possible d'évaluer la teneur en portlandite Ca(OH)_2 , qui sont directement liée au degré d'hydratation du ciment. D'autres phases solides peuvent aussi être quantifiées ayant pour objectif l'évaluation de la durabilité du béton dans le dernier chapitre. La mesure de la teneur en CaCO_3 est par exemple utile pour connaître le degré de carbonatation du béton. Ce mode opératoire décrit le déroulement d'une analyse thermique simultanée appliquée à un échantillon de béton, qui comprend une analyse thermogravimétrique (ATG) et une analyse thermique différentielle (ATD).

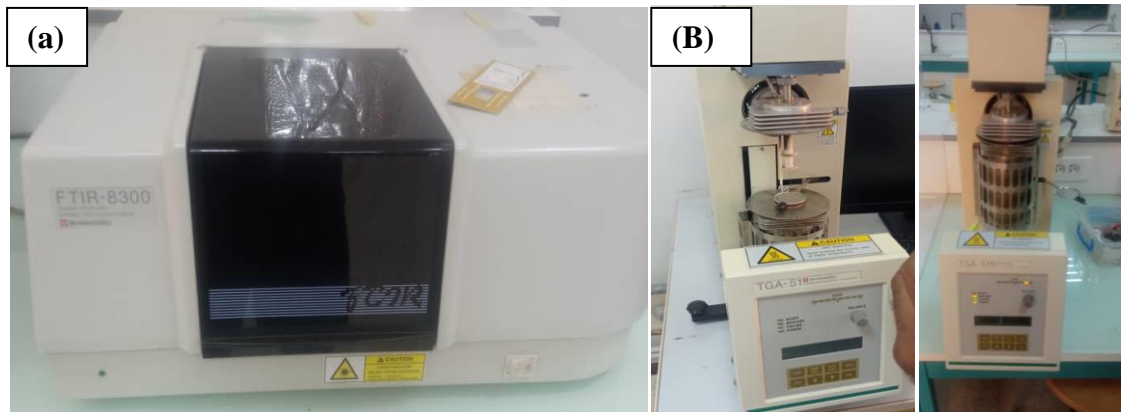


Figure. IV. 14. Appareil Dispositif utilisé pour l'analyse ATG (a) et FTIR (b).

IV. 8. 2. Analyse au microscope électronique à balayage (MEB)

La morphologie et la microstructure des granulats étudiés ont été examinées par microscopie électronique à balayage couplée à la spectrométrie d'émission de rayons X à dispersion d'énergie (SEM-EDX). La préparation des échantillons, avant leur examen et analyse au microscope électronique à balayage (MEB), a CRAPC Biskra suivi les étapes présentées dans la figure. IV.15.

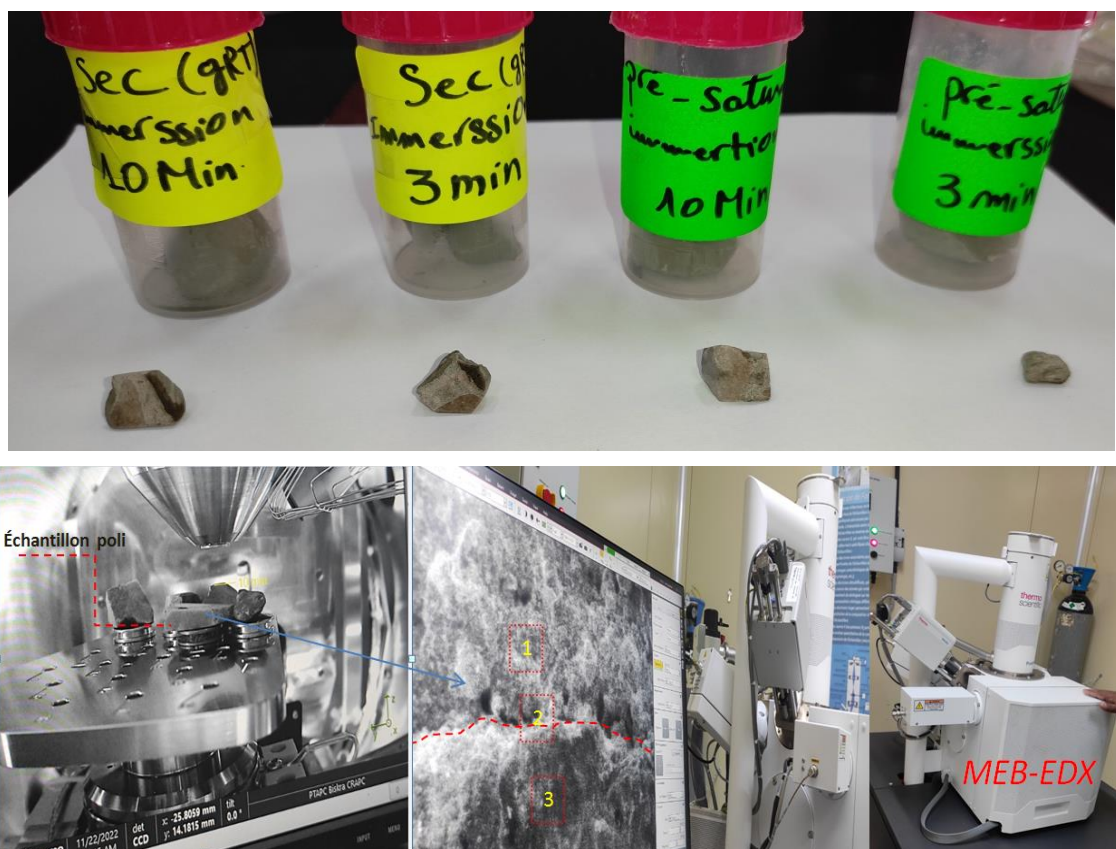


Figure. IV. 15. Préparation d'un GBRT pour son analyse par MEB.

IV. 8. 3. Analyse de caractérisation ITZ par Micro-dureté

La figure IV.16 illustre les étapes nécessaires à la réalisation des tests de dureté, des échantillons de mortier GBRT âgés de 28 jours ont été découpés en petits blocs prismatiques d'environ (20 x 20 x 5) mm³. Les échantillons ont été immergés dans de l'éthanol absolu pendant 24 heures afin d'arrêter le processus d'hydratation, puis séchés dans un four sous vide à 60°C pendant 24 heures. Étant donné que la matrice hétérogène de l'BGRT présente une microstructure poreuse susceptible d'être gravement endommagée par un meulage et un polissage direct, une résine époxy a été utilisée pour imprégner les pores et les vides de la matrice cimentaire, afin de protéger la structure poreuse de l'BGRT. Après l'imprégnation, les échantillons ont été meulés et polis avec des papiers SiC de granulométrie 400, 800, 1200, 2400, 3600 et 4000 à une vitesse de 1000 tr/min pendant une demi-heure chacun. L'éthanol a été utilisé comme refroidissant et lubrifiant pendant le meulage. Ensuite, une suspension de diamant avec des gradations de 3,1 et 0,5 µm a été utilisée pour polir la surface des échantillons pendant une demi-heure, respectivement. Les échantillons bien polis ont ensuite été nettoyés dans un bain à ultrasons pour éliminer les débris restants sur la surface de l'échantillon

La distance mesurée peut atteindre jusqu'à 140 micromètres, avec un espacement moyen de 20 micromètres entre deux points, comme la montre la figure. IV. 16 Chaque valeur enregistrée est la moyenne de 4 mesures. Il est à noter que la charge d'essai du testeur Vickers était de 10 g, avec un temps de contact de 10 s, conformément aux références [64], [73], [82], [139], [271]

La micro dureté a été calculée à l'aide de l'équation suivante

$$HV = \frac{F}{S} = 2F \frac{\sin(\theta/2)}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (IV. 2).$$

Ici, HV est la dureté Vickers (MPa), F est la charge d'essai (N), S est la zone d'indentation (mm²), d est la valeur moyenne arithmétique de l'indentation diagonale (mm) et h est l'angle au sommet entre les angles opposés. Faces du pénétrateur diamant. Il convient de mentionner que la méthode (polyline) a été utilisée pour sélectionner les points de mesure spécifiques.

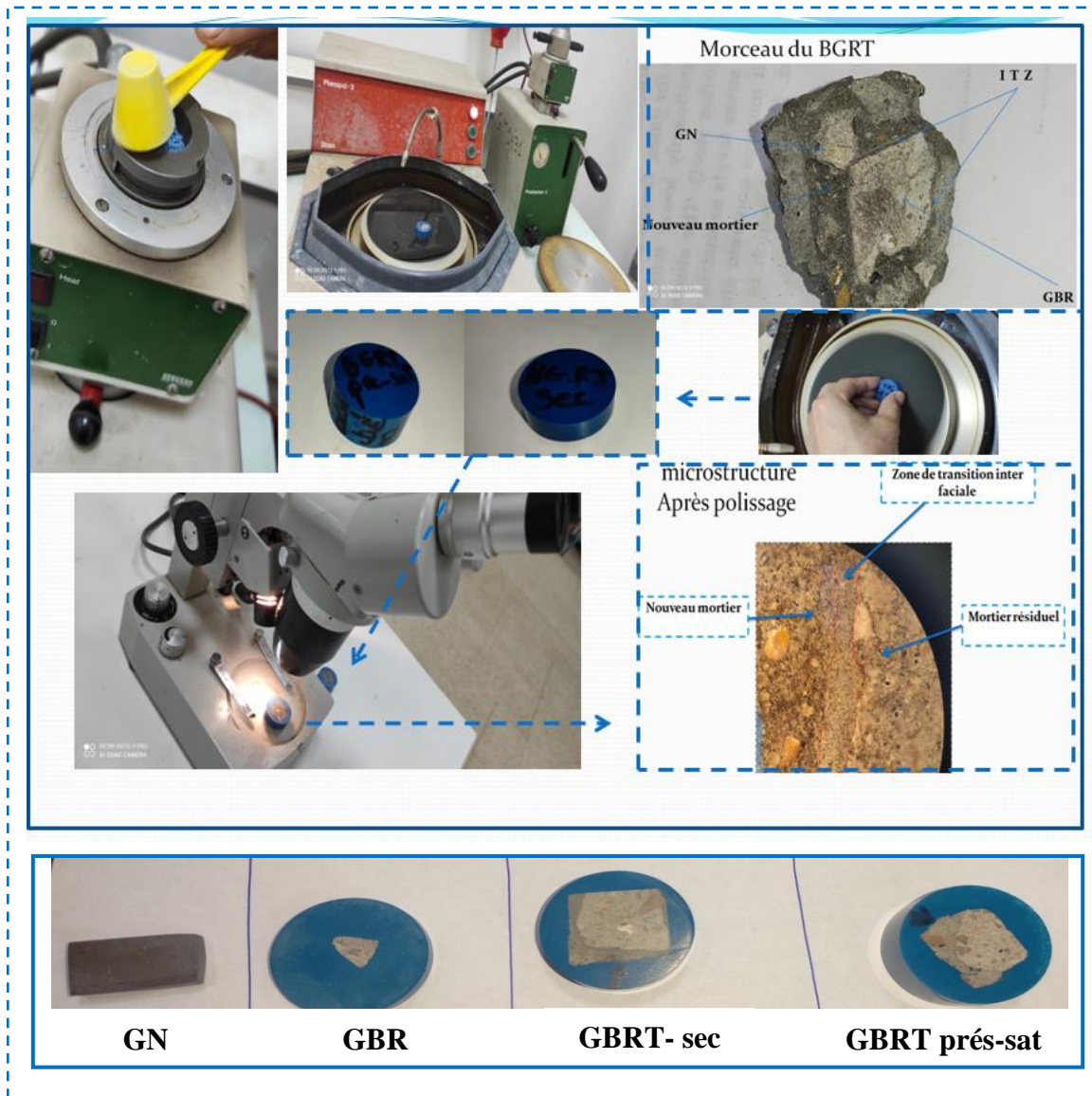


Figure. IV. 16. Préparation des échantillons. (a) : échantillon découpé à la tronçonneuse (b) : échantillon enrobé, (c) : porte échantillon de la polisseuse, (d) : processus de polissage.

IV. 9. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

IV. 9. 1. Composition chimique et minéralogique

Les résultats de l'analyse par fluorescence X (FRX) sont résumés dans les tableaux IV.6. Ils indiquent que les GN contiennent plus de CaO que les GBR et les GBRT. De plus, il a été constaté que les GBRT contiennent une quantité importante de Fe_2O_3 . À cet égard, [111] a découvert qu'une grande quantité de Fe_2O_3 peut améliorer la résistance à la compression du béton. La composition minéralogique présentée dans les tableaux IV.7 indique explicitement que les GN sont de la calcite, tandis que les GBR et les GBRT sont un mélange de calcite, de dolomite et d'ankérite [96].

Chapitre IV: Traitement des GBR par revêtement cimentaire et caractérisation des GBRT et des BGRT (Modélisation par le logiciel jmp)

Tableau. IV. 6. Proportion chimique (%) des différents agrégats.

Oxydes (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF(perte au feu)
GN	52,20	2,54	0,86	0,93	0,77	0,31	0,05	0	42,2
GBR	43,16	6,35	1,17	1,12	8,16	0,68	0,095	0,03	38,93
GBRT pré-saturé	40,33	6,39	0,94	1,16	10,24	0,53	0,07	0,02	38,51
GBRT sec	44,89	9,60	1,73	2,10	7,02	1,03	0,147	0,03	33,37

Tableau. IV. 7. Composition minéralogique (%) des granulats.

	Calcite	Dolomie	Sidérite	Ankerite	Magnésite	Quartz	Kaolinite	K-Feldspar	CO ₂ _DXR
GN	94,49	0,05	0,08	0,04	0,56	1,33	2,03	0,08	41,91
GBR	27,65	51,07	0,17	10,73	0,76	9,44	0,01	0	41,68
GBRT pré-saturé	34,61	48,55	0,42	9,05	1,38	4,4	0	0	43,22
GBRT sec	36,74	35,63	1,28	9,54	2,99	8,66	0,03	4,37	39,36

IV. 9. 2. Diffraction des rayons X

La technique de diffraction des rayons X (DRX) fournit des informations intéressantes sur la structure et la composition chimique des phases cristallines, à partir de mesures de l'intensité et des angles de diffusion des rayons X diffractés par le matériau étudié [112]. Les bétons contenant des agrégats cristallins et une variété de phases cristallines et partiellement cristallines, l'approche DRX peut donc être considérée comme l'une des techniques analytiques les plus efficaces pour leur analyse [272]–[274]. La technique DRX a ensuite été réalisée sur des échantillons représentatifs et bien broyés à l'aide d'un diffractomètre de type Panalytical X-Pert Pro.

La figure. IV.17. présente les spectres de diffraction des rayons X sur poudre (DRX) de (GN), (GBR), (GBRT sec) et (GBRT présaturé). Il est clairement indiqué que les spectres de GBR et de (GBRT sec et présaturé) contiennent plusieurs pics relatifs au calcaire et au quartz. Le calcaire est présent sous forme de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), en quantité infime. Cependant, GN semble être riche uniquement en calcaire. Ces spectres affirment donc la présence de la matrice cimentaire dans les GBR et GBRT en raison de leurs teneurs en quartz et portlandite. En effet,

des traces de quartz ont été détectées sur l'échantillon GN, ce qui est probablement dû aux impuretés contenues dans le matériau au niveau du gisement. Cependant, aucun pic correspondant à la portlandite n'a été observé sur le spectre GN. Des observations similaires ont été rapportées par Garcia et al. [76], et Nedeljkovic et al. [73][275]

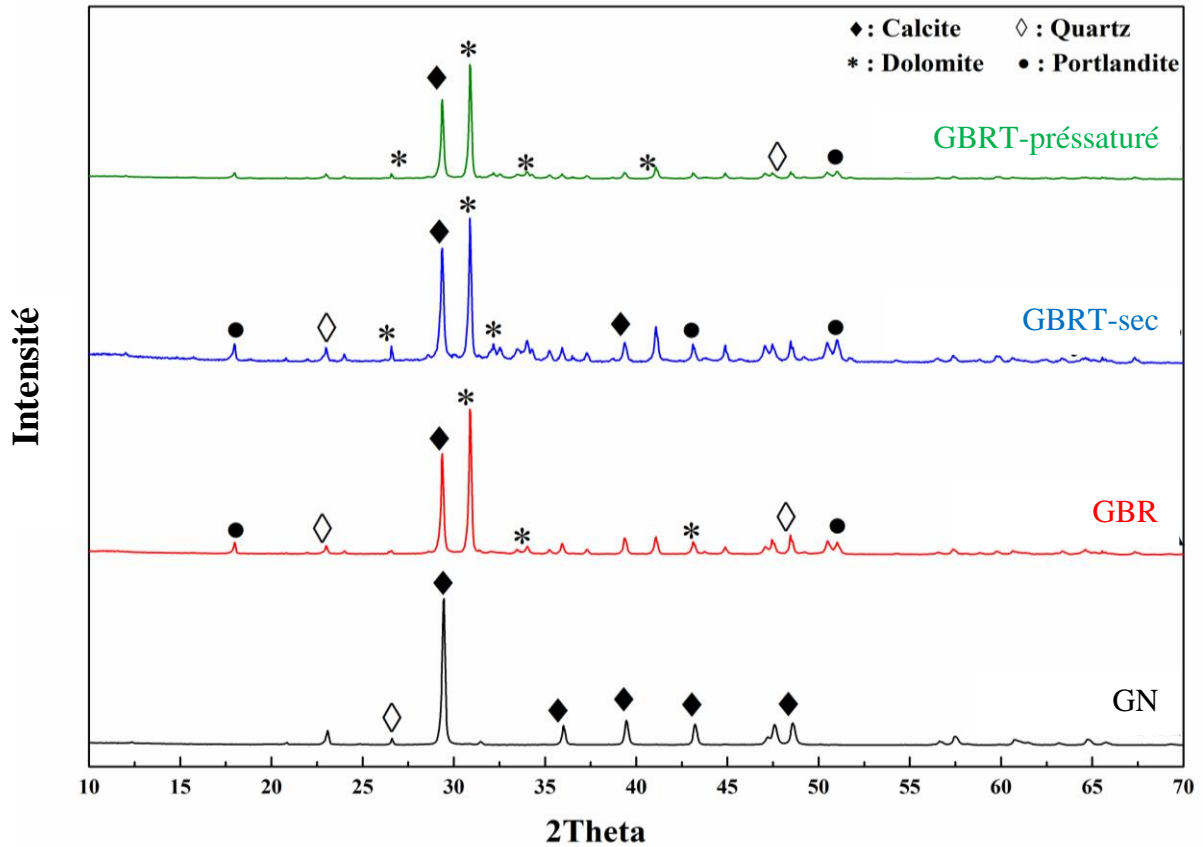


Figure. IV. 17. Résultats de l'analyse DRX pour les agrégats étudiés.

IV. 9. 3. Analyses thermogravimétriques

Les quatre types de granulats concassés ont été soumis à une analyse thermogravimétrique (ATG), entre 20°C et 1000°C, avec une vitesse de montée en température de 10°C/min. La figure. IV. 18 illustre les résultats de l'ATG pour les différents granulats, à savoir GN, GBR (GBRT sec) et (GBRT pré-saturé).

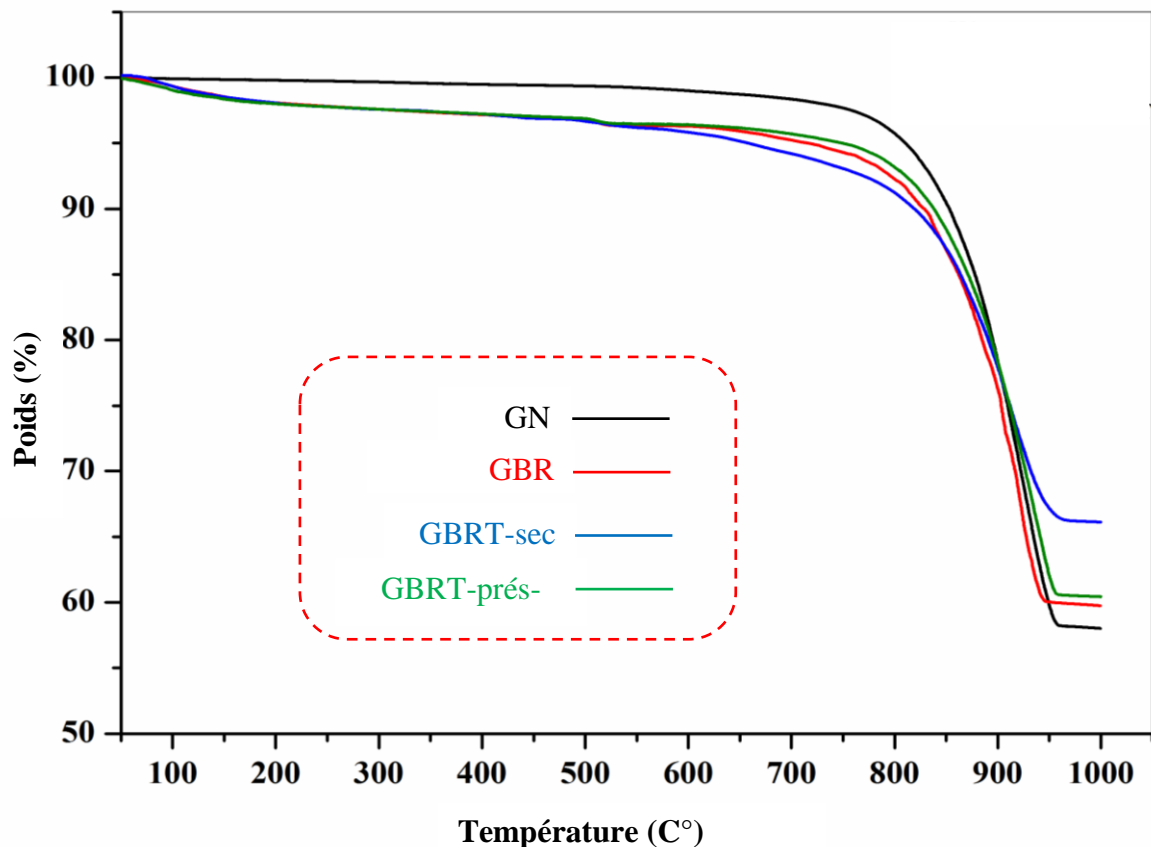


Figure. IV. 18. Résultats d'analyse thermogravimétrique (ATG) pour les agrégats étudiés.

Le tableau. IV. 8 résume les pertes de masse pour différentes plages de température. Indépendamment des pertes de masse résultant de l'évaporation de l'eau absorbée dans chaque granulat, qui est principalement liée à leur état hydrique avant l'essai, il s'avère que le GBR et le GBRT ont absorbé beaucoup plus d'eau que le GN, du fait de leur forte absorption. De plus, des différences significatives entre les pertes de masse des différents granulats ont été observées dans les autres plages de température. En l'absence de matrice cimentaire, les pertes de masse qui ont été enregistrées entre 100 et 600°C pour le GN étaient probablement liées aux impuretés et aux matières argileuses que ce granulat peut contenir. Cependant, les différences observées pour les deux autres granulats, bien que légèrement en faveur du GBR, peuvent être attribuées aux produits d'hydratation du ciment présents dans le GBR et le GBRT. Concernant la quatrième plage de température, qui correspond au phénomène de décarbonatation, les résultats obtenus ne sont qu'indicatifs du fait que ce phénomène se poursuit jusqu'à 1000 °C. Il est à noter que la différence significative observée entre GBRT et GN est due à la présence de la matrice cimentaire dans le premier plutôt que dans la roche calcaire. Néanmoins, la perte de masse importante constatée pour le GBR est probablement due aux impuretés qu'il peut contenir [73], [275].

Tableau. IV. 8. Perte de masse relative à chaque phénomène, selon les résultats de l'ATG.

Température range	Δ (40-105°C)	Δ (105-450°C)	Δ (450-600 °C)	Δ (600-1000 °C)	Total loss
GN	0,1	0,47	0,43	40,99	41,99
GBR	0,76	2,24	0,71	36,54	40,25
GBRT pré-saturé	1,07	1,9	0,63	35,97	39,57
GBRT sec	0,78	2,32	1,08	29,7	33,88

IV. 9. 4. Microstructure du GBRTi

La morphologie et la microstructure des GBR et GBRT (secs et saturés) ont été examinées par microscopie électronique à balayage couplée à une sonde de spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (MEB-EDX). Le temps de durcissement a été fixé à 28 jours, tandis que le temps de trempage a été considéré à 3 min et 10 min. Les figures. IV (19, 20 ,21 et 22) montrent les caractéristiques morphologiques et microstructurales de l'ITZ entre le GBR et la couche d'encapsulation.

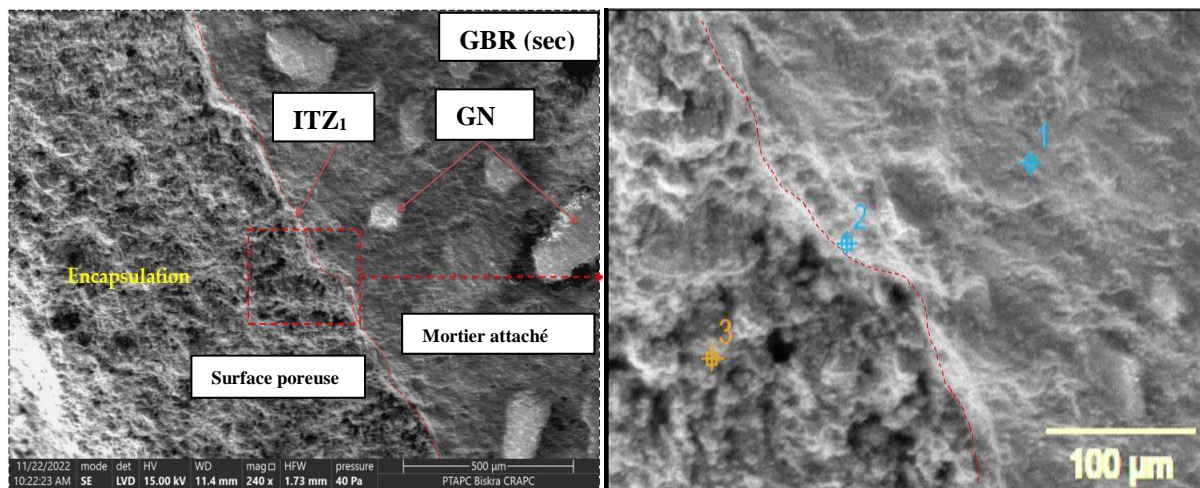


Figure. IV. 19. Observations MEB - Microstructure de (GBR sec), avec temps de trempage (DT = 10 min) et ITZ (encapsulation/GBR sec).

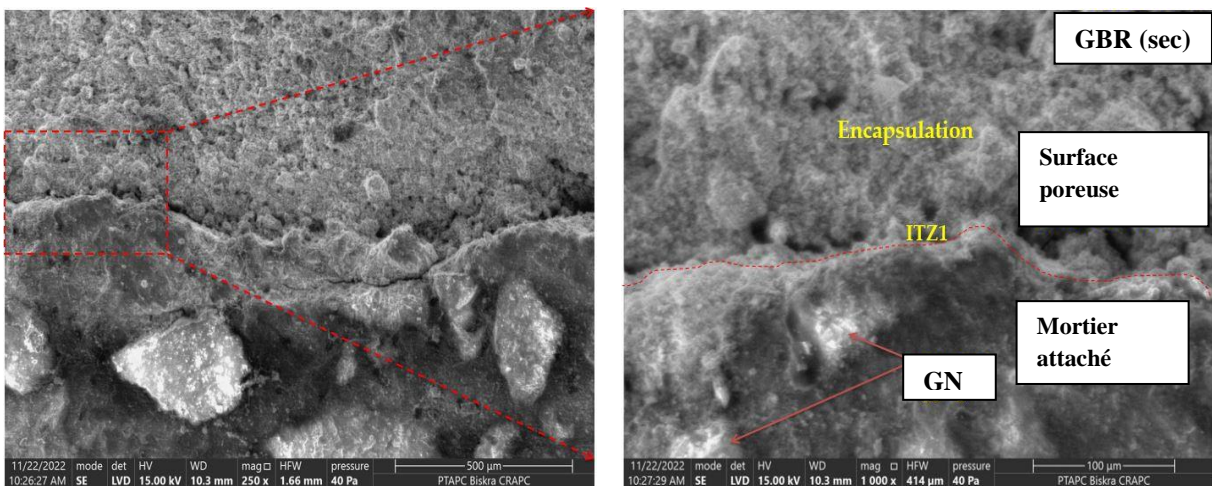


Figure. IV. 20. Observation MEB : Microstructure du (GBRT sec, avec temps de trempage (DT= 3min) et ITZ (encapsulation/GBR sec).

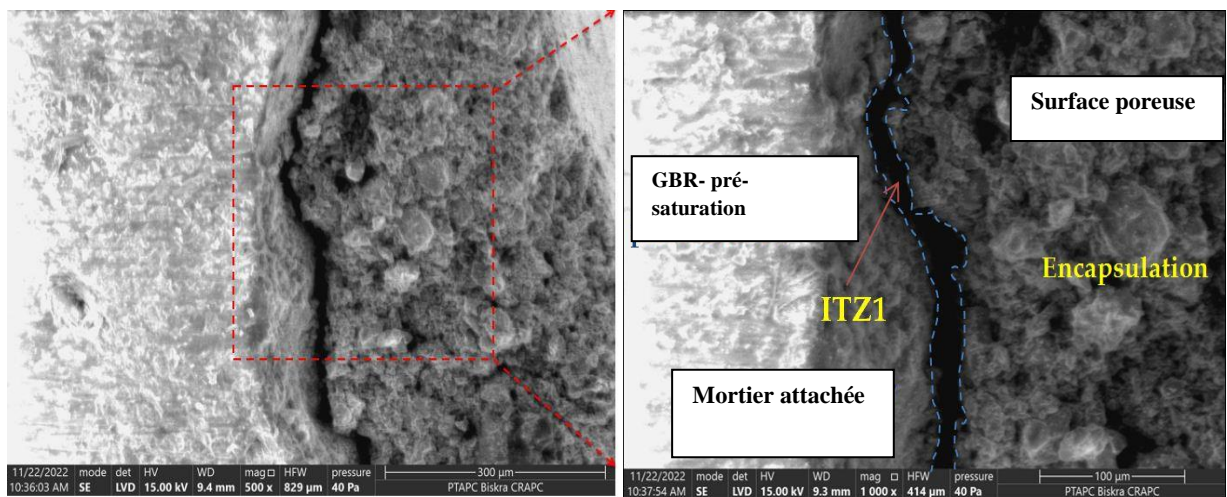


Figure. IV. 21. Observations SEM : Microstructure de (GBR pré-saturé), avec temps de trempage (DT = 10 min) et ITZ (encapsulation/GBR pré-saturé).

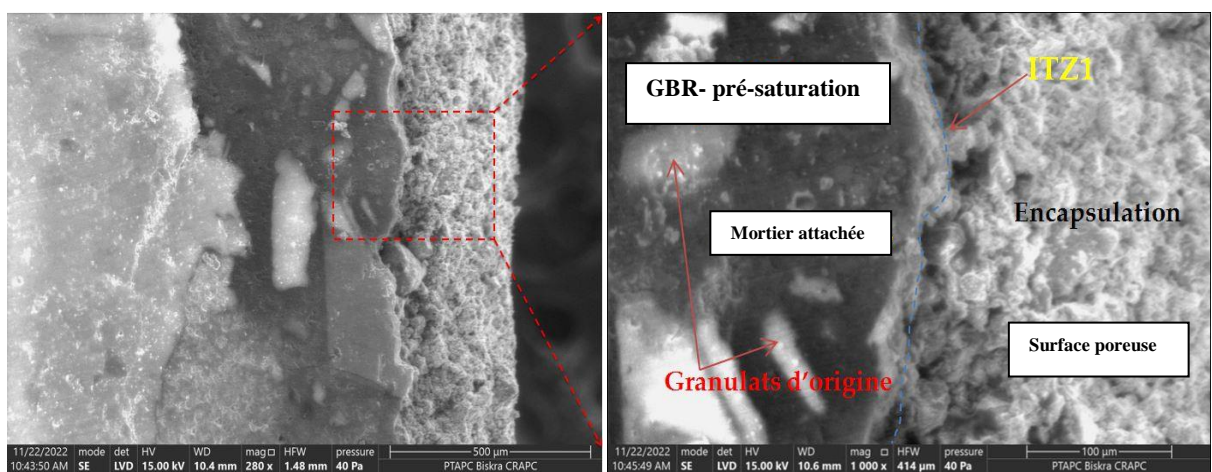


Figure. IV. 22. Observations et résultats EDX : Analyse microstructurale des GBRT sélectionnés : (a) (GBR sec), (b) : (GBRT pré-saturé) et ITZ (encapsulation/GBR).

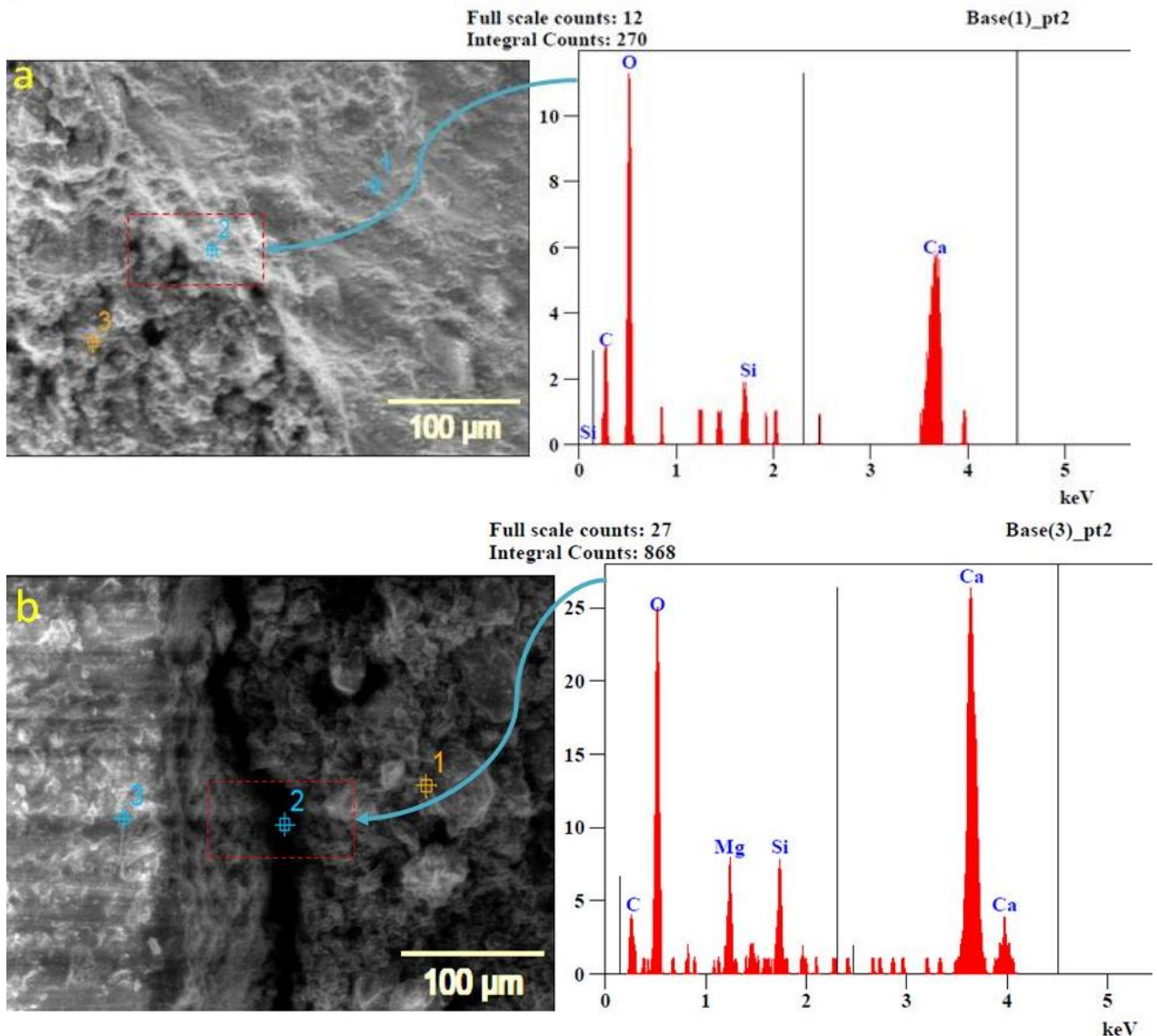


Figure. IV. 23. Observations et résultats EDX : Analyse microstructurale des GBRT sélectionnés : (a) (GBR sec), (b) : (GBRT pré-saturé) et ITZ (encapsulation/GBR).

Il est à noter que le mortier collé au GBR constitue le maillon faible des GBR. Ce mortier est constitué de nombreux pores fins et fissures qui affectent grandement la résistance à la compression du BGR. Ces pores et fissures augmentent la consommation d'eau et, par conséquent, réduisent l'hydratation prévue de la ZIT du (BGR). L'encapsulation des GBR par une fine couche de ciment, placée sur la surface des granulats, permet la formation d'un film mince sur la surface du GBR afin que le vieux mortier poreux puisse également être imprégné. Il convient également de souligner que les fissures, et même les anciens vides, se remplissent de coulis de ciment. Les figures précédentes montrent que les fissures au sein du RAC sont comblées après encapsulation (GBRT sec), alors que des fissures similaires dans le (GBRT pré-saturé) sont encore vides car l'angle de contact est faible en raison de la présence d'humidité sur

la surface extérieure du granulats. De plus, les particules dans la zone d'encapsulation (pâte de ciment) apparaissent sous des formes sphériques et cubiques, régulières et irrégulières.

Il convient de noter que cette zone n'a pas un aspect lisse, mais plutôt rugueux, elle contient des vides et des micropores, ce qui explique la forte absorption et la porosité du GBRT.

L'analyse microstructurale du GBRT semble être en faveur du (GBRTsec) trempé dans le coulis de ciment pendant 10 min. Dans ce cas, l'ITZ est dense et on constate une bonne adhérence entre le GBR et la couche d'encapsulation. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Chaban et al.[36] et Xuan et al.[266], ainsi qu'avec ceux de Lima et al. [276], Singh et al.[113]et Wang et al.[277].

De même, la spectroscopie à rayons X dispersive en énergie a montré que le rapport atomique (Ca/Si) des composants de l'ITZ, pour les deux échantillons, (GBRT pré-saturé) et (GBRT sec), a diminué après traitement, ce qui a entraîné davantage de produits d'hydratation et par conséquent conduit à une porosité et une largeur de l'ITZ plus petites. Notons que le rapport (Ca/Si) dans l'ITZ du (GBRT sec) est égal à 8,12, tandis que celui dans l'ITZ du (GBRT présaturé) est de 12,31, comme le montre la Fig. IV.23. Cela représente une augmentation de l'ordre de 34,03%. Ces résultats sont en accord avec les observations de Thomas et al.[38] et Liu et al.[278], ainsi qu'avec celles de Berredjem et al.[28].

IV. 9. 5. micro-dureté

Figure. IV.24 montre l'effet du traitement par encapsulation des (GBR) sur la micro-dureté de leurs composants (GN) de référence, mortier ancien et nouveau) et sur l'ITZ et l'ITZ1.

Il a été remarqué que l'ancien ITZ était systématiquement la zone la plus faible si on la comparait à la valeur du GN de référence qui est considérée comme la plus grande. De plus, les valeurs de la dureté et de la résistance de l'ITZ sont inférieures à celles des autres zones, ce qui signifie que la microstructure est faible. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés dans d'autres études. Il a été révélé que la dureté augmente dans la région de pré-enrobage, ou plutôt à proximité de l'encapsulation (ITZ1).

Cette augmentation est probablement due en premier lieu à la fixation de l'encapsulation à l'ancien mortier fixé, comme l'indiquent les observations morphologiques dans la figure. IV.19, et en second lieu à l'amélioration de l'ITZ1 et à la présence d'épaisseur d'encapsulation cimentaire. Cela permet d'augmenter la cohésion interne de l'ITZ1 qui s'est formée au cours des

réactions, en plus de la formation de nouveaux produits d'hydratation. Ces résultats sont confirmés par l'analyse DRX.

Les zones étudiées, comme l'ITZ sur l'ITZ1 interne en termes de micro-dureté, présentent une très faible résistance à la micro-dureté dans l'ITZ (figure. IV.24). Il convient de souligner que la micro-dureté est un indicateur majeur de la fragilité du matériau. Un examen attentif des résultats a permis de déduire la présence de plusieurs produits d'hydratation dans l'ITZ1, ce qui indique que la pâte de ciment contient un degré d'hydratation assez élevé. De plus, l'augmentation progressive de l'ITZ1 a été remarquée en direction de la zone de pré-revêtement. Cela est dû au fait que le pré-revêtement a contribué à augmenter la valeur de résistance à la dureté pour l'ITZ1 interne. Des observations similaires ont déjà été rapportées.

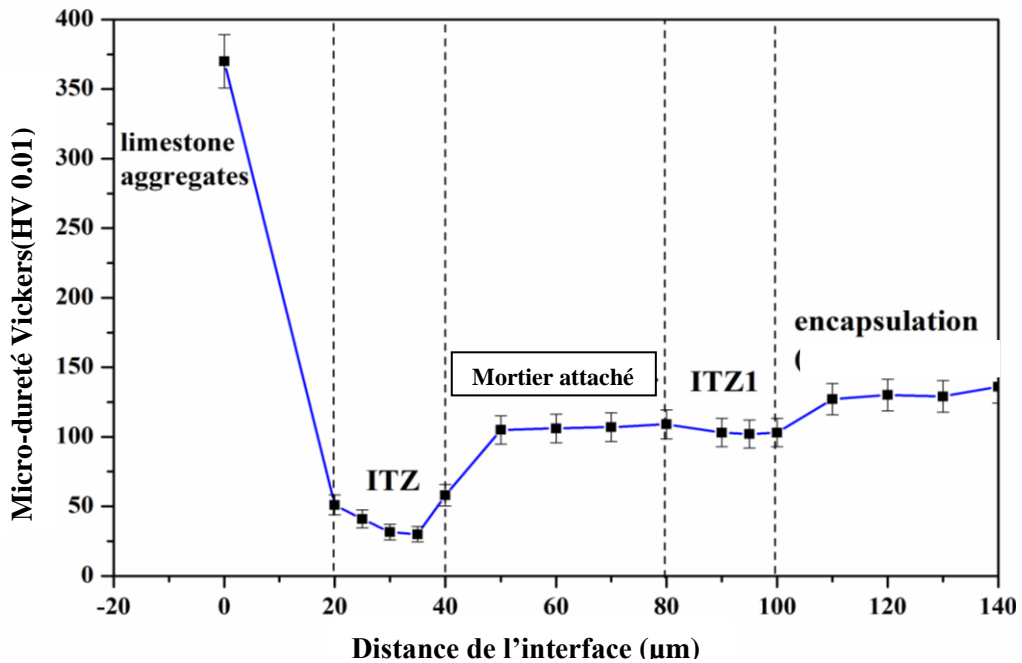


Figure. IV. 24. Comportement de la micro-dureté des ITZ.

IV. 10. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a démontré une opportunité d'améliorer les propriétés des GBR ainsi que celles des bétons incorporant 100 % des GBRT, Les résultats de cette étude indiquent que l'encapsulation des BGR par le coulis de ciment améliore leurs propriétés physiques. Pour optimiser les conditions du traitement des GBR un plan factoriel complet est utilisé en précisant 3 facteurs indépendants avec 2 niveaux en utilisant logiciel statistique JMP. Il a été constaté que les propriétés physiques du (GBRT) sont conditionnées par l'état du granulat (sec ou pré-saturé). De plus, la résistance à la compression des bétons contenant du GBR est nettement supérieure à celle des bétons de référence (BGN, BGR). De plus, la porosité accessible à l'eau et l'absorption de ces bétons sont supérieures à celles du BGN, alors qu'elles sont comparables voire inférieures à celles du BGR. De plus, il semble que le temps de durcissement soit le principal facteur qui affecte la résistance à la compression, suivi de l'état GBR, puis du temps de trempage dont l'impact n'est pas significatif. De plus, l'interaction la plus forte était entre le temps de durcissement et l'état des granulats, tandis que les autres interactions « temps de durcissement/temps de trempage et état des granulats/temps de trempage » se sont révélées moins importantes.

La résistance à la compression de BGRT7 dépasse celle du BGR et du BGN de 41,95% et 21,04% respectivement, tandis que celle de BGRT8 dépasse celle de BGR et BGN de 41,55% et 20,50% respectivement après 28 jours de durcissement et BGRT1 et BGRT3 pour la porosité (légère réduction d'environ 3,14% et 3,01% respectivement, par rapport à BGR). De plus, les résultats de porosité sont conformes à ceux d'absorption. La réduction de l'absorption est respectivement de 10,93 % et 9,23 % par rapport au BGR.

L'observation de la microstructure par MEB-EDX a montré la forte porosité des GBR en général. En utilisant cette méthode, on peut confirmer que l'amélioration de la résistance à la compression semble être le résultat de l'amélioration de l'ITZ entre le granulat encapsulé et la pâte de ciment. Les images obtenues à partir de MEB montrent les différences de porosité dans l'ITZ pour les GBRTsec et GBRT prés sat.

En conclusion, l'optimisation du premier traitement des GBR par PFC a permis de déterminer les facteurs clés du GBRT (GR, DT, A) et de déterminer les conditions d'encapsulation les plus performantes, conduisant ainsi à une amélioration significative des propriétés du BGRTi.

Chapitre IV: Traitement des GBR par revêtement cimentaire et caractérisation des GBRT et des BGRT (Modélisation par le logiciel jmp)

Dans la deuxième phase de l'étude traitant la durabilité des bétons incorporant les GBRTi, une seconde optimisation par addition de la fumée de silice et d'un adjuvant hydrofuge (GBRT-FS/GBRT-HF) est analysée.

Chapitre V

**IMPACT DE L'ENCAPSULATION CIMENTAIRE SUR LA
DURABILITÉ DU BÉTON**

CINQUIÈME CHAPITRE

IMPACT DE L'ENCAPSULATION CIMENTAIRE SUR LA DURABILITÉ DU BÉTON

V. 1. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer La durabilité du (BGRT) confectionné à base des GBR dont la fraction 16/25 seulement a été traitée par un coulis de ciment afin d'améliorer les performances du béton .Une première optimisation par plan factoriel a été faite (voir le chapitre précédant) dont l'objectif est d'analyser les paramètres du traitement les plus influents nature du GBR sec ou présaturé : (GR) , la durée du trempage dans le coulis : (DT) et la durée de durcissement des GBRT : (A) sur la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau du BGRT. Une fois, on a optimisé le traitement, un second traitement complémentaire a été proposé par addition de la fumée de silice et de l'adjuvant hydrofuge pour minimiser l'absorption et la porosité du béton remarquées élevées dans la première optimisation. La même fraction des granulats (16 à 25 mm) est traitée par encapsulation, en additionnant 5 % de la fumée de silice (SF) au coulis de ciment (substitution massique), et par addition de 2 % d'agent hydrofuge (HF) (substitution volumique) séparément, nous obtenons ainsi deux nouveaux granulats traités (GBRT-5%FS et GBRT-2%HF). Nous avons confectionné deux séries de (BGRT-5%FS) et (BGRT-2%HF), qui ont été préparées et durcies selon la première approche de l'optimisation par plan factoriel.

V. 2. CARACTERISATION DES ADDITIONS

Fumée de silice (SF) : dont la composition chimique ainsi que ses propriétés physiques sont résumées dans le tableau. III. 1

Agent hydrofuge: Master Pozzolith Hydrofuge (105 HF). L'adjuvant est un liquide hydrofuge brun, fourni par BASF-Algeria. (Voir chapitre III)

V. 2. 1. préparation du coulis de ciment

Deux types de coulis sont utilisés :

-Le premier avec 5 % FS ($W/C = 0,5$)

-Le deuxième avec 2 % HF ($W/C = 0,37$)

La méthode d'encapsulation des GBR est illustrée dans la figure V.1.



Figure. V. 1. Encapsulation des GBR.

V. 3. CARACTÉRISTIQUES (PHYSICOCHIMIQUES) DES GRANULATS ÉLABORÉS

Le tableau. V. 1 Indique les caractéristiques initiales des différents types d'agrégats. L'encapsulation avec 5 % FS et 2 % HF (séparément) a entraîné une réduction de 12,14 % et 20,99 % de l'absorption d'eau respectivement, par rapport au GBR ; cela peut s'expliquer par la porosité réduite du mortier attaché au GBR. De plus, une légère augmentation de la densité a été observée par rapport au GBRT.

Ces résultats sont en accord avec les observations d'autres chercheurs, notamment Tam VWY et al.[20], Li L. et Xuan et al. [97] et Güneyisi et al. [181], ainsi que d'autres observations similaires rapportées dans les références [70], [73].

L'encapsulation avec 5 % FS et 2 % HF a entraîné une augmentation de l'absorption de 623,6% et 560,58% respectivement par rapport au GN. Ces résultats concordent avec les observations d'autres chercheurs [70], [73]. En termes de pH, il a été noté que GBRT-5%FS, GBRT-2%HF, et GBR présentaient une alcalinité plus élevée par rapport au GN, probablement due à leurs revêtement cimentaire. Cela est en accord avec les études antérieures suggérant que les niveaux de pH dans les solutions dépourvues de sable de quartz dépassent 10,5 [74].

Tableau. V. 1. Les caractéristiques physicochimiques des divers types d'agrégats étudiés.

Characteristic	GN	GBR	GBRT	GBRT-2%HF	GBRT-5%FS
Densité apparente (g/cm ³)	1,37	1,21	1,25	1,28	1,26
Densité absolue (g/cm ³)	2,59	2,54	2,52	2,55	2,57
Absorption (%)	1,1	5,59	9,72	7,68	8,54
Valeur du pH	10	11	12,5	12,5	13,25

V. 4. FORMULATION DU BÉTON ET PROTOCOL EXPÉRIMENTAL

La formulation du béton adoptée au chapitre IV reste la même pour les bétons à base de BGRT (BGRT-2%HF et BGRR-5%FS). la procédure du malaxage [241] coulage , et la préparation des éprouvettes (selon l'essai à effectuer) ainsi que leur conservation est décrite dans le chapitre III Le tableau V.2 regroupe les caractéristiques physiques des différents bétons formulés

Tableau. V. 2. Les caractéristiques physiques des bétons.

Mélange de béton	densité (g/cm ³)		
	Affaissement (cm)	frais	Durci
BGN	7	2,47	2,45
BGR	9	2,28	2,27
BGRT-2%HF	6	2,36	2,27
BGRT-5%FS	6	2,31	2,28

Le programme expérimental de cette partie d'étude est représenté sur la figure V.2.

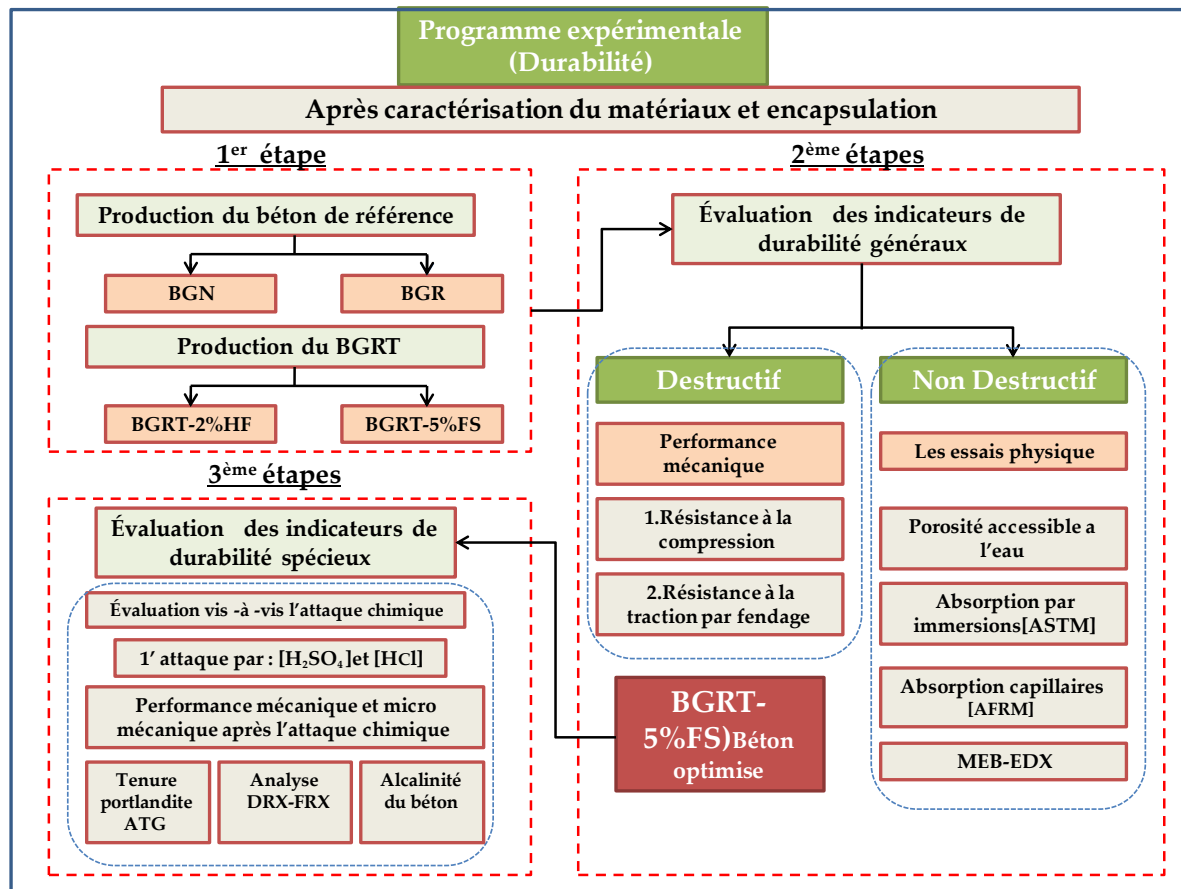


Figure. V. 2. Bref aperçu du programme expérimental utilisé.

V. 5. LES INDICATEURS DE DURABILITÉ GÉNÉRAUX DES BÉTONS BGRT

V. 5. 1. Résistance à la compression

La figure V.3 illustre la résistance en compression des différents types de béton, elle indique une amélioration notable de la résistance à la compression des bétons renfermant des granulats traités. En particulier, la résistance à la compression du (BGRT-2%HF) qui dépasse celle du BGR et du BGN de 40,28 % et 18,78 %, respectivement, après une période de cure de 28 jours, et continue de dépasser ces valeurs de 12,66 % et 2,44 %, respectivement, après une période de cure de 180 jours.)

De même, la résistance du (BGRT-5%FS) surpasse celle du BGR et du BGN de 42,98 % et 22,46 %, respectivement après une période de cure de 28 jours, et continue de dépasser ces valeurs de 17,57 % et 7,92 %, respectivement, après une période de cure de 180 jours.)

En effet, la fumée de silice renforce la (ITZ) entre les (GBR) et le nouveau béton grâce à son effet physique (très grande finesse) et son effet chimique (réaction pouzzolanique).

Les études des littérateurs [34], [63], [96], [97], [181], [279] confirment les résultats obtenus. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans l'étude [230], ainsi qu'aux résultats des études[97].

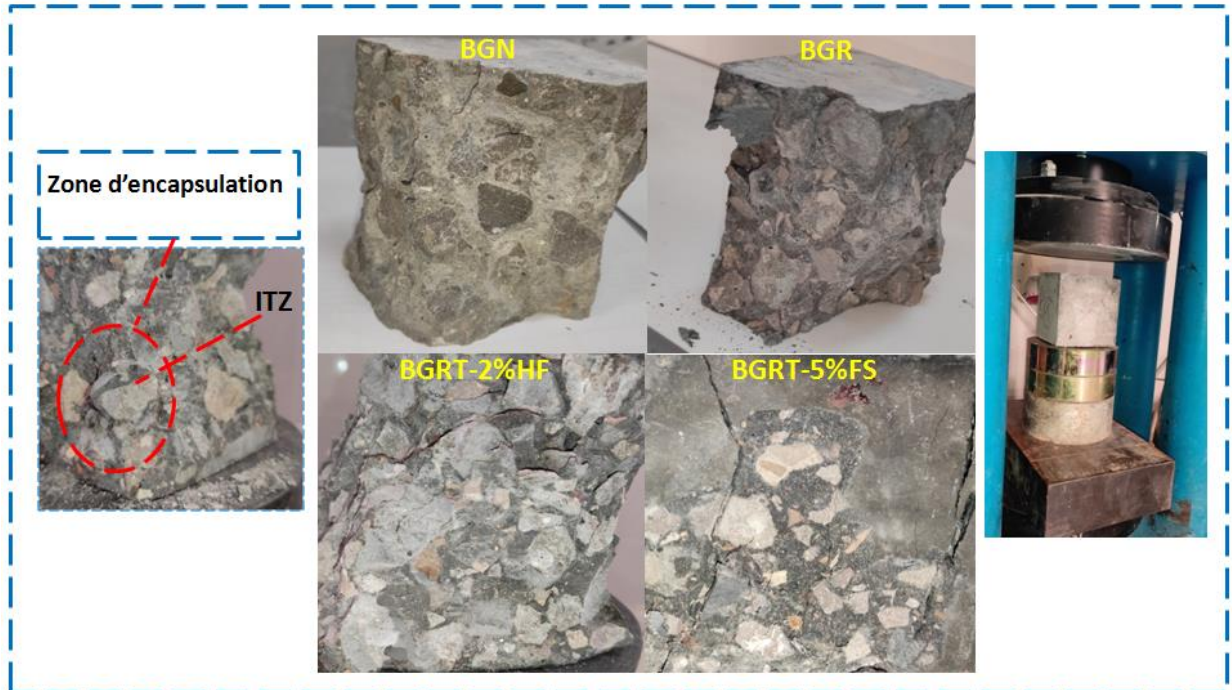


Figure. V. 3. Profil des Échantillons de 10 × 10 × 10 cm sous la presse, après la rupture.

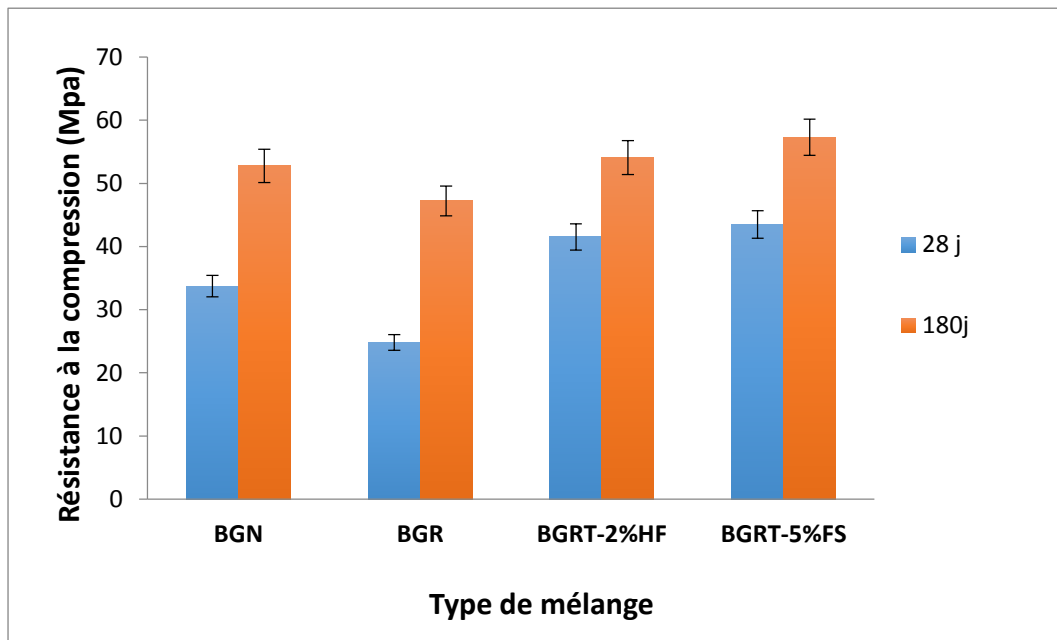


Figure. V. 4. Évaluation de la résistance à la compression des bétons après une cure de 28j et 180j.

V. 5. 2. Résistance à la traction par fendage

La figure. V.5 montre une amélioration significative de la résistance à la traction par fendage du béton après traitement d'encapsulation BGR. Les résultats montrent que le (BGRT-2%HF) présente une résistance à la traction par fendage supérieure à celle du BGR et du BGN, de 35.15 % et 8.59 % respectivement après une période de cure de 28 jours, et continue à dépasser ces valeurs de 21.65 % et 9.97 % respectivement, après une période de cure de 180 jours. De même, le (BGRT-5%FS) a montré une résistance à la traction par fendage plus élevée que celle du BGR et du BGN, de 31.78 % et 3.83 % respectivement après une période de cure de 28 jours, et continue à dépasser ces valeurs de 17.01 % et 4.64 % respectivement, après une période de cure de 180 jours.

L'excellente adhérence du BGRT au nouveau mortier provient des interactions intermoléculaires formées à l'interface entre les deux matériaux en raison de l'hydratation de la fumée de silice, générant un C-S-H supplémentaire, comme le soulignent les figures (8-9) et fig200 MEB [280]. Ces résultats sont confirmés par des recherches antérieures, y compris les articles [115], [121] sur le fendage [276], [281], [282].

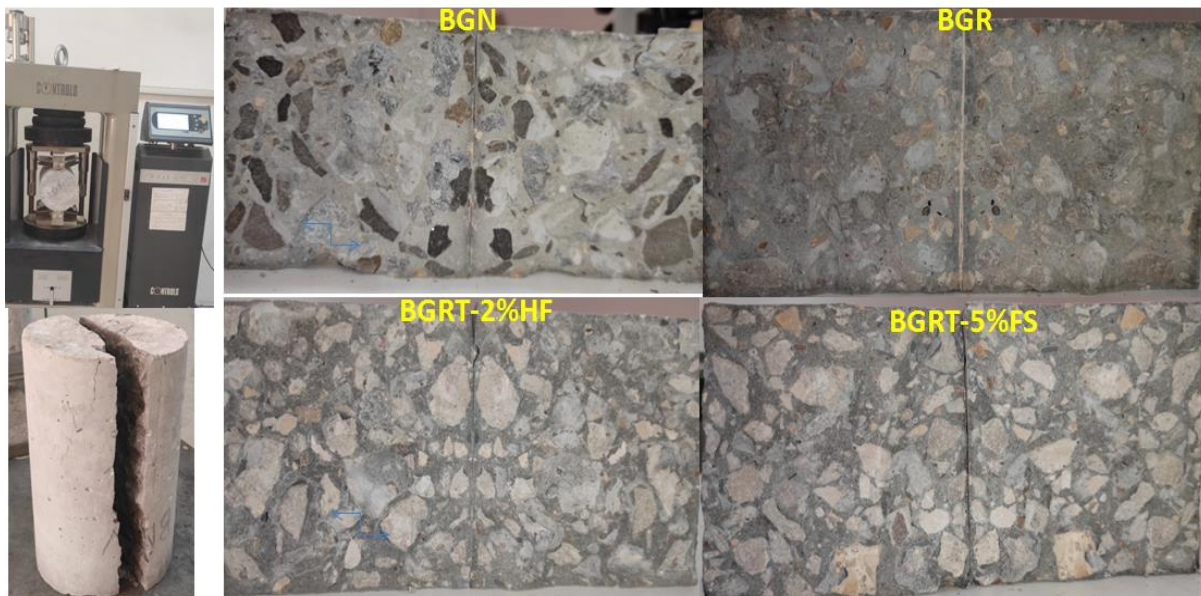


Figure. V. 5. Profil des Échantillons de (10 × 10 × 10) cm sous l'action de traction par fendage après une cure de 28j et 180j.

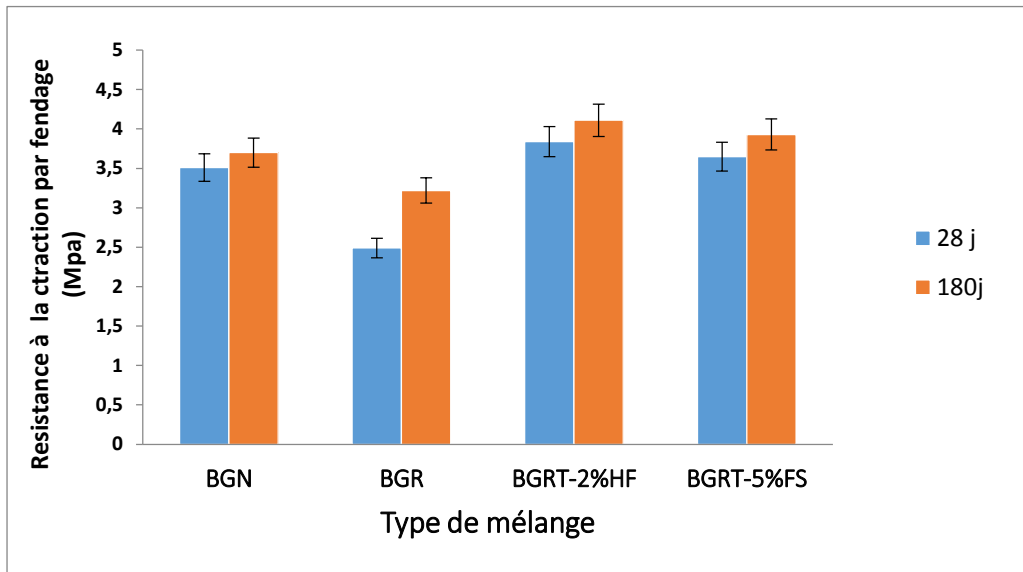


Figure. V. 6. Évaluation de la résistance à la traction par fendage des bétons après une cure de 28j et 180j.

V. 5. 3. Porosité accessible à l'eau

La figure. V.7 indique qu'après la cure des (BGRT), la porosité a connu une augmentation significative. En effet, après une période de durcissement de 28 j la porosité de (BGRT-2%HF) était supérieure de 6,71 % à celle de (BGR) et de 38,57 % à celle de (BGN).

Cependant, après 545 jours de durcissement, la figure. V.7 révèle une diminution de la porosité de (BGRT-2%HF), qui est inférieure de (-12,20 %) à celle de (BGR), tout en restant supérieure de (+8,59 %) par rapport à (BGN), observant ainsi une amélioration de la porosité à long terme. De plus, l'encapsulation des GBR avec 5 % de FS a entraîné une diminution de sa porosité par rapport à (BGRT-2%HF).

Après 28 jours de durcissement, la porosité de (BGRT-5%FS) a dépassé celle de (BGR) de (+4,93) % et celle de (BGN) de (+37,39) %. Néanmoins, après 545 jours de durcissement, la figure. V.7 montre une réduction très importante de la porosité de (BGRT-5%FS), qui est inférieure de (-28,20) % à celle de (BGR), et légèrement inférieure de -0,31 % par rapport à (BGN). Ces résultats indiquent une amélioration de la porosité de (BGRT-5%FS) sur le long terme 545 jours. Divers auteurs [30], [154], [230] ont rapporté des résultats similaires, renforçant les tendances observées.

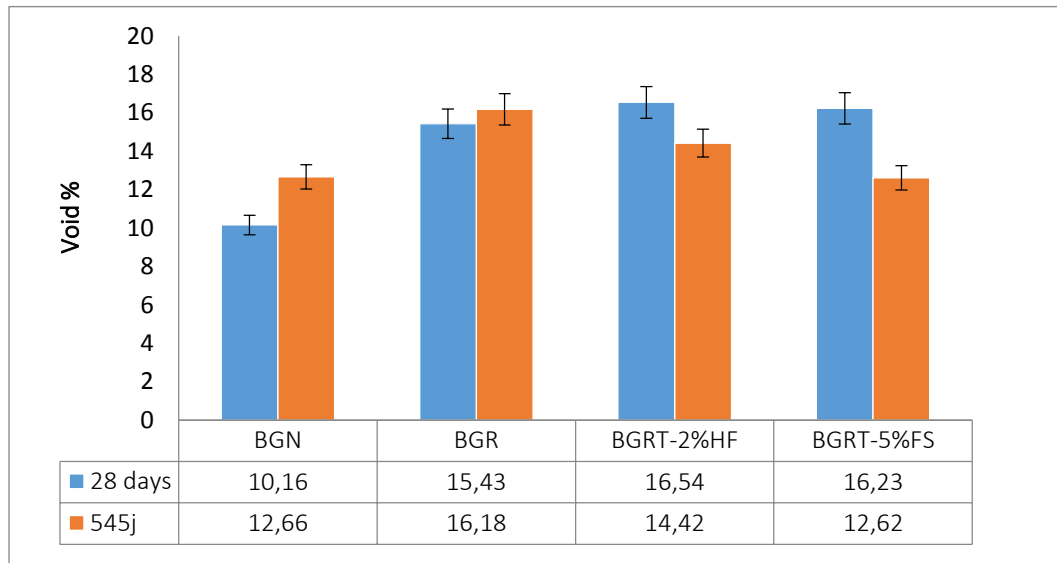


Figure. V. 7. Évaluation de la porosité accessible à l'eau des différents bétons

V. 5. 4. L'absorption par immersion

La figure V.8 illustre l'absorption d'eau du BGRT après 28 j et 545 jours de durcissement. Le coefficient d'absorption du (BGRT-2%HF) a augmenté de manière significative. Il a dépassé celui du BGR et du BGN de 2.47 % et 40.79 %, respectivement, après 28 jours de cure.

Après 545 jours de durcissement, la figure 8 montre une diminution de l'absorption du BGRT-2%HF, (-48.06 %) inférieure à celle du BGR et (-0.33 %) inférieure à celle du BGN.

L'encapsulation du GBR avec 5 % de FS dans le BGRT-5%FS a marqué une augmentation de l'absorption. Après 28 jours de cure, cette absorption a dépassé celle du BGR et du BGN de 1.38 % et 40.13 % respectivement.

Après 545 jours de durcissement, la figure. V.8 montre une diminution de l'absorption très importante du GBRT-5%-FS, qui est de l'ordre de (-51.97%) inférieure à celle du BGR et (-0.89 %) inférieure à celle du BGN.

Les résultats ont montré que l'amélioration en termes de l'absorption était en faveur de BGRT-5%FS. La cure prolongée du BGRT-5%FS affecte l'absorption de la même manière que la porosité. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'autres auteurs [74], [283]. La réduction de la porosité et de l'absorption du BGRT est attribuée aux réactions d'hydratation qui continuent à créer des produits d'hydratation denses, remplissant les vides. Güneyisi et al. [181] dans leur étude menée par Tam VWY [20], confirment les résultats obtenus.

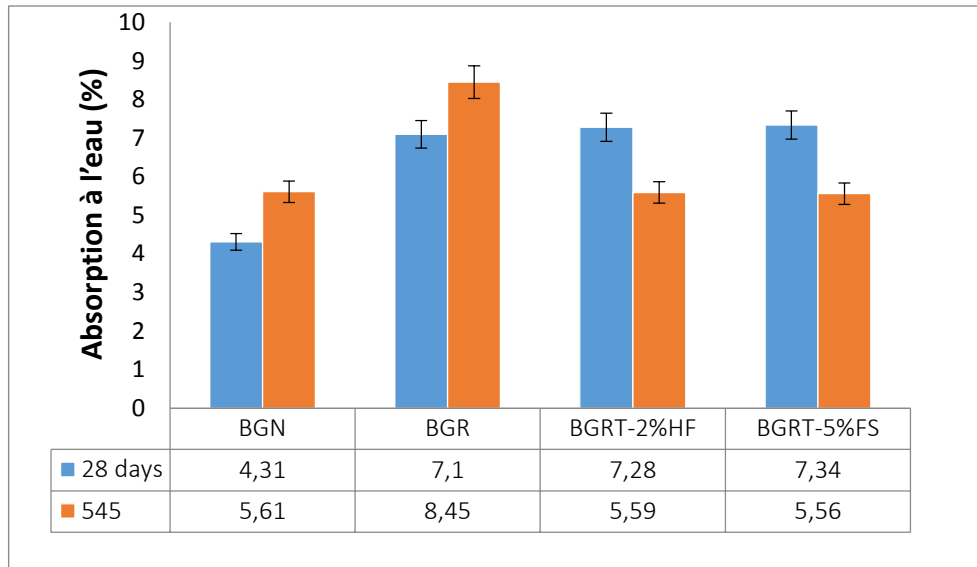


Figure. V. 8. Évaluation de l'absorption par immersion des différents bétons.

V. 5. 5. L'absorption capillaire

La figure. V. 9 montre que l'encapsulation des GBR à 5 % de FS ou à 2 % HF, incorporée dans le BGRT, s'est révélée totalement inefficace à court terme (28 jours) en termes d'absorption capillaire. Les résultats présentés dans la figure. V.10 montrent que le BGR a légèrement surpassé le BGN en termes d'absorption capillaire après 545 jours. En outre, l'encapsulation du GBR avec 5 % de FS a entraîné à une réduction marquée de l'absorption capillaire. Les valeurs mesurées pour les BGRT-5%FS étaient inférieures à celles des mélanges (BGRT-2%HF, BGR et BGN), avec des diminutions respectives de -250 %, -350 % et -450 % après une cure de 545 jours comme indiqué sur la figure. V.10 L'amélioration observée dans l'absorption capillaire du GBR encapsulé avec 5 % de FS peut être attribuée à la réaction pouzzolanique, qui génère de nouveaux produits C-S-H. Ces produits contribuent à réduire la porosité capillaire au fil du temps. En revanche, le traitement du GBR avec 2 % d'HF s'est avéré inefficace, entraînant une augmentation notable de l'absorption capillaire, dépassant trois fois celle observée pour l'encapsulation par FS.

Ces résultats démontrent aussi l'effet positif de l'encapsulation sur les propriétés de durabilité. Ce phénomène peut s'expliquer par l'amélioration de la (ITZ), entre le ciment et l'agrégat (ITZ) due à l'encapsulation avec la fumée de silice qui rend le réseau capillaire plus complexe et rend la pénétration de l'eau plus lente et difficile, surtout à long terme

Les pores capillaires, essentiels à la durabilité du béton, jouent un rôle crucial dans le transport des substances au sein du ciment hydraté. Leur taille varie généralement entre 10 nm et 100 µm, bien que la majorité soit inférieure à 100 nm. Ces pores se forment en raison de l'excès d'eau dans le mélange de béton, qui ne peut pas se lier chimiquement aux produits d'hydratation

ni se fixer dans les phases de C-S-H. La quantité et la structure des pores capillaires sont donc fortement influencées par le rapport E/C. Le degré d'hydratation du mélange, et les conditions d'encapsulation. Contrairement aux vides d'air, la structure des pores capillaires évolue au fur et à mesure de l'hydratation, avec la formation de nouveaux produits d'hydratation qui remplacent progressivement l'eau libre et réduisent ainsi la proportion des pores capillaires [104]

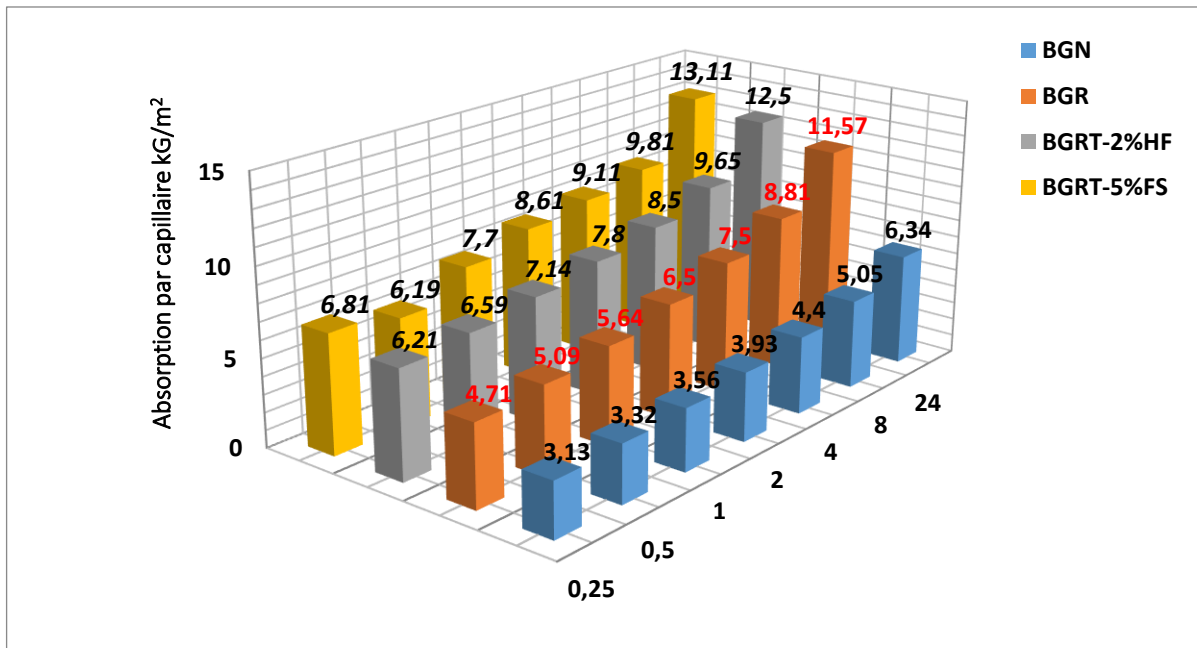


Figure. V. 9. Absorption d'eau par capillarité des différents bétons après 28j.

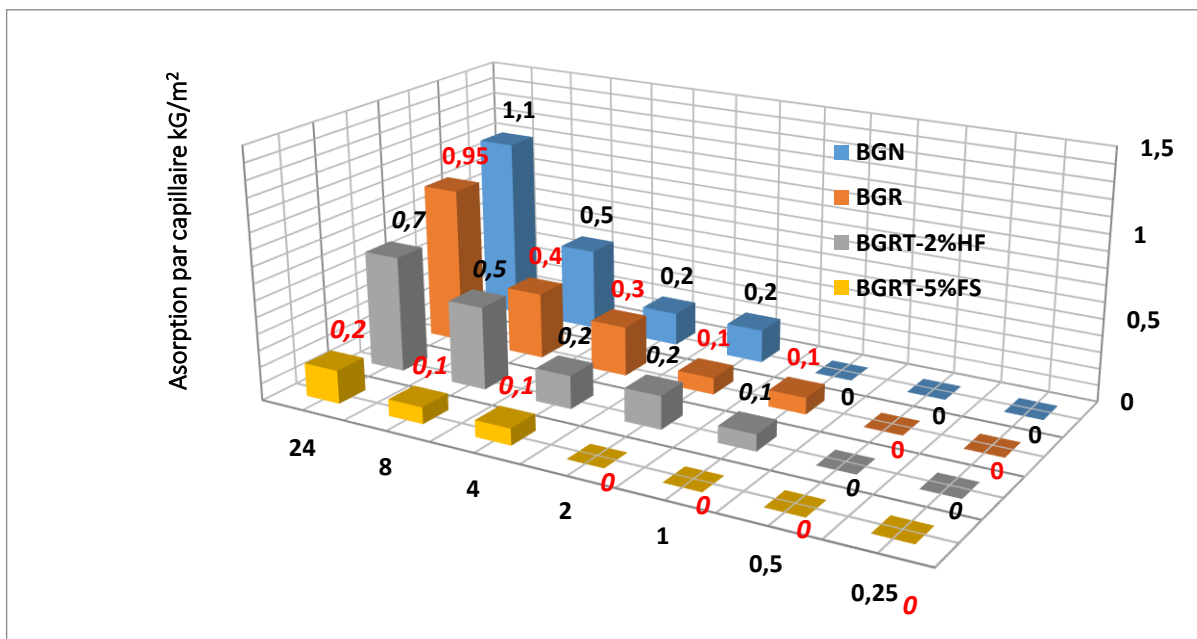


Figure. V. 10. Absorption d'eau par capillarité des différents bétons après 545j.

V. 5. 6. Analyse microstructurale (MEB-EDX) des GBRT

La microstructure et la morphologie des agrégats GBR, GBRT-2%HF et GBRT-5%FS ont été analysées à l'aide d'un microscope électronique à balayage combiné à une spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (MEB- EDX). Cette approche analytique a permis un examen détaillé et une analyse élémentaire des caractéristiques de surface des agrégats. La préparation des échantillons pour l'analyse MEB a suivi les procédures décrites dans la figure. V.11.

Après l'essai de fendage par traction, les spécimens (BGRT-2%HF) et (BGRT-5%FS) ont été soigneusement découpés en petites sections ; les échantillons ont été extraits pour une analyse au microscope électronique à balayage (MEB). Cependant, comme la microstructure poreuse de la matrice hétérogène de (BGRT-2%HF) et (BGRT-5%FS) sera considérablement altérée par un polissage direct, une solution a été adoptée en utilisant une résine époxy pour imprégner les pores et les vides de la matrice cimentaire de ces matériaux. Cette procédure a été réalisée dans le but de préserver la structure des pores de la matrice. Après l'enrobage, les échantillons ont été soumis à un processus de polissage à l'aide d'un papier abrasif de grain 400, 800 et 1 200 (SiC), à une vitesse de 1 000 tr/min pendant une demi-heure chacun. Une période équivalente a été consacrée au polissage de la surface de l'échantillon avec un abrasif spécial.

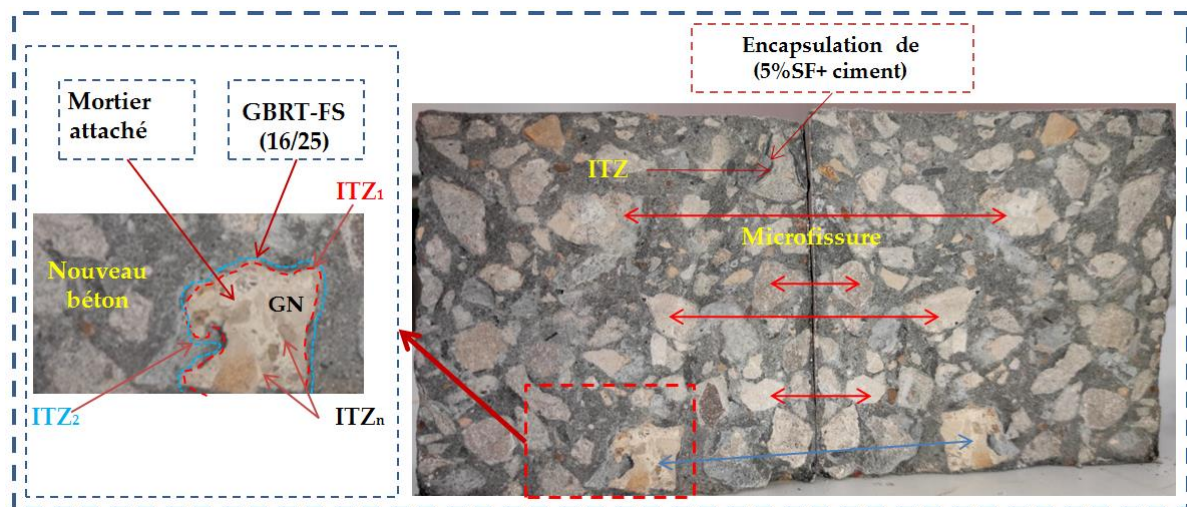


Figure. V. 11. Préparation de BGRT-5%FS et BGRT-2%HF pour (MEB).

La figure. V.12 montre des images au microscope électronique à balayage d'échantillons de BGRT-5%FS et BGRT-2%HF après 28 jours de durcissement. Elle met en évidence les caractéristiques morphologiques et microstructurales de l'(ITZ1) sur la surface interstitielle (encapsulation GBR). Les GBRT-5%SF ont une microstructure très dense et compacte qui assure une bonne adhérence. Leur morphologie interstitielle est presque semi-homogène en surface, avec de petites fissures visibles dans la matrice cimentaire.

L'image montre également que les phases ne sont pas claires et sont invisibles sous forme d'ettringite et de C-S-H. L'(ITZ1) apparaît presque uniforme en surface, indiquant une encapsulation efficace du GBR par le coulis (ciment + 5%FS).

L'analyse EDX figure. V.13 (a) confirme la présence des deux composants élémentaires (Si) et (Ca) dans le GBRT-5%SF. En revanche, l'image des GBRT-2%HF a révélé des micropores et des fissures dans la matrice, indiquant un faible (ITZ1) (voir figure. V.13 (b)) De plus, l'image obtenue au microscope électronique à balayage (MEB) montre un certain nombre de phases visibles sous forme d'ettringite ainsi que de phases C-S-H (voir la figure 8B).

On observe également un nombre accru de phases visibles de portlandite sous forme de plaques hexagonales. L'analyse EDX a confirmé l'absence totale d'éléments silicium (Si), qui interfèrent avec la formation de C-S-H, avec la présence exclusive du composant élémentaire Ca dans la figure (figure. V.13 (b)).

Ainsi, nous concluons que l'ITZ1 de GBRT-5%FS présente une cohésion dans l'interface (GBR/encapsulation), conformément aux données recueillies dans la littérature. Ceci est attribué à la propriété active de (FS) lorsqu'elle est incorporée dans la matrice d'encapsulation. Cette incorporation améliore la gravité spécifique de l'agrégat recyclé, ce qui entraîne une augmentation de la densité.

L'homogénéité de la surface est améliorée en réduisant l'absorption, augmentant les caractéristiques mécaniques de l'ITZ1 et la durabilité [70] Les travaux de Zhou et al. [74], Singh et al. [62]. Tam VWY. [20] Li, L., Xuan, Güneysis et al. [181] confirment ces observations.

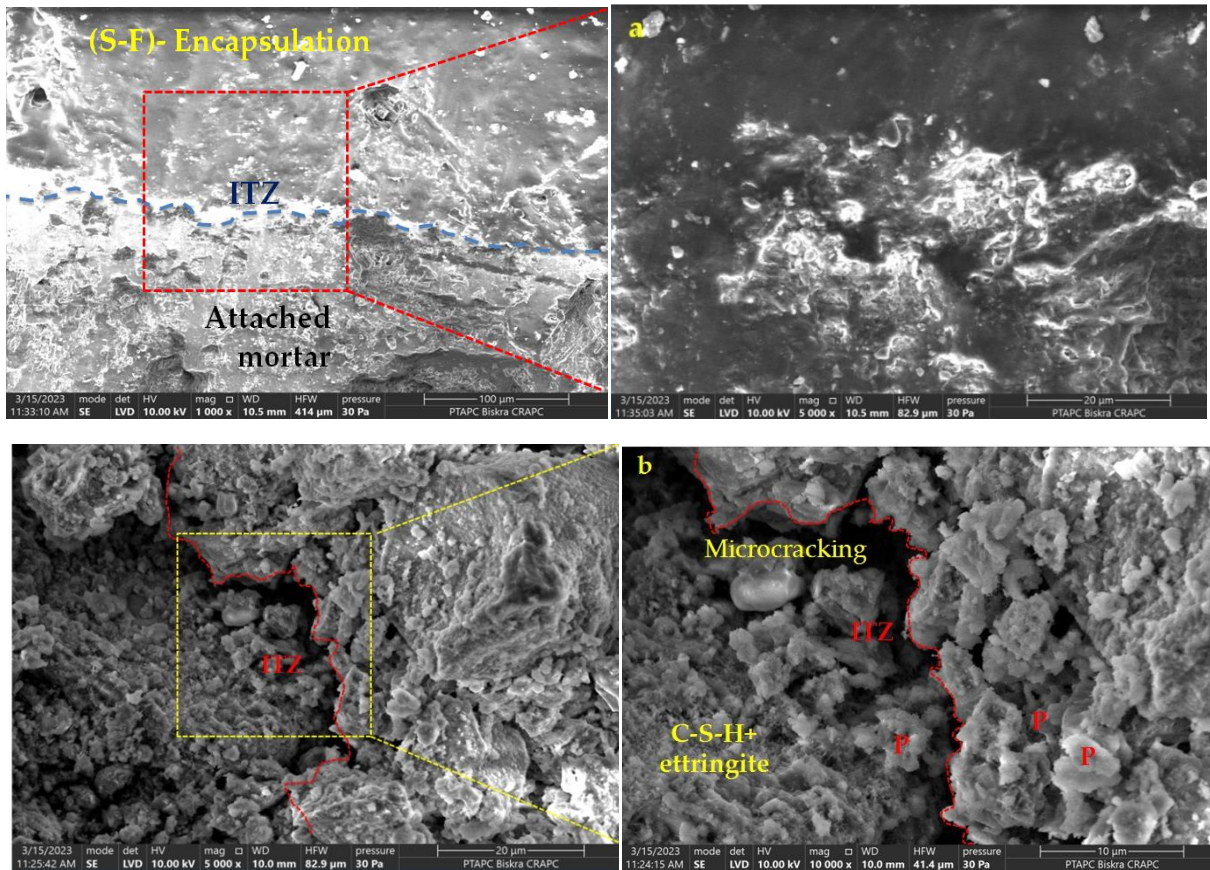


Figure. V. 12. Images MEB : (a) - GBRT-5%FS, contact homogène ; (b) - GBRT-2%HF, contact hétérogène, illustrant la morphologie de la microfissuration de l'ITZ1 et de la matrice d'encapsulation.

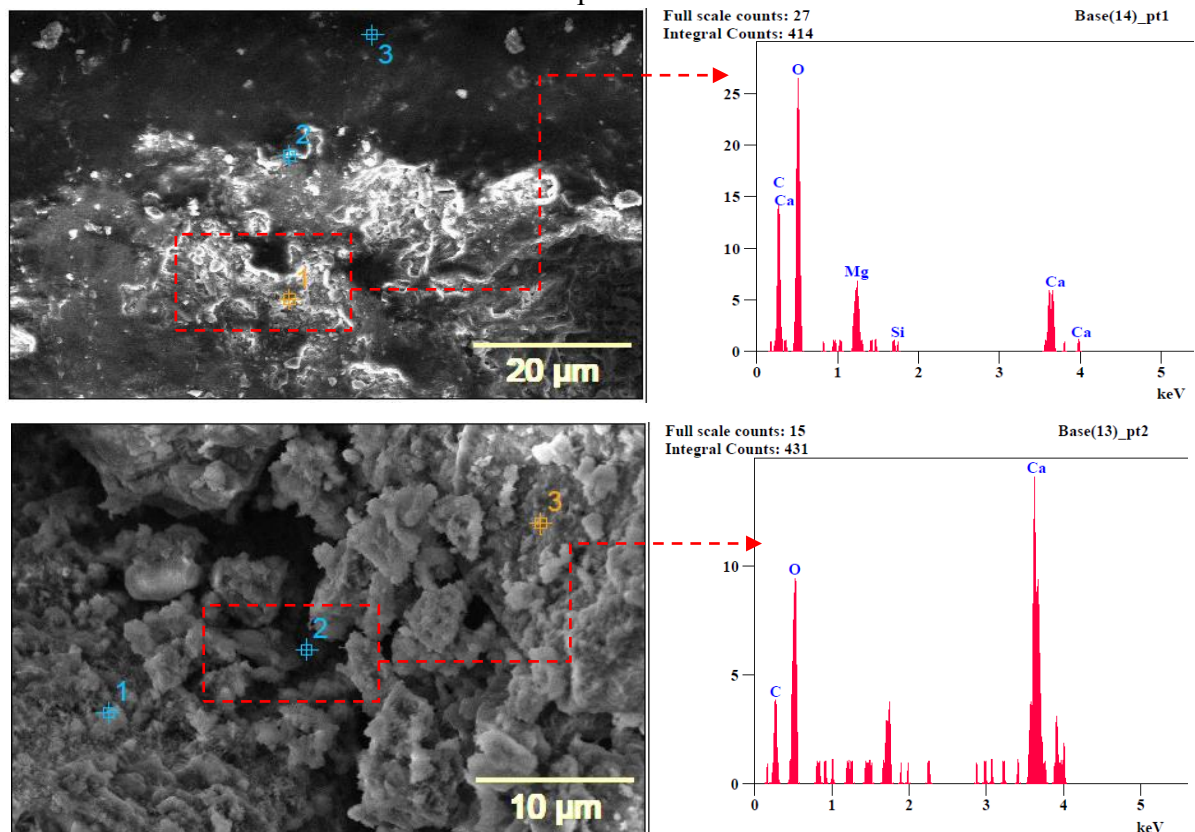


Figure. V. 13. Résultats EDX de (ITZ1) : (a) - GBRT-5%FS, (b) - GBRT-2%HF.

Les indicateurs de durabilité généraux : résistance mécanique ($R_C + R_{tf}$), absorption capillaire, porosité, ainsi qu'une analyse MEB-EDX sont évalués pour déduire le traitement efficace des GBR (5% FS ou 2% HF) afin de déterminer les Indicateurs de durabilité spécifiques Vis-à-vis de l'attaque Chimique. Les résultats obtenus sont en faveur du (BGRT-5%FS).

V. 6. INDICATEURS DE DURABILITÉ SPÉCIFIQUE VIS A VIS DES ATTAQUES CHIMIQUES

L'évaluation de la durabilité du BGRT-5%FS ainsi que les BGN et BGR (témoins) dans les milieux agressifs a été réalisée en laboratoire afin d'examiner leur comportement face aux attaques chimiques. Les milieux d'exposition ont été choisis en conformité avec la norme [ASTM C 1012-8995] pour l'attaque par les sulfates [284] et la norme [ASTM C 267-97] [285] pour l'attaque acide.

La détérioration du BGRT-5%FS et des bétons témoins a été étudiée sous l'effet des milieux agressifs accélérés, Cette analyse a intégré des méthodes de test pour les indicateurs de durabilité spécifiques en analysant les échantillons (L'inspection visuelle à l'échelle macroscopique) et en évaluant la perte de masse, la chute de la résistance à la compression des divers échantillons après l'attaque chimique ainsi qu'une caractérisation microscopique après exposition est menée. Des essais FRX et FTIR et thermogravimétriques (ATG) sont effectués pour une interprétation approfondie des résultats.

Les échantillons exposés au milieu agressif sont des éprouvettes cubiques ($100 \times 100 \times 100$) sont âgées de 28 jours (conservées dans l'eau dans un premier temps), sont séchées à 40 ± 2 °C puis pesées à 20 ± 2 °C avant d'être immerger dans les solutions agressives. Ils sont périodiquement retirés des solutions, essuyées et puis pesées à 1, 7, 14, 30, 60 et 90 jours d'exposition. Le pH des solutions agressives a été vérifié chaque semaine par un pH-mètre

La figure. V.14 pour assurer que le milieu conserve son degré d'agressivité.

Les échantillons sont divisés en 3 séries :

1- la première série : éprouvettes (BGN, BGR et BGRT-5%FS) conservées dans l'eau comme témoins.

2- Les deuxièmes séries: éprouvettes (BGN, BGR et BGRT-5%FS) immergées dans une solution d'acide à (acide sulfurique) (5 % H_2SO_4).

3-La troisième série: (BGN, BGR et BGRT-5%FS) immergées dans une solution du sulfate d'hydrogène à chlorhydrique (5% HCl).

La concentration de 5% stimule un environnement très agressif, ce qui reflète une attaque chimique accélérée (figure V.14).



Figure. V. 14. Vérification instantané de la valeur de pH.

V. 6. 1. L'inspection visuelle

Les parties attaquées des échantillons des différents bétons ont été nettoyées à l'aide d'un dé ioniseur ; L'attaque par les acides a été évaluée tous les 15 jours, d'abord visuellement en examinant l'état des surfaces.

Les figures. V. 15 et 16 illustrent l'état des différentes éprouvettes à court terme 24h, moyen terme (14j ,30 j) et à long terme (60 j et 90 jours), conservées dans les différentes solutions (l'eau, 5% H₂SO₄ , 5% HCl).

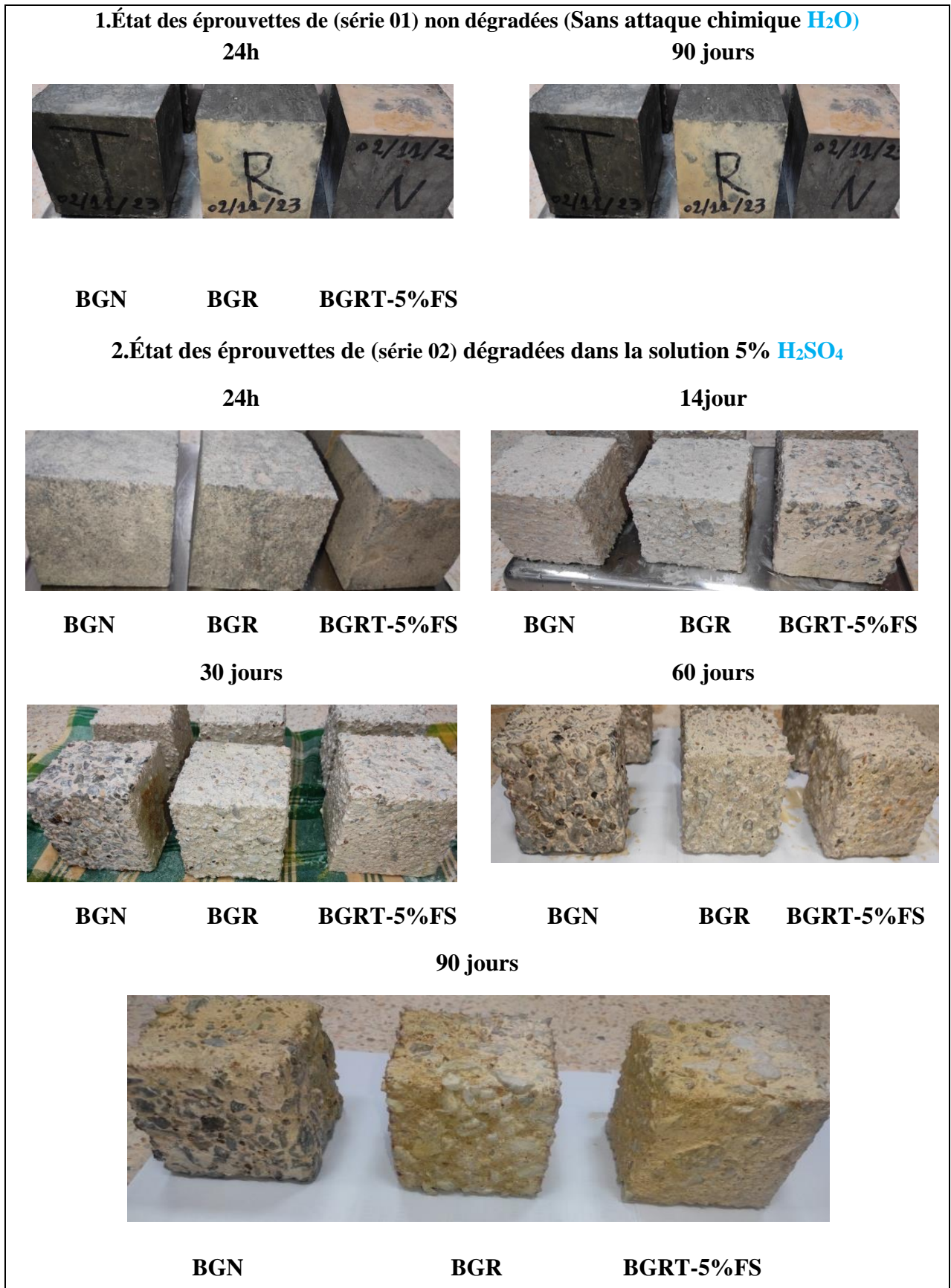


Figure. V. 15. État des éprouvettes des bétons étudiés dans la solution 5% H₂SO₄ en fonction du temps d'immersion.

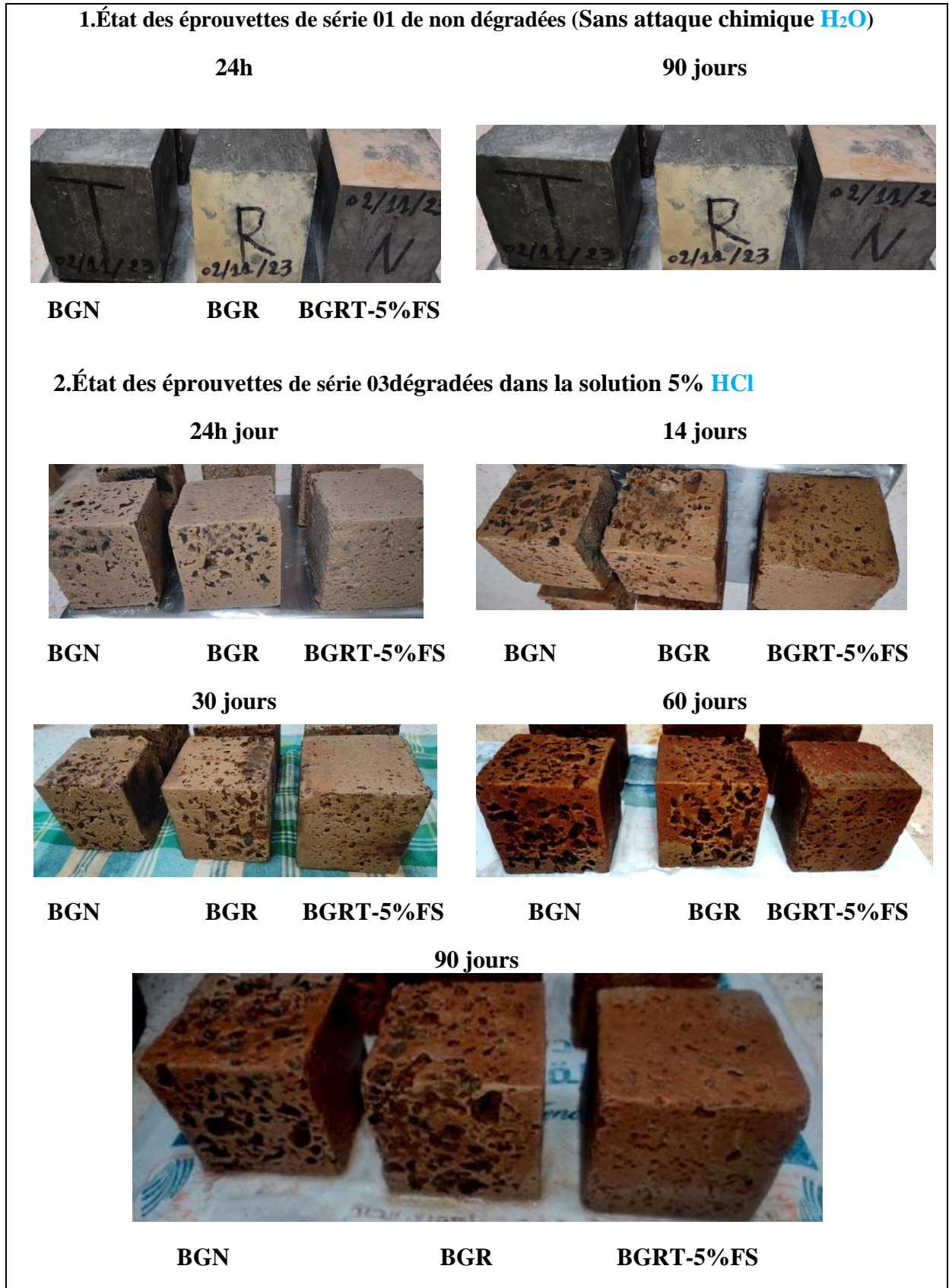


Figure. V. 16. État des éprouvettes des bétons étudiés dans la solution 5% HCl en fonction du temps d'immersion.

Les figures montrent qu' après 30 jours d'immersion dans les solutions agressives, les éprouvettes commencent à marquer des dégradations qui s'accroissent après 90j d'immersion, ces dégradations ne sont pas du même ordre : ils sont plus marquées dans les BGN et BGR , par contre les (BGRT-5%FS) semblent être peu affectés en particulier dans la solution de 5% HCl.

V.6.2. Perte du poids

L'attaque par les acides a été évaluée tout le 1, 14,30, 60, et 90 jours par mesure des changements de poids des échantillons déterminés comme suit :

$$\text{Perte de poids } P \% = \frac{M2-M1}{M1} \quad (V. 1)$$

M1: est le poids de l'éprouvette avant immersion

M2 : est le poids de nettoyé l'éprouvette après immersion.

Le tableau 3 regroupe les pertes de masse des différents bétons dans les différentes solutions en fonction du temps d'immersion.

Tableau. V. 3. La perte de poids en (%) des éprouvettes des bétons étudiée conservées dans milieux 5% HCl, 5% H₂SO₄ et H₂O, au cours du temps.

mélange	Milieu de conservation	P (%) en fonction de temps (jours)				
		(24H)	15	30	60	90
Série01	BGN	0,04	0,04	0,04	0,08	0,09
	BGR	0	0,13	0,13	0,21	0,23
	BGRT+5%FS	0,94	0,12	0,12	0,21	0,22
Série02	BGN	-1,19	-6,75	-8,09	-15,41	-16,95
	BGR	-1,24	-8,72	-9,87	-17,22	-18,20
	BGRT+5%FS	-1,16	-6,06	-7,90	-13,8	-15,92
Série03	BGN	-6,79	-7,25	-7,42	-8,26	-8,48
	BGR	-5,44	-6,04	-6,29	-7,53	-7,61
	BGRT+5%FS	-4,66	-5,04	-5,17	-5,90	-6,02

*Le gras détermine les valeurs liées au béton de référence

1 - la première série des bétons (BGN+BGR+ BGRT-5%FS) immergés dans l'eau présente une perte de masse négligeable à court et à long terme.

2- La deuxième série des bétons (BGN+BGR+ BGRT-5%FS) immergés dans l'Acide sulfurique H_2SO_4 présente une très légère et lente perte de masse après 24 heures d'immersion. Ou les (BGRT-5%FS) ont marqué un taux de perte total inférieur à celui des BGR et BGN estimé à 6,9% et 2,58 % respectivement sur une période de 24h.

Dans la période de 15j : la perte de masse augmente rapidement, les (BGRT-5%FS) ont marqué la petite perte en comparaison avec les BGR et BGN, avec un taux considérable estimé à 43,90 % et 11,39 % respectivement sur une période de 15 jours.

Dans la période de 30j : La perte de masse se poursuit, nous avons constaté l'effet bénéfique de l'encapsulation pour les (BGRT-5%FS) ou le taux de perte total est inférieur à celui de BGR et BGN, estimé à 24,94 % et 2,40 % respectivement sur une période de 30jours.

Dans la période de 60j : La perte de masse se poursuit, Le taux de perte total dans les (BGRT-5%FS) est inférieur à celui des BGR et BGN de 24,78 % et 11,66 % respectivement.

Dans la période de 90j : La perte de masse se poursuit, le taux de perte total dans les (BGRT-5%FS) est inférieur à celui des BGR et BGN de 14,32 % et 6,347% respectivement sur une période de 3 mois.

3- La troisième série des bétons (BGN+BGR+BGRT-5%FS) immergés dans l'acide HCL présente une perte de masse importante en peu de temps (24 h), ou les (BGRT-5%FS) ont présenté un taux de perte total inférieur à celui des BGR et BGN, estimé à 16,74% et 45,71% respectivement .

Dans la période 15j : Après 15 jours, le taux de perte de masse reste presque constant.

Les (BGRT-5%FS) ont toujours présenté une résistance notable vis-à-vis du milieu agressif de HCL avec un taux de perte total inférieur à celui de BGR et BGN, estimé à 43,85% et 31,37 % respectivement.

Dans la période 30j : La perte de masse se poursuit, le (BGRT-5%FS) présente un taux de perte total inférieur à celui de BGR et BGN, estimé à 21,66 % et 43,52 % respectivement.

Dans la période 60j : La perte de masse se poursuit, le (BGRT-5%FS) présente un taux de perte total inférieur à celui de BGR et BGN, estimé à 6,61 % et 40 % respectivement.

Dans la période 90 j : La perte de masse se poursuit, le (BGRT-5%FS) présente un taux de perte total inférieur à celui de BGR et BGN, estimé à 26,41 % et 40,86% par rapport BGR et BGN respectivement.

Les figures figure V.17 et 18 illustrent les variations du poids des différents bétons conservés dans les milieux agressifs.

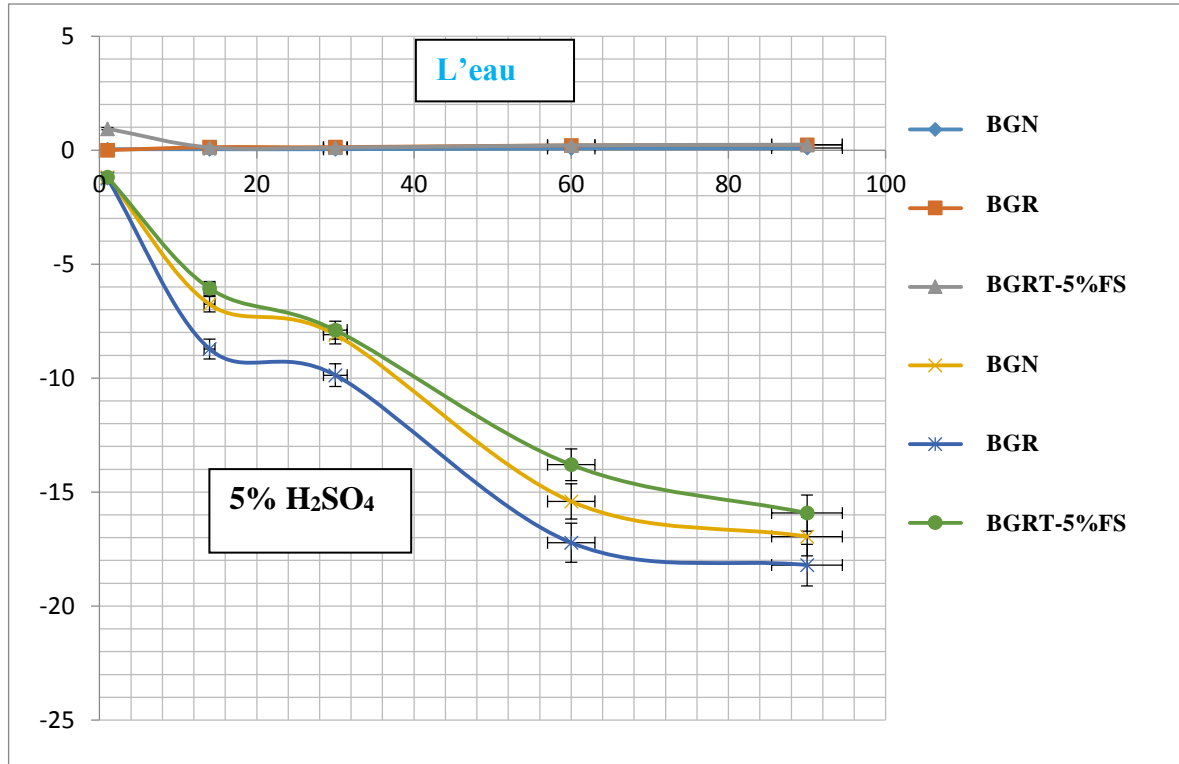


Figure. V. 17. Variations de poids des échantillons de béton conservés dans 5% H₂SO₄.

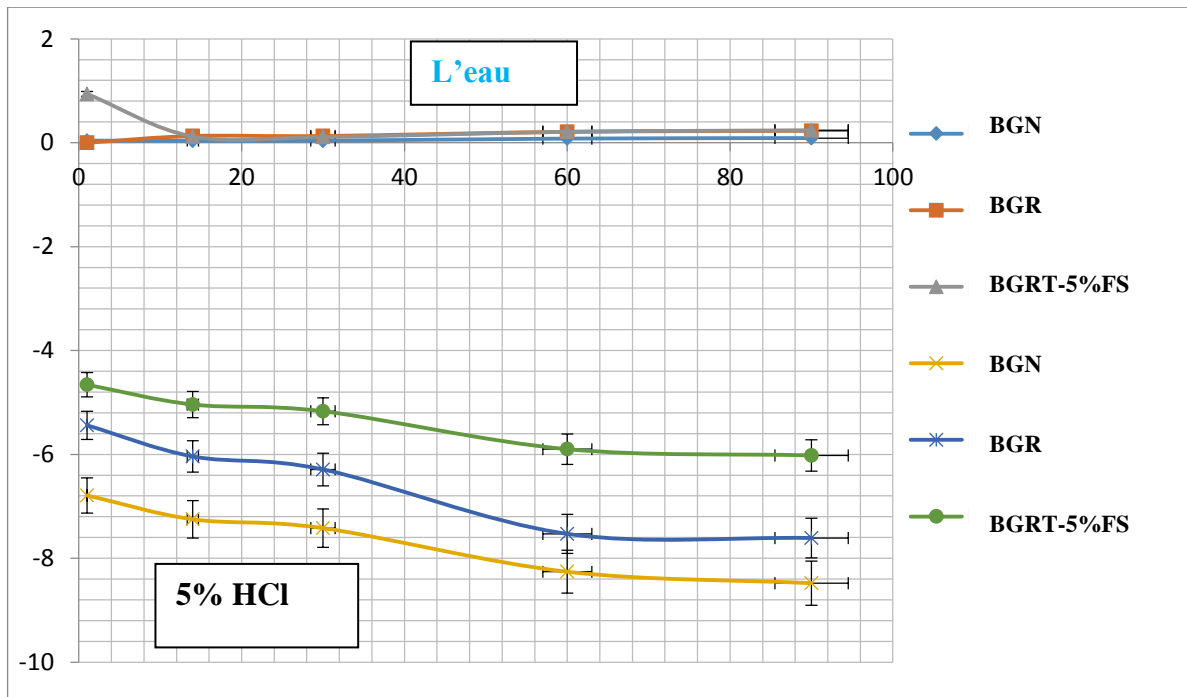


Figure. V. 18. Variations de poids des échantillons de béton conservés dans 5% HCl.

Après 90 jours de conservation La résistance mécanique en compression des échantillons de béton a été évaluée selon le test standard EN 12390-4 [286]. Tous les résultats obtenus sont la moyenne de trois valeurs.

V. 6. 3. EVALUATION DE LA PERTE DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

Les figures. V.19, 20 illustrent l'essai de compression et la perte de la résistance à la compression des échantillons de béton après 90 jours de conservation dans les solutions de H_2SO_4 (série 2) et HCL (série3), comparativement au béton durci pendant 90 jours dans l'eau (série 01). Les résultats mettent en évidence une détérioration notable des échantillons et marquent une chute de la résistance à la compression.

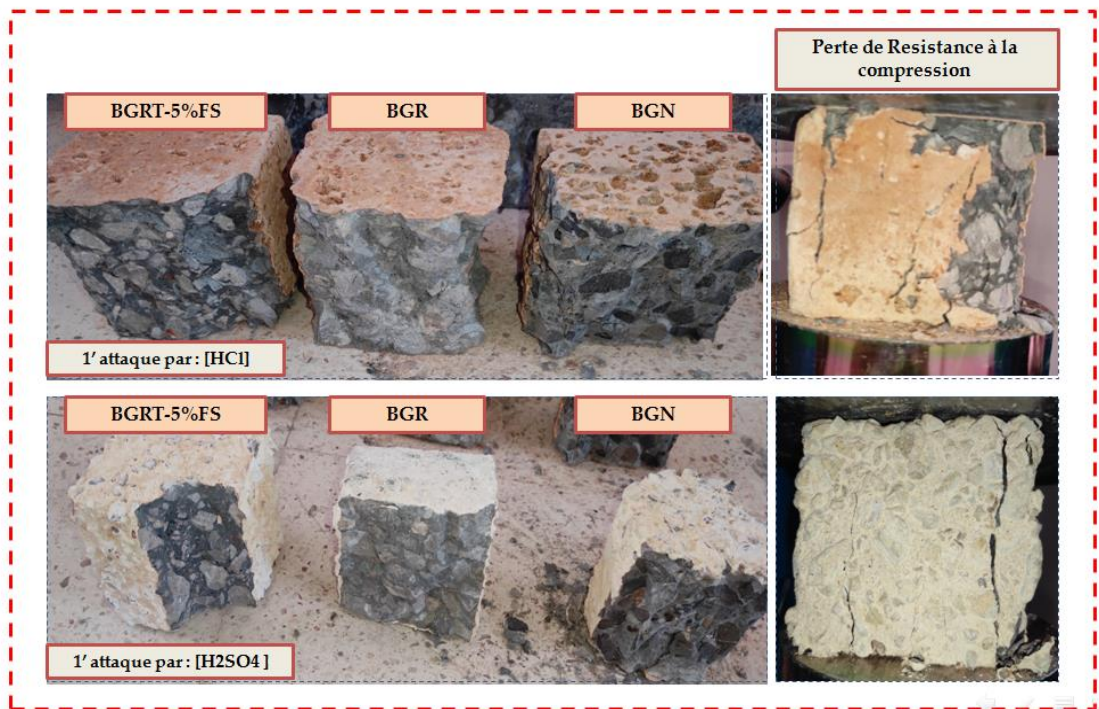


Figure. V. 19. Essai de compression après 90 jours de conservation en milieu agressif.

La figure V.20 illustre l'évaluation du potentiel de résistance à la compression dans un environnement agressif. Pour la série 02, la chute de résistance est estimée respectivement à (-253 %, -299,73 %, -171,08 %) pour les échantillons (BGN, BGR et BGRT-5%FS) par rapport à la série 01. Cette analyse révèle une réduction significative de la résistance dans la série 02, cependant, le BGRT-5%FS montre une meilleure performance que les BGN et BGR en termes de résistance à la compression. En outre La perte de résistance dans les BGR est supérieure à celle des BGN en raison de la présence de l'ancien mortier collé sur la surface de BGR. Concernant la série 03, la diminution de la résistance moyenne est estimée à (-97,42 %, -70,56 %, -35,34 %) pour les (BGN, BGR et BGRT-5%FS), respectivement, par rapport à la série 01.

Bien que la résistance soit également réduite dans la série 03, BGRT-5%FS se distingue par une performance supérieure à celle de BGN et BGR en matière de résistance à la compression dans la série 03.

En prenant en considération ces résultats, l'encapsulation des GBR, accompagnée de l'ajout de 5 % de FS dans le coulis de ciment, a révélé que le béton présente une bonne performance dans les milieux agressifs, notamment en milieu HCl, où il affiche un potentiel de résistance à la compression élevé. En revanche, en milieu agressif H₂SO₄, le potentiel de résistance du béton est significativement réduit, étant quatre fois inférieur à celui observé en milieu HCl.

Cela est attribué à la dégradation des gels C-S-H dans le milieu H₂SO₄, comme illustré dans l'équation (V. 2)

Le béton BGRT-5%FS présente une légère perte de poids par rapport aux bétons BGN et BGR, Cela est attribué à la pénétration des acides, qui dépendent de la porosité ouverte du BGR. Étant très absorbant, le BGR montre une pénétration accrue des acides, tandis que le BGN ne présente pas de résistance significative au H₂SO₄. Observation similaires [287][288].

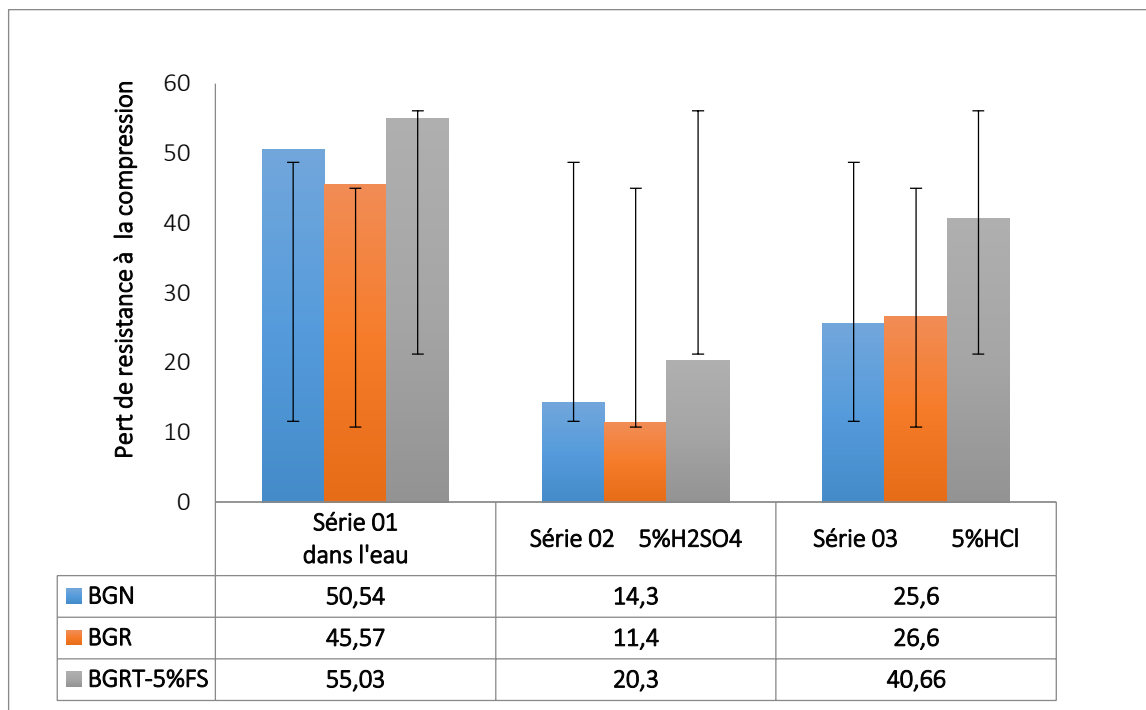


Figure. V. 20. Évaluation de la perte de résistance à la compression après 90 jours de conservation en milieu agressif.

La dégradation visuelle des éprouvettes commence après (14 à 30 jours). La figure V.15 montre qu'une couche de gypse s'est formée sur les éprouvettes de béton. Ce phénomène résulte de la réaction entre le H_2SO_4 et la portlandite ainsi que les gels de silicate de calcium hydraté (C-S-H) présents dans le béton, entraînant des réactions chimiques qui altèrent la structure du béton. L'équation chimique associée est la suivante :



V. 6. 4. Composants Minéralogiques

Il convient de noter que la deuxième série (BGN...BGR...BGRT-5%FS), exposée à l'attaque de H_2SO_4 , a présenté une diminution des composants minéralogiques : Quartz et dolomite par rapport à la série de référence 1. Et la troisième série exposée à HCl a. En revanche, une augmentation de la valeur de la calcite a été observée dans les séries (BGN...BGR...BGRT-5%FS) en comparaison avec la série 2.

Tableau. V. 4. Composition minéralogique (%) des bétons étudiée.

	Type de béton	Calcite	Dolomite	Quartz	Illite	Kaolinite	Albite	CO ₂ _DXR	
Série 01	BGN	63,84	7,85	26,6	1,48	0,19	0,04	31,82	
	[H ₂ O]	BGR	36,41	31,11	30,56	1,68	0	0,25	30,86
	de référence	BGRT-5%FS	31,39	34,34	32,56	1,55	0,01	0,14	30,19
Série 02	BGN	69,95	6,45	22,24	0,84	0,47	0,04	33,83	
	[H ₂ SO ₄]	BGR	38,36	34,87	24,93	0,36	1,2	0,29	33,51
	après l'attaque chimique	BGRT-5%FS	36,51	30,32	30,38	1,09	1,57	0,13	30,53
Série 03	BGN	65,22	6,64	24,51	2,56	0,77	0,24	31,85	
	[HCl]	BGR	24	42,36	31,52	0,87	0,85	0,4	30,77
	après l'attaque chimique	BGRT-5%FS	28,97	33,84	35,48	1,26	0,01	0,44	28,89

L'augmentation de la calcite est attribuée à l'apparition de colmatage après la réaction chimique avec H_2SO_4 , ce qui a conduit à une accumulation accrue de produits de calcite. L'acide sulfurique attaque les silicates de calcium, fragilisant ainsi le béton et entraînant des problèmes potentiels de résistance à la compression.

En plus La réaction de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) forme le gypse , selon l'équation chimique(V. 3) :



En outre, il se forme également de l'étringite, ce qui peut également entraîner des problèmes potentiels de résistance à la compression. La formation de l'étringite peut être représentée par l'équation (V. 4) :



En présence d'autres composés et sous certaines conditions, le sulfate de calcium peut se transformer en gypse et en étringite, ce qui contribue à la dégradation du béton GBRT-5%FS. Le sulfate de calcium peut se solubiliser ou se transformer en ces composés, entraînant une détérioration accrue du béton [287], [288].

En revanche, après 90 jours d'exposition à la solution de HCl, les bétons (BGRT-5%FS) ont montré une résistance significative à l'attaque acide comparativement aux bétons BGN et BGR, comme le montre la figure V.18.

La figure V.16 montre une couche superficielle de couleur marron formée sur les éprouvettes de béton, et que la dégradation des éprouvettes a commencé tôt dès 24 heures. Ce phénomène résulte de la réaction entre le HCl et la portlandite du béton, produisant un sel soluble. L'équation chimique (V. 5) de cette réaction est la suivante :



L'ajout de 5 % de FS dans le coulis d'encapsulation améliore la résistance à l'attaque acide grâce à la composition chimique et minéralogique de la matrice d'encapsulation, et à la réaction pouzzolanique. Cette réaction fixe la portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment, formant des gels C-S-H qui confèrent une bonne résistance à la compression à long terme. La réaction de HCl avec les gels C-S-H dans le béton est représentée par l'équation(V. 6) suivante :



Cette équation montre comment l'acide chlorhydrique attaque les gels de silicate de calcium hydraté dans le béton, entraînant une dégradation des éprouvettes et la formation de produits solubles. Le SiO_2 est libéré lors de la dégradation des gels C-S-H [287], [288].

Ces résultats soulignent les avantages de l'utilisation de fumée de silice, qui minimise la pénétration des agents agressifs et améliore l'intégrité de la (ITZ), pâte/granulat.

Les bétons BGRT+ FS, ayant absorbé l'eau d'hydratation durant les 7 premiers jours de cure, ont réduit leur rapport E/C réel à 0,4 au lieu de 0,56 pour le béton sans encapsulation [287], [288].

Dans le béton conventionnel, l'acide pénètre à travers la matrice et attaque le gel de ciment liant, ce qui entraîne des changements de poids et une perte de résistance. L'acide attaque principalement l'hydroxyde de calcium, formant du sulfate de calcium, qui réagit ensuite avec les aluminates de calcium pour produire de l'étringite secondaire. Cette étringite secondaire se dissocie en gel de silice, lequel peut être extrait par des forces physiques. Les ions chlorure jouent un rôle crucial en agissant comme activateurs, améliorant la lixiviation de l'hydroxyde de calcium. Ils réagissent également avec la couche C-S-H de plusieurs manières : ils peuvent être absorbés chimiquement par la couche externe de C-S-H, pénétrer entre les couches de C-S-H, ou interagir avec le C-S-H dans la matrice. Cette décalcification, associée à la formation de C-S-H poreux et à la lixiviation de l'hydroxyde de calcium pendant l'exposition aux acides, sulfures et chlorures, entraîne une détérioration des mélanges de béton [287]–[289].

Les résultats de cette étude sont conformes aux observations faites dans des recherches antérieures, qui montrent que le ciment composé offre une résistance aux sulfates supérieures à celle du ciment Portland. La réaction pouzzolanique génère un gel secondaire C-S-H, lequel améliore par la suite l'interface entre la pâte et les agrégats (ITZ) [290], [291].

L'encapsulation des GBR avec l'ajout de 5 % de fumée de silice (FS) au coulis du ciment contribue à la réduction des pores capillaires et à la formation de pores de gel, améliorant ainsi la (ITZ) pâte/granulat. Cela joue un rôle majeur dans l'amélioration de la résistance du béton à un âge précoce ainsi sa résistance aux attaques acides, comme observé par Ying et al. [292][232].

V. 6. 5. Mesure de l'alcalinité

Le test d'alcalinité a été réalisé pour évaluer l'état du BGRT-5%FS dans les deux milieux agressifs et dans le milieu de référence (conservé dans l'eau). Un béton sain doit avoir un pH compris entre 12 et 13, tandis que des valeurs entre 9 et 11 indiquent un état plutôt bon. Si le pH est compris entre 7 et 9, cela suggère que le béton est en phase de dégradation.

La figure V.21 illustre le test d'alcalinité des différents bétons.

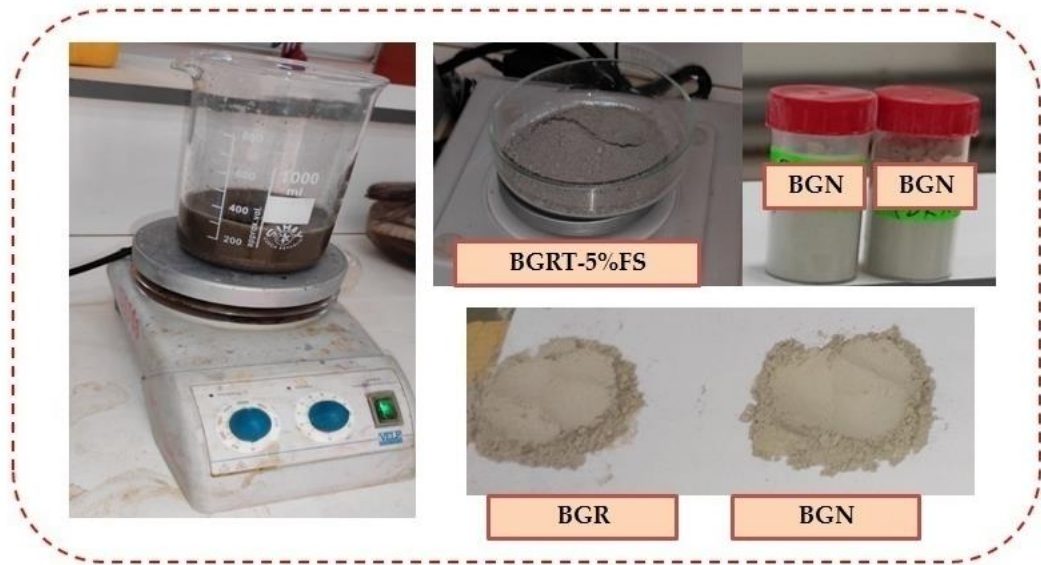


Figure. V. 21. La Configuration du test d'alcalinité.

Les résultats du test d'alcalinité sont présentés dans la figure. V.22. Il est clair que les mélanges de BGN présentent un faible potentiel d'agressivité chimique, tandis que le béton BGR a un potentiel moyen. Mais Il convient de noter que l'encapsulation des GBR entraîne un potentiel significatif face aux environnements agressifs, en raison de la présence de la fumée de silice.

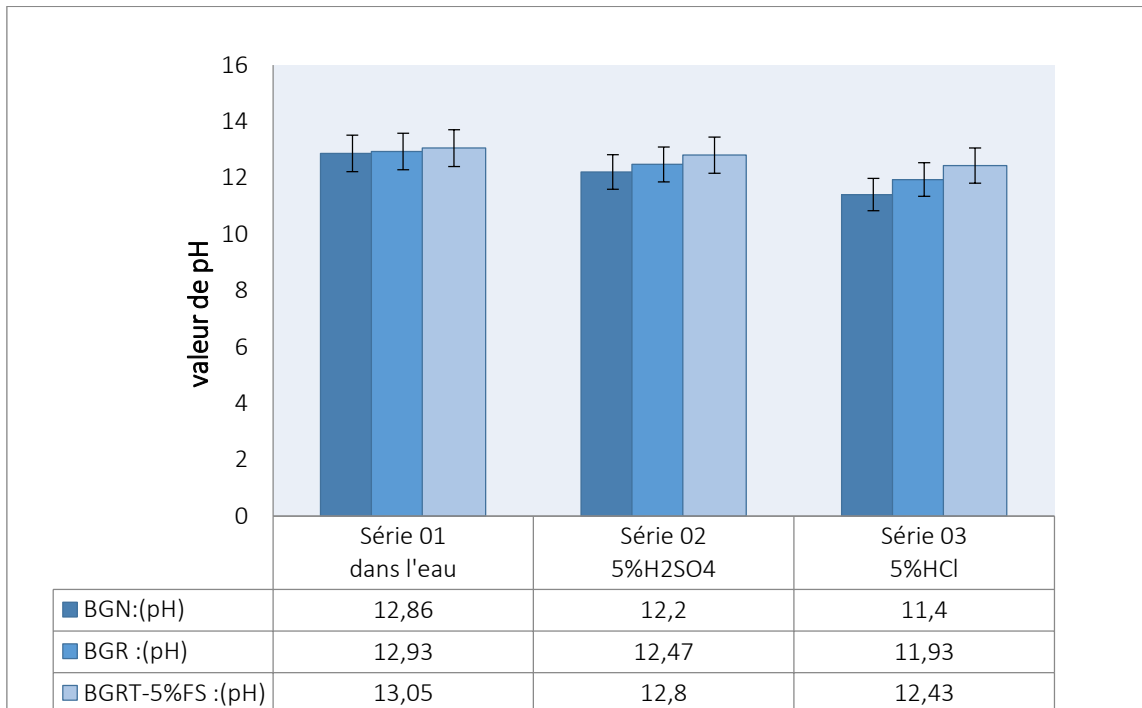


Figure. V. 22. Alcalinité des bétons étudiés dans divers milieux après 90 jours.

V. 6. 6. Analyse de la micro durté

La microdureté est un indicateur clé de la fragilité du matériau, déterminée pour évaluer la micro-dureté des (ITZn, ITZ1 et ITZ2), comprenant l'encapsulation, l'ancien mortier attaché, et le nouveau béton.

La figure. V.23 illustre les résultats obtenus pour la série des bétons BGRT-5%FS conservés pendant 3 mois dans : l'eau , la solution HCL et la solution H₂SO₄.

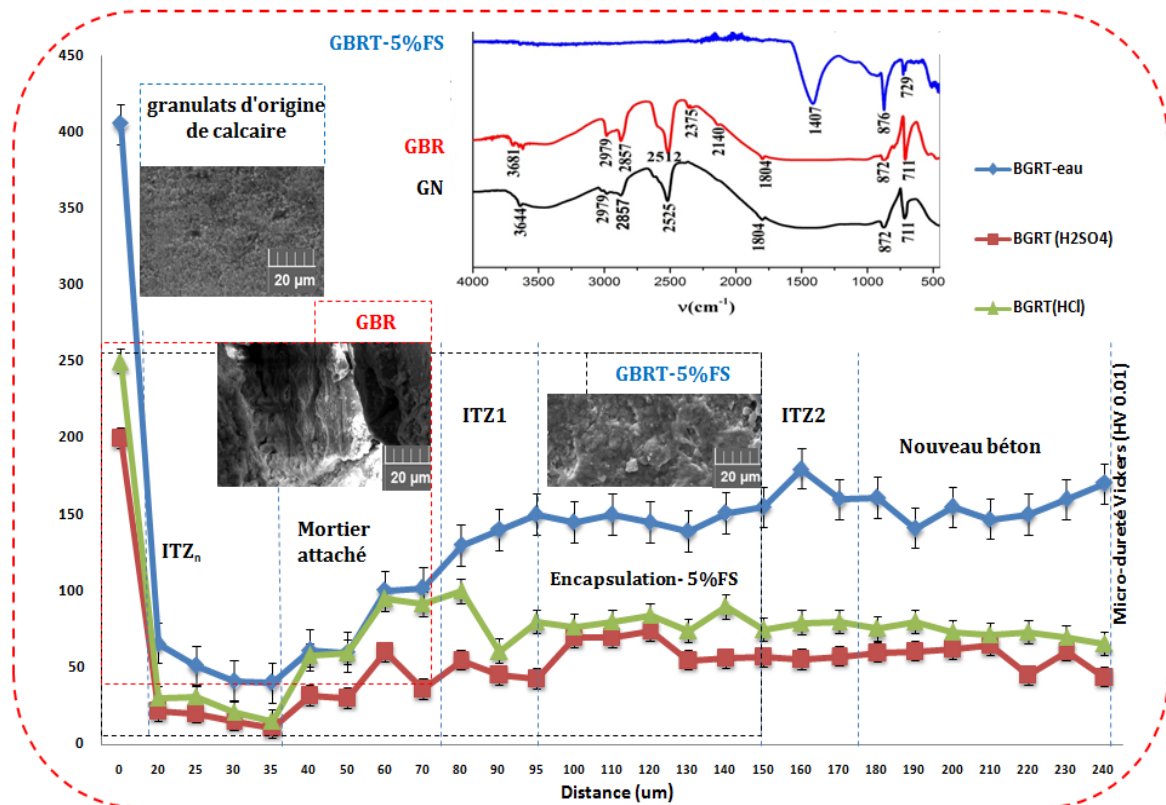


Figure. V. 23. La Micro-dureté des différentes zones (ITZn, ITZ1 et ITZ2) des bétons en fonction du milieu agressif.

Avant l'attaque chimique : Il a été observé que l'ancienne ITZn était systématiquement la zone la plus faible par rapport à la valeur de référence NA, qui est la plus élevée [293][294]. Les valeurs de dureté et de résistance de l'ITZn sont inférieures à celles des autres zones, indiquant une faiblesse de la microstructure. Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres études [61], [132]. Une augmentation de la dureté a été constatée dans la région de pré-encapsulation, ou plus précisément à proximité des zones d'encapsulation (ITZ1, ITZ2), comme le montre la figure. V.24. Cette augmentation est probablement due aux réactions chimiques de la fumée de silice présentant des propriétés pouzzolaniques et les nouvelles phases C-S-H, comme confirmé par l'analyse minéralogique XRD.

Après l'attaque chimique : Les zones l'ITZn, l'ITZ₁ et l'ITZ₂ étudiées après l'attaque chimique par H₂SO₄ et HCl, montrent une faible microdureté dans HCl et une très faible microdureté dans H₂SO₄ (figure. V.24). Cette diminution est attribuée à l'attaque chimique, entraînant la perte de plusieurs produits d'hydratation dans les zones ITZ1 et ITZ2, ainsi qu'à la décomposition des phases C-S-H, comme confirmé dans l'étude minéralogique DRX et l'équation (V. 2) . Des observations similaires ont été précédemment rapportées [74], [295], [296].

Les résultats des spectres FTIR sont confirmés par les résultats obtenus pour les trois types de granulats (GN, GBR et GBRT-5%FS), qui, sous forme de zones solides représentées, sont illustrés sur la Figure V.23 (région 500–4000 cm⁻¹). Pour les GN ,une bande observée à 729 cm⁻¹ pour Si-O quartz et à 872 , 1407 cm⁻¹ pour CO₃⁻²calcite. Pour les GR des pics majeurs à 872 et 711cm⁻¹ et des pics mineurs à 2530–2550 et 1812–1818 cm⁻¹ qui sont liés aux modes d'étirement et de flexion des groupes CO₃⁻² . Les pics d'absorption de la dolomite vers 2525 et 711 cm⁻¹ se situent entre ceux de la calcite et de la magnésite (MgCO₃). Mais 3644 liés aux modes d'étirement et de flexion des groupes OH 2979 ; à 2867- 2636-2525 CO₃⁻²dolomite, à 1804-872 CO₃⁻²calcite et à 711 CO₃⁻²calcite.Pour l'encapsulation on observe à 711 CO₃⁻²et 872 CO₃⁻²calcite , de 1804 à 2340-2512 CO₃⁻²dolomite et à 2873 un faible Mg calcite et des groupes OH 3681.

V. 7. CONCLUSION

Un traitement complémentaire par l'ajout de 5% de la fumée de silice et 2% de l'agent hydrofuge au coulis d'encapsulation a largement amélioré les indicateurs de durabilité généraux des bétons.

Les (BGRT-5%FS) sont exposés à des conditions d'agressivité accélérées, les indicateurs de durabilité spéciaux sont déterminés après trois mois d'exposition.

Les résultats obtenus dans cette partie permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les (BGRT-5%FS) présentent une amélioration significative de la résistance à la compression à long terme par rapport aux BGR et des BGN, avec des augmentations respectives de 42,98% et 22,46%. Cette amélioration se reflète également dans la résistance à la traction par fendage. En effet, le (BGRT-5%FS) montre une légère amélioration de cette propriété à long terme par rapport aux autres bétons.

L'évaluation du BGRT-5%FS sous des conditions accélérées de migration des chlorures et d'attaque par l'acide sulfurique révèle des résultats prometteurs en matière de durabilité, notamment dans un milieu acide (HCL). Après trois mois d'exposition, le BGRT-5%FS montre une perte de masse minimale et conserve une résistance à la compression élevée, même en présence d'environnements agressifs.

Les analyses des composants chimiques et minéralogiques de la matrice cimentaire, incluant les hydrates et le quartz, ont démontré que ces éléments sont bien préservés dans le BGRT-5%FS après trois mois d'attaque chimique. Ces observations sont corroborées par les analyses minéralogiques effectuées par DRX. Cela confirme la résistance continue du BGRT-5%FS face aux agressions chimiques à long terme.

La stabilité de l'alcalinité de (BGRT-5%FS), est confirmée par la mesure du pH dans chaque béton étudié.

De plus, l'adhérence des différentes zones de contact des (ITZ) a été confirmée par le test de micro dureté, démontrant que l'utilisation de 5 % de fumée de silice dans le mélange d'encapsulation améliore considérablement la qualité des zones de transition interfaciale (ITZ1 et ITZ2). Cette amélioration des ITZ se traduit par une réduction notable de l'absorption et de la porosité du BGRT-5%FS, ainsi qu'une augmentation de la densité et de la résistance à la

compression à long terme du BGRT-5%FS, comme le montrent les tests de durabilité généraux et spéciaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail est d'optimiser le traitement par revêtement cimentaire (encapsulation) des GBR, et d'analyser son influence sur les caractéristiques physico- mécaniques du GBRT lui-même et sur les caractéristiques mécaniques, microstructurales et la durabilité du béton une fois ils sont incorporés.

Dans cette étude le traitement est limité à la fraction 16/25 en raison de son volume prédominant dans le béton et de la relative facilité de son traitement par rapport à la fraction 3/8 et 8 /16.

Dans le premier traitement des GBR, trois facteurs indépendants sont pris en considération : l'état des GBR, le temps de trempage et le temps de durcissement. Il a été observé que les propriétés physiques des (GBRT) dépendent de l'état des granulats (secs ou pré-saturés). De plus, la résistance à la compression des bétons contenant des GBRT est significativement supérieure à celle des bétons de référence (BGN, BGR). La porosité accessible à l'eau et l'absorption de ces bétons sont plus élevées que celles des BGN, tout en étant comparables ou même inférieures à celles des BGR. Il semble également que le temps de durcissement soit le principal facteur influençant la résistance à la compression, suivi de l'état des GBR, tandis que l'impact du temps de trempage est négligeable. Les facteurs influençant la porosité comprennent le temps de durcissement, l'état des granulats et le temps de trempage. Cependant, le temps de durcissement a un impact plus significatif sur la porosité que sur la résistance à la compression par contre l'état des GBR a une influence similaire.

L'analyse de la résistance à la compression et de la porosité des GBRT indique que le traitement optimal des granulats s'obtient dans les conditions suivantes : granulats secs durcis pendant 15 jours pour la résistance à la compression et granulats secs durcis pendant 3 jours pour la porosité. Les bétons GBRT7 et GBRT8 montrant des augmentations de résistance de l'ordre de 41,95 % et 41,55 %, respectivement, par rapport aux BGR et BGN après 28 jours de durcissement. Pour la porosité, GBRT1 et GBRT3 présentent une légère réduction d'environ 3,14 % et 3,01 %, respectivement, par rapport aux BGR. Les résultats de porosité sont conformes à ceux d'absorption, avec des réductions de 10,93 % et 9,23 %, respectivement, par rapport aux BGR.

Les techniques DRX et ATG ont confirmé la présence d'hydrates et de quartz dans les GBR et les GBRT. Le processus d'encapsulation a permis la formation d'un film mince à la surface extérieure des GBR, imprégnant ainsi l'ancien mortier poreux. L'analyse microstructurale des

Conclusion générale

GBRT semble favoriser les GBRT secs, et les analyses EDS ont révélé une amélioration de la morphologie microstructurale de la matrice cimentaire du revêtement, ainsi qu'un renforcement de la (ITZ) des GBRT secs.

Le second traitement vise à améliorer la durabilité des bétons par l'addition de 5 % de fumée de silice (5%FS) et 2 % d'adjuvant hydrofuge (2%HF) dans le coulis du revêtement cimentaire. Les conclusions suivantes peuvent être soulignées :

- La résistance à la compression des (BGRT-5%FS) surpasse celle des BGR et des BGN de 42,98 % et 22,46 %, respectivement après une période de cure de 28 jours, et continue de dépasser ces valeurs de 17,57 % et 7,92 %, respectivement, après une période de cure de 180 jours. Cette amélioration se reflète également sur la résistance à la traction par fendage estimée à 31,78 % et 3,83 % par rapport aux BGR et BGN respectivement après une période de cure de 28 jours, et de 17,01 % et 4,64 % respectivement, après une période de cure de 180 jours.

-Après 545 jours de durcissement, les BGRT-5%-FS ont montré une réduction significative de l'absorption par immersion, avec une diminution de 51,97% par rapport au BGR et 0,89% par rapport au BGN. De même, une réduction de l'absorption capillaire est remarquée estimée à 350 % et 450 % par rapport aux BGR et BGN respectivement.

Les aspects généraux de la durabilité (porosité, absorption et densité), montrent que le traitement des GBR par revêtement cimentaire (5 % de FS), indique des meilleures performances à long terme.

L'évaluation de la qualité du BGRT-5%FS sous des conditions accélérées de migration des chlorures et d'attaque par l'acide sulfurique révèle des résultats prometteurs en matière de durabilité, notamment dans un milieu acide (HCL). Après trois mois d'exposition, les BGRT-5%FS montrent une perte de masse minimale et conservent une résistance à la compression acceptable ; le taux de diminution de la résistance est de l'ordre de (-97,42 %, -70,56 % et -35,34 %) pour les (BGN, BGR et BGRT-5%FS) respectivement par rapport aux bétons de référence (BGN, BGR et BGRT-5%FS) conservés dans l'eau.

Les analyses des composants chimiques et minéralogiques de la matrice cimentaire, incluant les hydrates et le quartz, ont démontré que ces éléments sont bien préservés dans le BGRT-5%FS après trois mois d'attaque chimique. Ces observations sont corroborées par les analyses minéralogiques effectuées par DRX et FRX, ce qui confirme la résistance des BGRT-5%FS face aux agressions chimiques à long terme.

De plus, l'adhérence des différentes zones de contact des (ITZ) a été confirmée par le test de micro dureté, démontrant que l'utilisation de 5 % de fumée de silice dans le mélange

Conclusion générale

d'encapsulation améliore considérablement la qualité des zones de (ITZ1 et ITZ2). Cette amélioration des ITZ se traduit par une réduction notable de l'absorption et de la porosité du BGRT-5%FS, ainsi qu'une augmentation de la densité et de la résistance à la compression à long terme ; comme le montrent les indicateurs de durabilité généraux et spéciaux.

En conclusion, les résultats obtenus démontrent clairement l'efficacité du traitement de la fraction 16/25 des GBR sur la durabilité des bétons dans les milieux agressifs en indiquant une amélioration significative de la résistance à la compression par rapport aux bétons à base de GN, avec une augmentation de la porosité accessible à l'eau et l'absorption à court terme ; qui commencent à diminuer sensiblement à long terme.

Ces résultats prometteurs montrent qu'il est possible de remplacer totalement les agrégats naturels (100 %) par des GBRT-5% FS sans compromettre les performances du béton pour faire progresser les pratiques de construction durables.

L'intégration des (100%GBR) dans la production de béton présente un potentiel significatif pour établir un marché durable, en valorisant une part importante des déchets de construction et de démolition chaque année. De plus, cette approche offre des économies substantielles tout en améliorant la préservation des ressources naturelles et écologiques, et en réduisant les déchets ainsi que l'empreinte CO₂. L'adoption de spécifications claires pour l'utilisation des GBR dans les applications de béton pourrait attirer des investissements privés et stimuler des innovations dans le concassage et le tamisage des matériaux recyclés. Toutefois, des défis demeurent, notamment la nécessité de surmonter les réticences liées aux normes et à la performance perçue des matériaux recyclés. Une compréhension approfondie des impacts des GBR sur les propriétés des produits en béton, couplée à la formulation de directives appropriées, sera cruciale pour surmonter ces obstacles.

Cela favorisera non seulement la durabilité des produits en béton, mais contribuera également à l'acceptation généralisée de cette approche par l'industrie, garantissant ainsi des avantages environnementaux durables et une transition vers une économie circulaire plus verte.

Perspectives de travaux futurs :

Ce travail de thèse pourrait également être complété par des études complémentaires traitant :

1. Évaluation de l'impact environnemental de l'incorporation de GBRT et analyse des facteurs tels que la réduction de l'empreinte carbone, la consommation d'énergie et la réduction des déchets.
2. La valorisation des fines et des petits résidus de granulats, résultant de l'impact du processus de concassage pour la production en gros (BGR), comme matériaux cimentaires.
3. Analyse microstructurale du potentiel de durabilité des méthodes de traitement des (GBR), incluant les techniques à base de bactéries et de carbonatation.
4. Exploitation du (GBR) comme Support de Stockage d'Énergie.

Références bibliographies

- [1] C. R. Gagg, “Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 40, pp. 114–140, 2014.
- [2] P.-C. Aïtcin, “Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow,” *Cement and Concrete research*, vol. 30, no. 9, pp. 1349–1359, 2000.
- [3] C. Vintimilla and M. Etxeberria, “Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates-Type A used in structural concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 380, p. 131273, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131273>.
- [4] G. De Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V. N. Nerella, G. Habert, and I. Agusti-Juan, “Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials,” *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 25–36, 2018.
- [5] H. Van Damme, “Concrete material science: Past, present, and future innovations,” *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 5–24, 2018.
- [6] N. Bahrami, M. Zohrabi, S. A. Mahmoudy, and M. Akbari, “Optimum recycled concrete aggregate and micro-silica content in self-compacting concrete: Rheological, mechanical and microstructural properties,” *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. 101361, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101361.
- [7] E. Güneysi, M. Gesoglu, A. Al-Goody, and S. Ipek, “Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 29–44, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.142.
- [8] M. S. Nadesan and P. Dinakar, “Structural concrete using sintered flyash lightweight aggregate: A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 928–944, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.005>.
- [9] K. Slattery, “Global developments in the aggregate industry: global aggregates information, Network (2016)”.
- [10] H. Wang *et al.*, “Effect of recycled concrete aggregate with different degrees of initial alkali–aggregate reaction damage on the mechanical behavior and porosity of self-compacting recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 363, p. 129797, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129797.
- [11] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, “Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted,” *Construction and Building Materials*, vol. 288, p. 123066, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123066.
- [12] H. Kong, “Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials,” *The Lancet Pschch*, pp. 1–35, 2022.
- [13] N. Balasubramanian and C. Sarangapani, “A review on the factors influencing the performance of sustainable ternary cement composites,” *Environment, Development and Sustainability*, vol. 26, no. 10, pp. 24569–24596, 2024.
- [14] I. N. York and I. Europe, “Concrete needs to lose its colossal carbon footprint,” *Nature*, vol. 597, no. 7878, pp. 593–594, 2021.
- [15] V. Pool, “National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA),” *Revista Concrete In focus*, 2007.

Références bibliographiques

- [16] Jim O'Brien, "Global aggregate growth examined. Aggregateresearch," vol. 1–5, 2019, [Online]. Available: <http://www.aggregateresearch.com/news/global-aggregate-growth-examined-by-gain-convenor-jim-obrien/>
- [17] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 272–292, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
- [18] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Construction and Building materials*, vol. 172, pp. 272–292, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.
- [19] "Rapport annuel 2006," 2007. doi: 10.4414/bms.2007.13115.
- [20] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, and C. M. Tam, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1195–1203, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025.
- [21] P. K. Mehta and P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. New York, 2006. [Online]. Available: <https://lccn.loc.gov/2013041254>
- [22] M. C. Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V. Barai, *Systematic approach of characterisation and behaviour of recycled aggregate concrete*. Springer, 2019.
- [23] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Mari, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, pp. 735–742, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [24] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties," *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 565–573, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059.
- [25] M. F. Pistilli, C. F. Peterson, and S. P. Shah, "Properties and possible recycling of solid waste from ready-mix concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 5, no. 3, pp. 249–259, May 1975, doi: 10.1016/0008-8846(75)90007-1.
- [26] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 2869–2876, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004.
- [27] M. Sánchez, D. Juan, and P. Alaejos, "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, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- [28] L. Berredjem, N. Arabi, and L. Molez, "Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 246, p. 118421, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118421.
- [29] V. W. Y. Tam, A. Butera, K. N. Le, and W. Li, "Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review," *Construction and Building Materials*, vol. 250, p. 118903, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118903.

Références bibliographiques

- [30] R. V. Silva, J. de Brito, and R. K. Dhir, "The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 825–849, Aug. 2015, doi: 10.1080/19648189.2014.974831.
- [31] F. Agrela, M. Sánchez de Juan, J. Ayuso, V. L. Geraldès, and J. R. Jiménez, "Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 10, pp. 3950–3955, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027.
- [32] S. Minhaj, S. Kazmi, M. Junaid, Y. Wu, X. Lin, and M. Riaz, "Investigation of thermal performance of concrete incorporating different types of recycled coarse aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 2, no. xxxx, p. 121433, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121433.
- [33] H. K. A. Al-Bayati, P. K. Das, S. L. Tighe, and H. Baaj, "Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 284–298, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176.
- [34] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, and Z. Xie, "Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 466–472, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.057.
- [35] Q. Zhou and F. P. Glasser, "Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <math><120^{\circ}\text{C}</math>," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 9, pp. 1333–1339, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00558-0.
- [36] W. M. Shaban, J. Yang, H. Su, K. H. Mo, L. Li, and J. Xie, "Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 151–167, 2019, doi: 10.3151/jact.17.4.151.
- [37] S. Wang *et al.*, "Construction of $\text{CeO}_2/\text{YMnO}_3$ and $\text{CeO}_2/\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{YMnO}_3$ photocatalysts and adsorption of dyes and photocatalytic oxidation of antibiotics: Performance prediction, degradation pathway and mechanism insight," *Applied Surface Science*, vol. 608, p. 154977, 2023.
- [38] C. Thomas, J. de Brito, V. Gil, J. A. Sainz-Aja, and A. Cimentada, "Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography," *Construction and Building Materials*, vol. 166, pp. 171–180, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.130.
- [39] H. Zhang, T. Ji, X. Zeng, Z. Yang, X. Lin, and Y. Liang, "Mechanical behavior of ultra-high performance concrete (UHPC) using recycled fine aggregate cured under different conditions and the mechanism based on integrated microstructural parameters," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 489–507, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.117.
- [40] G. Bonifazi, G. Capobianco, and S. Serranti, "THE ITZ IN CONCRETE WITH NATURAL AND RECYCLED AGGREGATES: STUDY OF MICROSTRUCTURES BASED ON IMAGE AND SEM ANALYSIS Manta River Project-Microplastics along the Po River View project Materials for restoration View project," no. June, 2015, [Online]. Available: <http://www.c2ca.eu/activities/the-c2ca-project/>
- [41] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, and B. Kasal, "A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 171, no. May, p. 105565, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [42] V. W. Y. Tam, H. Wattage, K. N. Le, A. Buteraa, and M. Soomro, "Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate : A critical review," *Construction and Building Materials*, vol. 270, p. 121490, 2021,

Références bibliographiques

- doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121490.
- [43] C. Shi, Z. Wu, Z. Cao, T. C. Ling, and J. Zheng, “Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 130–138, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013.
- [44] B. DüNDAR, M. S. Tuğluca, H. İlcan, O. Şahin, and M. Şahmaran, “The effects of various operational- and materials-oriented parameters on the carbonation performance of low-quality recycled concrete aggregate,” *Journal of Building Engineering*, vol. 68, p. 106138, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106138.
- [45] J. Li, H. Xiao, and Y. Zhou, “Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 3, pp. 1287–1291, 2009.
- [46] J. De Brito and N. Saikia, *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [47] S. S. Trivedi, K. Snehal, B. B. Das, and S. Barbhuiya, “A comprehensive review towards sustainable approaches on the processing and treatment of construction and demolition waste,” *Construction and Building Materials*, vol. 393, p. 132125, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132125>.
- [48] C. Fisher and M. Werge, “EU as a Recycling Society—Present Recycling Levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the UE. ETC,” SCP Working Paper 2/2009. Available online: [http://scpeionet.europa.eu ...](http://scpeionet.europa.eu...), 2009.
- [49] J. Staunton, C. D. Williams, L. Morrison, T. Henry, G. T. A. Fleming, and M. J. Gormally, “Land Use Policy Spatio-temporal distribution of construction and demolition (C & D) waste disposal on wetlands : A case study,” vol. 49, pp. 43–52, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.06.023>.
- [50] I. D. Williams and D. A. Turner, “WASTE MANAGEMENT PRACTICES IN THE SMALL-SCALE CONSTRUCTION INDUSTRY”.
- [51] A. Trends, “Advancing Sustainable Materials Management : 2014 Fact Sheet,” 2016.
- [52] *Global Waste Management Outlook*. 2015. doi: DTI /1957/JA.
- [53] E. F. Chris Reardon, “Waste minimisation Understanding waste minimisation,” 2024. <https://www.yourhome.gov.au/materials/waste-minimisation>
- [54] C. S. Poon and S. Engineering, “Sustainable management of construction waste for Hong Kong.”
- [55] L. Jaillon, C. S. Poon, and Y. H. Chiang, “Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong,” *Waste Management*, vol. 29, no. 1, pp. 309–320, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.015.
- [56] D. Debris, “Construction and Demolition Debris Management in the United States , 2015 U . S . Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery March 2020,” no. March, pp. 1–24, 2020.
- [57] B. G. Paul Randell, Joe Pickin, “Waste generation and resource recovery in Australia,” Suite 212B, 757 Bourke Street, Docklands Vic 3008, 2014. [Online]. Available: www.blueenvironment.com.au
- [58] V. M. Tam, V. W. Y. Tam, and C. M. Tam, *Re-use of Construction and Demolition Waste in Housing*

Références bibliographiques

- Developments*. U.S: Nova Science Publishers, 2008. [Online]. Available: <https://books.google.dz/books?id=GHwrAQAAAMAAJ>
- [59] R. Concrete, *The Cement Sustainability Initiative Recycling Concrete*, © WBCSD. J. [Online]. Available: www.wbcscement.org/recycling
- [60] C. La, N. Béton, and N. F. En, “NORME NF EN 206 CN,” p. 27, 2014.
- [61] Y. Jiang, T.-C. Ling, and M. Shi, “Strength enhancement of artificial aggregate prepared with waste concrete powder and its impact on concrete properties,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 257, p. 120515, 2020.
- [62] M. A. and G. W. Ali Kheirbek, Ali Ibrahim, “Experimental Study on the Physical and Mechanical Characteristics of Roller Compacted Concrete Made with Recycled Aggregates,” *infrastructures*, vol. 7, p. 54, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040054>.
- [63] Y. Jiang, T. C. Ling, and M. Shi, “Strength enhancement of artificial aggregate prepared with waste concrete powder and its impact on concrete properties,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 257, p. 120515, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120515.
- [64] T. C. Hansen, *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press, 1992.
- [65] S. Kumar and M. Santhanam, “Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review.,” *Indian concrete journal*, vol. 77, no. 9, pp. 1324–1331, 2003.
- [66] Z. Zhao, S. Wang, L. Lu, and C. Gong, “Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar,” *Construction and building materials*, vol. 43, pp. 191–196, 2013.
- [67] K. H. Younis and K. Pilakoutas, “Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 688–701, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.003.
- [68] Q. Liu, J. Xiao, and Z. Sun, “Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 10, pp. 1050–1057, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.06.007.
- [69] D. Smart and J. C. Jerman, “Porosity of recycled concrete with substitution 2 of recycled concrete aggregate 3 An experimental study,” *Cement and Concrete Research*, vol. 93, pp. 1–11, 2002, [Online]. Available: pii: S0008-8846(02)00795-0
- [70] Ö. Çakır and H. Dilbas, “Durability properties of treated recycled aggregate concrete: Effect of optimized ball mill method,” *Construction and Building Materials*, vol. 268, p. 121776, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121776>.
- [71] L. Wang, J. Wang, X. Qian, P. Chen, Y. Xu, and J. Guo, “An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 432–441, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191.
- [72] N. K. Bui, T. Satomi, and H. Takahashi, “Mechanical properties of concrete containing 100 % treated coarse recycled concrete aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 163, pp. 496–507, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.131.
- [73] M. Nedeljković, J. Visser, T. G. Nijland, S. Valcke, and E. Schlangen, “Physical, chemical and mineralogical

Références bibliographiques

- characterization of Dutch fine recycled concrete aggregates: A comparative study,” *Construction and Building Materials*, vol. 270, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121475.
- [74] Y. Zhou, D. Guo, F. Xing, and M. Guo, “Multiscale mechanical characteristics of ultra-high performance concrete incorporating different particle size ranges of recycled fine aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 307, no. October, p. 125131, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125131.
- [75] N. F. EN, *12350-2.(1999)*, vol. 2.
- [76] T. Sedran, “Chapitre 15-Adaptation des méthodes de formulation au béton de granulats recyclés,” *Dans: de Larrard F. et Colina H.(Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4*, p. pp-359, 2018.
- [77] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, and W. Xu, “Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars,” *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp. 179–186, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037.
- [78] T. Le, S. Rémond, G. Le Saout, and E. Garcia-Diaz, “Fresh behavior of mortar based on recycled sand - Influence of moisture condition,” *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 35–42, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.071.
- [79] K. P. Verian, W. Ashraf, and Y. Cao, “Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 133, no. February, pp. 30–49, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.
- [80] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, C. M. Tam, and C. H. Chan, “New Approach in Measuring Water Absorption of Recycled Aggregates,” *Construction and Building Materials*, no. July, pp. 1–17, 2006.
- [81] A. Djerbi Tegguer, “Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach,” *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 112–116, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.018.
- [82] H. Zhang, X. Xu, W. Liu, B. Zhao, and Q. Wang, “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*, vol. 326, p. 126891, 2022.
- [83] L. Butler, J. S. West, and S. L. Tighe, “The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement,” *Cement and concrete research*, vol. 41, no. 10, pp. 1037–1049, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>.
- [84] V.-Y. Tam, X.-F. Gao, and C. M. Tam, “Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete,” *Magazine of concrete research*, vol. 58, no. 7, pp. 477–484, 2006.
- [85] V. W. Y. Tam and C. M. Tam, “Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach,” *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 10, pp. 3592–3602, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0379-y.
- [86] V. W. Y. Tam, C. M. Tam, and Y. Wang, “Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 10, pp. 1928–1939, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.040.

Références bibliographiques

- [87] G. Fathifazl, A. Abbas, A. G. Razaqpur, O. B. Isgor, B. Fournier, and S. Foo, "New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 21, no. 10, pp. 601–611, 2009, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2009)21:10(601).
- [88] G. Fathifazl, A. G. Razaqpur, O. B. Isgor, A. Abbas, B. Fournier, and S. Foo, "Shear strength of reinforced recycled concrete beams with stirrups," *Magazine of Concrete Research*, vol. 62, no. 10, pp. 685–699, 2010, doi: 10.1680/mac.2010.62.10.685.
- [89] L. Ferreira, J. De Brito, and M. Barra, "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties," *Magazine of Concrete Research*, vol. 63, no. 8, pp. 617–627, 2011, doi: 10.1680/mac.2011.63.8.617.
- [90] M. B. De Oliveira and E. Vazquez, "The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete," *Waste Management*, vol. 16, no. 1–3, pp. 113–117, 1996, doi: 10.1016/S0956-053X(96)00033-5.
- [91] P. Plaza, I. F. Sáez del Bosque, M. Frías, M. I. Sánchez de Rojas, and C. Medina, "Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO2 emissions," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122926, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122926.
- [92] C. C. Res, J. Xiao, J. Li, and C. Zhang, "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. June, pp. 1187–1194, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.020.
- [93] H. Yaprak, H. ARUNTAŞ, I. Demir, O. ŞİMŞEK, and G. DURMUŞ, "Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties," *International journal of physical sciences*, vol. 6, no. 10, 2011.
- [94] M. S. de Juan and P. A. Gutiérrez, "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, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- [95] B. Nikmehr, B. Kafle, and R. Al-Ameri, "A review of the advanced treatment techniques for enriching the recycled concrete aggregates for recycled-based concrete: economic, environmental and technical analysis," *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. 13, no. 3, pp. 560–583, 2024.
- [96] E. Pawluczuk, K. Kalinowska-Wichrowska, J. R. Jiménez, J. M. Fernández-Rodríguez, and D. Suescum-Morales, "Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, no. September, p. 103317, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103317.
- [97] L. Li, D. Xuan, A. O. Sojobi, S. Liu, S. H. Chu, and C. S. Poon, "Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 118, no. January, p. 103963, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103963.
- [98] W. Zhang, S. Wang, P. Zhao, L. Lu, and X. Cheng, "Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 203, pp. 601–607, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.071.
- [99] A. K. Crumbie, "Characterisation of the microstructure of concrete.," no. 0000 0001 3399 2761, 1994, [Online]. Available: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.339394>

Références bibliographiques

- [100] D. Sun, K. Wu, H. Shi, L. Zhang, and L. Zhang, "Effect of interfacial transition zone on the transport of sulfate ions in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 192, pp. 28–37, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.140.
- [101] K. L. Scrivener and D. B. Teknik, "The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate," pp. 411–421, 2004.
- [102] M. Tokyay, "Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression," vol. 26, pp. 633–638, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00092-1.
- [103] A. Mistri, S. K. Bhattacharyya, N. Dhami, A. Mukherjee, and S. V Barai, "A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials," *Construction and Building Materials*, vol. 233, p. 117894, 2020.
- [104] J. Stark and B. Wicht, *Dauerhaftigkeit von beton*. Springer, 2013.
- [105] E. Menéndez, B. Aldea, E. Puerto, and H. Recino, "Study of the alkali-silica reaction rate of Spanish aggregates . Proposal of a classification based in accelerated mortar bars tests and petrographic parameters," *Materiales de ConstruCCión*, vol. 71, no. 344, p. 263, 2021, doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2021.13421>.
- [106] Z. Peng, C. Shi, Z. Shi, B. Lu, S. Wan, and Z. Zhang, "Alkali-aggregate reaction in recycled aggregate concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 255, p. 120238, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120238.
- [107] K. P. Verian, "Using Recycled Concrete As Coarse Aggregate in Pavement Concrete," *Purdue University*, vol. 9, no. April 2012, p. 176, 2011.
- [108] N. Goufi, R. Idir, D. Kerdal, A. Abidelah, and N. Kaid, "Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques de bétons de granulats recyclés de béton pour la valorisation de ce type de granulats," vol. 36, no. 1, pp. 150–154.
- [109] D. Brito, "Micro- and macro-porosity of dry- and saturated- state recycled aggregate concrete," 2019.
- [110] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, and L. Li, "Results in Physics Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate," *Results in Physics*, vol. 9, no. April, pp. 1317–1322, 2018, doi: 10.1016/j.rinp.2018.04.061.
- [111] A. Nazari, S. Riahi, S. Riahi, S. F. Shamekhi, and A. Khademno, "Benefits of Fe₂O₃ nanoparticles in concrete mixing matrix," no. January 2010, 2014.
- [112] W. Parrish, "X-Ray powder diffraction analysis film and Geiger counter techniques," *Science*, vol. 110, no. 2858, pp. 368–371, 1949.
- [113] L. P. Singh, V. Bisht, M. S. Aswathy, L. Chaurasia, and S. Gupta, "Studies on performance enhancement of recycled aggregate by incorporating bio and nano materials Studies on performance enhancement of recycled aggregate by incorporating bio and nano materials," *Construction and Building Materials*, vol. 181, no. June, pp. 217–226, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.248.
- [114] R. S. R. Eng and C. T. T. Be, "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate," no. September, 2015, doi: 10.1680/mac.1985.37.130.29.
- [115] Y. Wang, H. Zhang, Y. Geng, Q. Wang, and S. Zhang, "Prediction of the elastic modulus and the splitting tensile strength of concrete incorporating both fine and coarse recycled aggregate," *Construction and Building Materials*,

Références bibliographiques

- vol. 215, pp. 332–346, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.212.
- [116] A. Katz, “Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete,” *Cement and concrete research*, vol. 33, no. 5, pp. 703–711, 2003.
- [117] I. Tori, M. Kawamura, K. Takemoto, and S. Hasaba, “Applicability of recycled concrete aggregate as an aggregate for concrete pavement,” *Transaction of the Japan concrete institute*, vol. 6, pp. 133–140, 1984.
- [118] R. S. R. Eng and Y. H. Loo, “Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete,” no. September, 2015, doi: 10.1680/mac.1987.39.141.214.
- [119] R. Zaharieva and E. Wirquin, “Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete e d,” *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 223–232, 2003.
- [120] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, and E. Wirquin, “Frost resistance of recycled aggregate concrete,” *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 10, pp. 1927–1932, 2004.
- [121] H. Sasanipour and F. Aslani, “Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 236, p. 117540, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117540.
- [122] Z. Duan and C. Poon, “Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars,” no. June 2014, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2014.01.044.
- [123] Q. Qiao, W. Cao, and Z. Qian, “Cyclic Behavior of Low Rise Concrete Shear Walls Containing Recycled Coarse and Fine Aggregates,” 2017, doi: 10.3390/ma10121400.
- [124] W. Tangchirapat, C. Rattanashotinunt, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and F. Ash, “Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates,” no. February, pp. 243–251, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000585.
- [125] A. Ajdukiewicz and A. Kliszczewicz, “Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS / HPC,” vol. 24, pp. 269–279, 2002.
- [126] U. Johnson and A. Salam, “Properties of High-Workability Concrete with Recycled Concrete Aggregate,” vol. 14, no. 2, pp. 248–255, 2011, doi: 10.1590/S1516-14392011005000039.
- [127] J. Liu and B. Chen, “Mechanical properties of high strength concrete with field-demolished concrete as aggregates,” *Journal of ASTM International*, vol. 5, no. 10, p. JAI101650, 2008.
- [128] G. Bernier, “le recyclage de béton sous forme de Granulats.” 1983.
- [129] C. Astm, “597, Standard test method for pulse velocity through concrete,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2009.
- [130] P. Gaillard, “Fredholm and Wronskian representations of solutions to the KPI equation and multi-rogue waves,” *Journal of Mathematical Physics*, vol. 57, no. 6, 2016.
- [131] R. V. Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2171–2186, 2016, doi:

Références bibliographiques

- 10.1016/j.jclepro.2015.10.064.
- [132] N. Otsuki, S. Miyazato, and W. Yodsudjai, "Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 443–451, Oct. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(443).
- [133] S. Yehia, K. Helal, A. Abusharkh, A. Zaher, and H. Istaitiyeh, "Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 9, no. 2, pp. 219–239, 2015, doi: 10.1007/s40069-015-0100-0.
- [134] H. Zhao, Z. Wu, A. Liu, and L. Zhang, "Numerical insights into the effect of ITZ and aggregate strength on concrete properties," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 120, no. February, p. 103415, 2022, doi: 10.1016/j.tafmec.2022.103415.
- [135] V. W. Y. Tam, M. Soomro, A. C. J. Evangelista, and A. Haddad, "Deformation and permeability of recycled aggregate concrete-A comprehensive review," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 103393, 2021.
- [136] A. Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M. A. Serrano-López, P. Serna, and J. O. Castaño-Tabares, "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete," *Construction and building materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2545–2553, 2009.
- [137] H. Gross, "High-temperature creep of concrete," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 32, no. 1, pp. 129–147, 1975.
- [138] R. V Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, "Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain : A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 598–614, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.070.
- [139] J. Kim, A. M. Grabiec, A. Ubysz, S. Yang, and N. Kim, "Influence of Mix Design on Physical, Mechanical and Durability Properties of Multi-Recycled Aggregate Concrete," *Materials*, vol. 16, no. 7, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3390/ma16072744.
- [140] E. Wirquin, R. Hadjieva-Zaharieva, and F. Buyle-Bodin, "Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete - application to recycled aggregate concrete," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 33, no. 230, pp. 403–408, 2000, doi: 10.1007/bf02479650.
- [141] F. T. Olorunsogo and N. Padayachee, "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 2, pp. 179–185, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00653-6.
- [142] P. J. Wainwright, "Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates," *EIK Lauritezen (Ek.), Demolition and Reuse of Concrete, Guidelines for Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, 1993.
- [143] T. T. Kien, L. T. Thanh, and P. V. Lu, "The International Conference on Sustainable Built Environment for Now and Future, Hanoi," *Recycling construction demolition waste in the world and in Vietnam*, no. March, p. 10, 2013.
- [144] M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 501–516, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.

Références bibliographiques

- [145] V. Baroghel-Bouny, “Transferts dans les bétons et durabilité,” *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, no. 2–3. Taylor & Francis, pp. 145–146, 2001.
- [146] A. Khelidj, V. Baroghel-Bouny, G. Bastian, J. Godin, and G. Villain, “Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages,” IFSTTAR-Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l ... , 2006.
- [147] G. Fornasier, C. Fava, L. F. Luco, and L. Zitzer, “Design of self compacting concrete for durability of prescriptive vs. performance-based specifications,” *Special Publication*, vol. 212, pp. 197–210, 2003, doi: 10.14359/12686.
- [148] A. Bentur and D. Mitchell, “Material performance lessons,” *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 2, pp. 259–272, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.009.
- [149] L. Lin and B. Wu, “Water permeability behavior of recycled lump/aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 323, p. 126508, 2022.
- [150] V. Baroghel-Bouny, “Durability indicators-Relevant tools for performance-based evaluation and multi-level prediction of RC durability,” in *Proceedings of international RILEM workshop on performance based evaluation and indicators for concrete durability, Madrid, 2008*, 2006, pp. 3–30.
- [151] S. M. Levy and P. Helene, “Durability of recycled aggregates concrete: A safe way to sustainable development,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 11, pp. 1975–1980, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.009.
- [152] C. Thomas, J. Setién, J. A. Polanco, P. Alaejos, and M. Sánchez De Juan, “Durability of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1054–1065, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- [153] M. Quebaud, “Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats.” Artois, 1996.
- [154] J. Wang, B. Vandevyvere, S. Vanhessche, J. Schoon, N. Boon, and N. De Belie, “Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 355–366, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.051.
- [155] J. PFITZNER, “Poiseuille and his law,” *Anaesthesia*, vol. 31, no. 2, pp. 273–275, 1976, doi: 10.1111/j.1365-2044.1976.tb11804.x.
- [156] J. J. Kollek, “The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method—a recommendation,” *Materials and Structures*, vol. 22, no. 3, pp. 225–230, 1989, doi: 10.1007/BF02472192.
- [157] J. Jurin, “the Royal Society ; with an enquiry into the canfe o f the ta,” vol. 30, no. 355, 1718.
- [158] J.-P. Bigas, “La diffusion des ions chlore dans les mortiers.” Toulouse, 1994.
- [159] O. O. Metalssi and A. Aït-Mokhtar, “A PROPOSED METHODOLOGY FOR A QUANTITATIVE INVESTIGATION OF CARBONATION IN POLYMER-MODIFIED MORTARS.,” *Experimental techniques*, vol. 33, no. 6, 2009.
- [160] M. Limbachiya, M. S. Meddah, and Y. Ouchagour, “Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 439–449, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023.
- [161] J. Z. Xiao, B. Lei, and C. Z. Zhang, “On carbonation behavior of recycled aggregate concrete,” *Science China*

Références bibliographiques

- Technological Sciences*, vol. 55, no. 9, pp. 2609–2616, 2012, doi: 10.1007/s11431-012-4798-5.
- [162] J. Sim and C. Park, “Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate,” *Waste Management*, vol. 31, no. 11, pp. 2352–2360, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.06.014.
- [163] J. Geng and J. Sun, “Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 814–820, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.090.
- [164] “La norme béton NF EN 206-1,” 2005, pp. 9–23. [Online]. Available: <http://www.infociments.fr/betons/contexte-normatif/norme-contexte-evolutions>
- [165] N. Kaid, “La Durabilité des bétons pouzzolaniques,” PhD thesis., USTO-MB, 2010.
- [166] F. A. H. Saleh, N. Kaid, K. Ayed, D.-E. Kerdal, N. Chioukh, and N. Leklou, “Influence of waste tyre rubber of different aggregate forms and sizes on the sustainable behaviour of self-compacting sand concrete in aggressive environment,” *Journal of Rubber Research*, vol. 25, no. 2, pp. 89–104, 2022, doi: 10.1007/s42464-022-00160-9.
- [167] Y. Wang, Z. Shui, X. Gao, R. Yu, Y. Huang, and S. Cheng, “Understanding the chloride binding and diffusion behaviors of marine concrete based on Portland limestone cement-alumina enriched pozzolans,” *Construction and Building Materials*, vol. 198, pp. 207–217, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.270.
- [168] J. Osio-Norgaard, J. P. Gevaudan, and W. V. Srubar, “A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 186, pp. 191–206, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119.
- [169] J. P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. London: Crc Press, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781003223016>
- [170] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, and J. Gong, “Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview,” *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 125–138, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038.
- [171] Y. A. Villagrán-Zaccardi, C. J. Zega, and Á. A. Di Maio, “Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 449–455, 2008, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:6(449).
- [172] B. Qi, J. Gao, F. Chen, and D. Shen, “Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting–drying cycles and flexural loading,” *Construction and Building Materials*, vol. 174, pp. 130–137, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.122.
- [173] E. Vázquez, M. Barra, D. Aponte, C. Jiménez, and S. Valls, “Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment,” *Sustainable Construction Materials and Technologies*, vol. 2013-Augus, pp. 61–67, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028>.
- [174] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, and M. S. Mathews, “Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 829–836, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006.
- [175] A. Koper, W. Koper, and M. Koper, “Influence of Raw Concrete Material Quality on Selected Properties of

Références bibliographiques

- Recycled Concrete Aggregates,” *Procedia Engineering*, vol. 172, pp. 536–543, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.063.
- [176] S. A. Kumbhar, A. Gupta, and D. B. Desai, “Recycling and Reuse of Construction and Demolition Waste for Sustainable Development,” *OIDA International Journal of Sustainable Development*, vol. 6, no. 7, pp. 83–92, 2013.
- [177] K. Pandurangan, A. Dayanithy, and S. Om Prakash, “Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 120, pp. 212–221, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.093.
- [178] H. Katkhuda and N. Shatarat, “Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 63–71, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.034.
- [179] K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, and A. H. Taylor, “Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate,” *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 5, pp. 707–712, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00476-2.
- [180] D. Kong, T. Lei, J. Zheng, C. Ma, J. Jiang, and J. Jiang, “Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 5, pp. 701–708, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038.
- [181] E. Güneysi, M. Gesoğlu, Z. Algin, and H. Yazici, “Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 64, pp. 172–183, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.090.
- [182] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, M. H. Zhang, C. T. Tam, and T. W. J. Foo, “Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 3469–3479, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038.
- [183] M. Pepe, R. D. Toledo Filho, E. A. B. Koenders, and E. Martinelli, “Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 69, pp. 124–132, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.084.
- [184] H. Ogawa and T. Nawa, “Improving the quality of recycled fine aggregate by selective removal of brittle defects,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, no. 12, pp. 395–410, 2012, doi: 10.3151/jact.10.395.
- [185] S. Ismail and M. Ramli, “Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications,” *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 464–476, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014.
- [186] R. Purushothaman, R. R. Amirthavalli, and L. Karan, “Influence of Treatment Methods on the Strength and Performance Characteristics of Recycled Aggregate Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no. 5, 2015, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001128.
- [187] F. de Andrade Salgado and F. de Andrade Silva, “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review,” *Journal of Building Engineering*, vol. 52, p. 104452, 2022.
- [188] Y. F. Silva, R. A. Robayo, P. E. Matthey, and S. Delvasto, “Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 639–

Références bibliographiques

- 644, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057.
- [189] J. A. Forero, J. de Brito, L. Evangelista, and C. Pereira, “Improvement of the Quality of Recycled Concrete Aggregate Subjected to Chemical Treatments: A Review,” *Materials*, vol. 15, no. 8, 2022, doi: 10.3390/ma15082740.
- [190] J. V. Marshall and V. Ramasamy, “Augmentation of dissimilar Technique for Enhancing the Concrete properties with Recycled Coarse Aggregate and Manufactured Sand Augmentation of dissimilar techniques for enhancing the concrete properties with recycled coarse aggregate and manufactured san,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 14, no. August, pp. 1180–1190, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.06.094.
- [191] Q. Like, L. Yong, D. Jun, and T. Pengfei, “Thermal stress distribution and evolution of concrete particles under microwave irradiation,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 9, no. 3, pp. 148–154, 2016, doi: 10.25103/jestr.093.23.
- [192] K. Bru, S. Touzé, F. Bourgeois, N. Lippiatt, and Y. Ménard, “Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 126, pp. 90–98, 2014, doi: 10.1016/j.minpro.2013.11.009.
- [193] Y. Menard *et al.*, “Innovative process routes for a high-quality concrete recycling,” *Waste Management*, vol. 33, no. 6, pp. 1561–1565, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.02.006.
- [194] N. Lippiatt and F. Bourgeois, “Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing,” *Minerals Engineering*, vol. 31, pp. 71–81, 2012, doi: 10.1016/j.mineng.2011.09.017.
- [195] H. Choi, M. Lim, H. Choi, R. Kitagaki, and T. Noguchi, “Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete,” *Journal of Environmental Protection*, vol. 05, no. 07, pp. 583–596, 2014, doi: 10.4236/jep.2014.57060.
- [196] H. Choi, R. Kitagaki, and T. Noguchi, “Effective recycling of surface modification aggregate using microwave heating,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 34–45, 2014, doi: 10.3151/jact.12.34.
- [197] W. Ashraf, “Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities,” *Construction and Building Materials*, vol. 120, pp. 558–570, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080.
- [198] W. Kurdowski, *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Science & Business, 2014.
- [199] M. G. Alexander, J. R. Mackechnie, and W. Yam, “Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 10, pp. 750–759, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.06.005.
- [200] N. H. De Leeuw and S. C. Parker, “Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: An atomistic approach,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 102, no. 16, pp. 2914–2922, 1998, doi: 10.1021/jp973210f.
- [201] S. Gopi, V. K. Subramanian, and K. Palanisamy, “Aragonite-calcite-vaterite: A temperature influenced sequential polymorphic transformation of CaCO₃ in the presence of DTPA,” *Materials Research Bulletin*, vol. 48, no. 5, pp. 1906–1912, 2013, doi: 10.1016/j.materresbull.2013.01.048.
- [202] C. Liang, B. Pan, Z. Ma, Z. He, and Z. Duan, “Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review,” *Cement and Concrete Composites*, p. 103446, 2019, doi:

- 10.1016/j.cemconcomp.2019.103446.
- [203] B. Zhan, C. S. Poon, Q. Liu, and S. Kou, “Experimental Study on CO₂ Curing for Enhancement of Recycled Aggregate Properties”.
- [204] C. Shi, Z. Tu, M. Guo, and D. Wang, “Accelerated carbonation as a fast curing technology for concrete blocks,” *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*, pp. 313–342, 2020, doi: 10.1016/B978-0-08-102001-2.00015-2.
- [205] S. Ahmad, “Accelerated carbon dioxide sequestration,” *Epigenetic Biomarkers and Diagnostics*, pp. 81–101, 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00005-8.
- [206] P. He, C. Shi, C. S. Poon, and H. Kong, “Methods for the assessment of carbon dioxide absorbed by cementitious materials 6,” *carbon dioxide sequestration in cementitious construction materials*, vol. 2, 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00006-X.
- [207] Q. Huy *et al.*, “Impact of different climates on the resistance of concrete to natural carbonation,” *Construction and Building Materials*, vol. 216, pp. 450–467, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.263.
- [208] J. Zhang, C. Shi, Y. Li, X. Pan, C. Poon, and Z. Xie, “Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar,” *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, vol. 98, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087.
- [209] M. Sereng, A. Djerbi, O. O. Metalssi, P. Dangla, and J. M. Torrenti, “Improvement of recycled aggregates properties by means of CO₂ uptake,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 14, 2021, doi: 10.3390/app11146571.
- [210] Carlos Pico-Cortés and Yury Villagrán-Zaccardi, “Unraveling the Interplay of Physical-Chemical Factors Impacting the Carbonation Performance of Recycled Aggregate Concrete,” *Materials*, vol. 16, p. 5692, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16165692>.
- [211] C. Feng, B. Cui, Y. Huang, H. Guo, W. Zhang, and J. Zhu, “Enhancement technologies of recycled aggregate – Enhancement mechanism, influencing factors, improvement effects, technical difficulties, life cycle assessment,” *Construction and Building Materials*, vol. 317, p. 126168, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126168>.
- [212] M. Z. Tong Zhang, Meng Chen, Yuting Wang, “Roles of carbonated recycled fines and aggregates in hydration, microstructure and mechanical properties of concrete: A critical review Tong Zhang,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 138, pp. 1–66, 2023.
- [213] H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, and E. Schlangen, “Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete,” *Ecological Engineering*, vol. 36, pp. 230–235, 2010, doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.036.
- [214] J. Y. Wang, H. Soens, W. Verstraete, and N. De Belie, “Cement and Concrete Research Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores,” *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 139–152, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009.
- [215] K. Van Tittelboom and N. De Belie, “Self-Healing in Cementitious Materials—A Review,” *Materials*, vol. 6, pp. 2182–2217, 2013, doi: 10.3390/ma6062182.

Références bibliographiques

- [216] N. De Belie *et al.*, “A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures,” *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 5, p. 1800074, 2018, doi: 10.1002/admi.201800074.
- [217] W. Du *et al.*, “Effect of temperatures on self-healing capabilities of concrete with different shell composition microcapsules containing,” *Construction and Building Materials*, vol. 247, p. 118575, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118575.
- [218] A. M. Grabiec, J. Klama, D. Zawal, and D. Krupa, “Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition,” vol. 34, pp. 145–150, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.027.
- [219] M. Sarkar, M. Maiti, S. Xu, and S. Mandal, “Bio-concrete: Unveiling self-healing properties beyond crack-sealing,” *Journal of Building Engineering*, vol. 74, p. 106888, 2023.
- [220] S. S. Bang, J. K. Galinat, and V. Ramakrishnan, “Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*,” vol. 28, pp. 404–409, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00348-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3).
- [221] M Dhaarani and K Prakash, “DURABILITY STUDY ON HVFA BASED BACTERIAL CONCRETE — A LITERATURE STUDY,” *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, vol. 3, no. 4, 2014.
- [222] N. Kannan and M. L. Likhit, “Self-healing material bacterial concrete,” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 656–659, 2014.
- [223] S. Luhar, I. Luhar, F. Uddin, and A. Shaikh, “A Review on the Performance Evaluation of Autonomous Self-Healing Bacterial Concrete : Mechanisms , Strength , Durability , and Microstructural Properties,” *J. Compos. Sci.*, pp. 1–35, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs6010023>.
- [224] V. Picandet, A. Khelidj, H. Bellegou, V. Picandet, A. Khelidj, and H. Bellegou, “Crack effects on gas and water permeability of concretes,” 2018, [Online]. Available: <https://hal.science/hal-00494399v1>
- [225] X. Wang, F. Xing, M. Zhang, N. Han, and Z. Qian, “Experimental Study on Cementitious Composites Embedded with Organic Microcapsules,” *Materials*, vol. 6, pp. 4064–4081, 2013, doi: 10.3390/ma6094064.
- [226] E. N. Herbert and V. C. Li, “Self-Healing of Microcracks in Engineered Cementitious Composites (ECC) Under a Natural Environment,” *Materials*, vol. 6, pp. 2831–2845, 2013, doi: 10.3390/ma6072831.
- [227] W. Tang, O. Kardani, and H. Cui, “Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review,” *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, vol. 81, pp. 233–247, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.054.
- [228] M. Roig-Flores S. Moscato P. Serna L. Ferrara b, “Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments,” pp. 1–11, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091.The.
- [229] J. Y. Wang, D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, and N. De Belie, “Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete,” *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*, vol. 68, pp. 110–119, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018.
- [230] J. García-gonzález *et al.*, “Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate,” vol. 154, pp. 1015–1023, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.039.
- [231] R. Fall, D. B. Kearns, and T. Nguyen, “A defined medium to investigate sliding motility in a *Bacillus subtilis* flagella-less mutant,” *MBC Microbiology*, vol. 11, pp. 1–11, 2006, doi: 10.1186/1471-2180-6-31.

Références bibliographiques

- [232] Z. L. Yuxi Zhao, Ligang Penga, Weilai Zeng, Chi sun Poonc, “Improvement in properties of concrete with modified RCA by microbial induced carbonate precipitation,” vol. 9655827, pp. 1–26, 2019.
- [233] Chunhua Feng, “Reinforcement of Recycled Aggregate by Microbial-Induced Mineralization and Deposition of Calcium,” *crystals*, vol. 11, p. 887, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst11080887>.
- [234] Y. Su, Y. Yao, Y. Wang, X. Zhao, L. Li, and J. Zhang, “Concrete : An Overview of Research Progress,” 2023.
- [235] W. Zeng, Y. Zhao, C. Sun, Z. Feng, Z. Lu, and S. P. Shah, “Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled aggregate,” *Construction and Building Materials*, vol. 228, p. 116743, 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.116743](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116743).
- [236] X. Gao, X. Yao, R. Xie, X. Li, J. Cheng, and T. Yang, “Performance of fly ash-based geopolymer mortars with waste cathode ray tubes glass fine aggregate: A comparative study with cement mortars,” *Construction and Building Materials*, vol. 344, no. June, p. 128243, 2022, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2022.128243](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128243).
- [237] S.-Y. Chung, M. Abd Elrahman, P. Sikora, T. Rucinska, E. Horszczaruk, and D. Stephan, “Evaluation of the effects of crushed and expanded waste glass aggregates on the material properties of lightweight concrete using image-based approaches,” *Materials*, vol. 10, no. 12, p. 1354, 2017.
- [238] T. C. Cardoza, *Influencia de la fracción gruesa y muy fina de áridos reciclados mixtos en las propiedades del hormigón*. Editorial Universitaria, 2016.
- [239] F. Martí and B. Gonza, “Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume . Materials and mechanical properties,” vol. 43, pp. 429–437, 2008, doi: [10.1016/j.buildenv.2007.01.008](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008).
- [240] V. W. Y. Tam and C. M. Tam, “Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete : TSMA s and TSMA sc,” vol. 22, pp. 2068–2077, 2008, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024).
- [241] M. Allal, L. Zeghichi, and M. Siline, “Optimization of the recycled aggregate processing using the full factorial design approach, chemical, physical and microstructural characterization of treated aggregates by pre-coated with cementitious paste,” *Journal of Building Engineering*, vol. 94, no. May, p. 109852, 2024, doi: [10.1016/j.job.2024.109852](https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109852).
- [242] A. Katz, “Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 597–603, 2004, doi: [10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:6(597)).
- [243] Astm C452 – 06, “Standard Test Method for iTeh Standards iTeh Standards Document Preview,” *ASTM International*, vol. 1, no. October, pp. 5–7, 2010, doi: [10.1520/C0452-06.2](https://doi.org/10.1520/C0452-06.2).
- [244] T. Boubekeur, B. Boulekbache, K. Aoudjane, K. Ezziane, and E. H. Kadri, “Prediction of the durability performance of ternary cement containing limestone powder and ground granulated blast furnace slag,” *Construction and Building Materials*, vol. 209, pp. 215–221, 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.03.120](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.120).
- [245] Z. Makhloufi, M. Chettih, M. Bederina, E. L. H. Kadri, and M. Bouhicha, “Effect of quaternary cementitious systems containing limestone, blast furnace slag and natural pozzolan on mechanical behavior of limestone mortars,” *Construction and Building Materials*, vol. 95, pp. 647–657, 2015, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2015.07.050](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.050).
- [246] A. Aghaeipour and M. Madhkhan, “Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability,”

Références bibliographiques

- Construction and Building Materials*, vol. 141, pp. 533–541, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019.
- [247] E. Gruyaert, P. Van Den Heede, M. Maes, and N. De Belie, “Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests,” *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 1, pp. 173–185, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.09.009.
- [248] L. Turanli, B. Uzal, and F. Bektas, “Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements,” *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1106–1111, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.022.
- [249] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, and Y. B. Cheng, “Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack,” *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 10, pp. 1607–1611, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00125-X.
- [250] B. Lei, W. Li, Z. Tang, Z. Li, and V. W. Y. Tam, “Effects of environmental actions, recycled aggregate quality and modification treatments on durability performance of recycled concrete,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 13375–13389, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.09.073.
- [251] N. E. 933-1, “Essais pour déterminer les caractéristiques,” vol. 33, no. 0, 1996.
- [252] EN 12620, “Granulats pour béton d’après la norme EN 12620 intermédiaires,” p. 67390, 2017.
- [253] NF EN 933-5, “Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons,” *La Météorologie*, no. 24, p. 80, 1998, doi: 10.4267/2042/54536.
- [254] N. F. EN, “1097-6: Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats-Partie 6: détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d’absorption d’eau,” *AFNOR: Paris, France*, 2014.
- [255] NF EN 1097-2, “L’essai Los Angelès est utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation d’un échantillon de granulats”.
- [256] S. Zhutovsky and K. Kovler, “Cement and Concrete Research Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 1, pp. 20–26, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.07.012.
- [257] Z. Deng, L. Xu, H. Liu, X. Hu, Z. Duan, and Y. Xu, “Prognostics of battery capacity based on charging data and data-driven methods for on-road vehicles,” *Applied Energy*, vol. 339, p. 120954, 2023.
- [258] T. Y. Lo, H. Z. Cui, W. C. Tang, and W. M. Leung, “The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete,” vol. 22, pp. 623–628, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.011.
- [259] T. Y. Lo, W. C. Tang, and H. Z. Cui, “The effects of aggregate properties on lightweight concrete,” *building and environment*, vol. 42, pp. 3025–3029, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.06.031.
- [260] N. E. 196-1 A. 1995, “NF EN 196-1 : Méthodes d’essais des ciments,” no. P 15-471, pp. 1–27, 1995.
- [261] EN196-1, *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength*. 2016.
- [262] A. Schwartzenruber and C. Catherine, “Method of the concrete equivalent mortar (CEM) - a new tool to design concrete containing admixture,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 33, no. 232, pp. 475–482, 2000, doi: 10.1007/bf02480524.
- [263] H. Mefteh, O. Kebaili, H. Oucief, L. Berredjem, and N. Arabi, “Influence of moisture conditioning of recycled

Références bibliographiques

- aggregates on the properties of fresh and hardened concrete,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, no. February 2018, pp. 282–288, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.05.009.
- [264] F. Debieb, L. Courard, S. Kenai, and R. Degeimbre, “Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 6, pp. 421–426, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004.
- [265] J. Rostami, O. Khandel, R. Sedighardekani, A. R. Sahneh, and S. A. Ghahari, “Enhanced workability, durability, and thermal properties of cement-based composites with aerogel and paraffin coated recycled aggregates,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 297, p. 126518, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126518.
- [266] L. Li, D. Xuan, S. H. Chu, J. X. Lu, and C. S. Poon, “Efficiency and mechanism of nano-silica pre-spraying treatment in performance enhancement of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 301, p. 124093, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124093.
- [267] J. Ying, B. Zhou, and J. Xiao, “Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano-SiO₂ and nano-TiO₂,” *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 49–55, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.168.
- [268] D. Xuan, B. Zhan, and C. S. Poon, “Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 65, pp. 67–74, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.
- [269] Ö. Çakır and H. Dilbas, “Durability properties of treated recycled aggregate concrete: Effect of optimized ball mill method,” *Construction and Building Materials*, vol. 268, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121776.
- [270] M. Soomro, V. W. Y. Tam, M. Shigeishi, N. N. Kencanawati, T. Namihira, and K. Kalinowska, “Quality improvement of recycled aggregate,” in *Recycled Concrete*, Elsevier, 2023, pp. 161–194. doi: 10.1016/B978-0-323-85210-4.00004-7.
- [271] X. Wang, J. Xu, Z. Wang, and W. Yao, “Use of recycled concrete aggregates as carriers for self-healing of concrete cracks by bacteria with high urease activity,” *Construction and Building Materials*, vol. 337, p. 127581, 2022.
- [272] A. A. Tabikh and R. J. Weht, “An X-ray diffraction analysis of portland cement,” *Cement and Concrete Research*, vol. 1, no. 3, pp. 317–328, 1971, doi: 10.1016/0008-8846(71)90006-8.
- [273] A. N. Christensen, N. V. Y. Scarlett, I. C. Madsen, T. R. Jensen, and J. C. Hanson, “Real time study of cement and clinker phases hydration,” *Dalton transactions*, no. 8, pp. 1529–1536, 2003.
- [274] R. Snellings, A. Salze, and K. L. Scrivener, “Cement and Concrete Research Use of X-ray diffraction to quantify amorphous supplementary cementitious materials in anhydrous and hydrated blended cements,” *Cement and Concrete Research*, vol. 64, pp. 89–98, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.06.011.
- [275] M. Nedeljković *et al.*, “Non-destructive screening methodology based on handheld XRF for the classification of concrete: cement type-driven separation,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 56, no. 3, 2023, doi: 10.1617/s11527-023-02147-3.
- [276] G. T. dos S. Lima, A. Zaleski, L. U. D. Tambara Júnior, J. C. Rocha, F. Pelisser, and P. J. P. Gleize, “Evaluation of the effect of nanosilica and recycled fine aggregate in Portland cement rendering mortars,” *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 15, no. 5, 2022, doi: 10.1590/s1983-41952022000500009.

Références bibliographiques

- [277] R. Wang, N. Yu, and Y. Li, "Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 242, p. 118164, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118164.
- [278] J. Liu, K. Ma, J. Shen, Y. Xie, and G. Long, "Influence of CO₂ enhancement of recycled aggregate on microstructure of ITZs in recycled concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 65, p. 105805, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105805.
- [279] K. Kohno, T. Okamoto, Y. Isikawa, T. Sibata, and H. Mori, "Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete," vol. 29, pp. 611–614, 1999.
- [280] T. Mauroux, "Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support : influence de l'adjuvantation par des éthers cellulose To cite this version : HAL Id : tel-00808633," 2013.
- [281] G. Fang, Q. Wang, and M. Zhang, "Micromechanical analysis of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash-slag concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 119, no. February, p. 103990, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103990.
- [282] Z. Zhao, J. Xiao, D. Damidot, S. Rémond, D. Bulteel, and L. Courard, "Quantification of the Hardened Cement Paste Content in Fine Recycled Concrete Aggregates by Means of Salicylic Acid Dissolution," *Materials*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/ma15093384.
- [283] Y. Zhou, D. Guo, F. Xing, and M. Guo, "Multiscale mechanical characteristics of ultra-high performance concrete incorporating different particle size ranges of recycled fine aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 307, p. 125131, 2021.
- [284] ASTM C 1012-95, *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*, vol. 11.01. 2017.
- [285] ASTM C 267 – 97, *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*, vol. 04.05. 2017. [Online]. Available: www.astm.org
- [286] NF EN 12390-4, "Essais pour béton durci - Partie 4 : résistance en compression - Caractéristiques des machines d'essai." <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-123904/essais-pour-beton-durci-partie-4-resistance-en-compression-caracteristiques/fa043147/17595>
- [287] E. T. Tunc, "Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste," *Journal of environmental management*, vol. 231, pp. 86–97, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.034>
- [288] J. Xiao *et al.*, "Fundamental behavior of recycled aggregate concrete-overview II: durability and enhancement," *Magazine of Concrete Research*, vol. 74, no. 19, pp. 1011–1026, 2022, doi: 10.1680/jmacr.21.00285.
- [289] J. Xiao *et al.*, "Fundamental behaviour of recycled aggregate concrete—overview I: strength and deformation," *Magazine of Concrete Research*, vol. 74, no. 19, pp. 999–1010, 2022.
- [290] A. Allahvedi and H. Hashemi, "Investigating the resistance of alkali-activated slag mortar exposed to magnesium sulfate attack," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 379–387, 2015.
- [291] A. Hadjsadok, S. Kenai, L. Courard, F. Michel, and J. Khatib, "Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 5, pp. 671–677, 2012, doi:

Références bibliographiques

- 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.011.
- [292] J. Ying, B. Zhou, and J. Xiao, “Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano-SiO₂ and nano-TiO₂,” *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 49–55, 2017.
- [293] H. Zhao, Z. Wu, A. Liu, and L. Zhang, “Numerical insights into the effect of ITZ and aggregate strength on concrete properties,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 120, p. 103415, 2022.
- [294] Y. Liu, P. Ren, N. Garcia-Troncoso, K. H. Mo, and T.-C. Ling, “Roles of enhanced ITZ in improving the mechanical properties of concrete prepared with different types of recycled aggregates,” *Journal of Building Engineering*, vol. 60, p. 105197, 2022.
- [295] M. Wang, Y. Xie, G. Long, C. Ma, and X. Zeng, “Microhardness characteristics of high-strength cement paste and interfacial transition zone at different curing regimes,” *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 151–162, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.084.
- [296] E. da Cruz Teixeira, J. A. Rossignolo, T. I. B. Ferreira, C. M. Medeiros, and N. P. Barbosa, “Study of the transition zone of concretes prepared with metakaolin using sem/eds-associated nanoindentation technique,” *Construction and Building Materials*, vol. 412, p. 134717, 2024.