



Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Génie Civil
Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Réf :

Présenté et soutenu par :
AICHE YAHIA

Le : mercredi 04 juin 2025

AMÉLIORATION DES CARACTÉRISTIQUES DES GRANULATS DU BETON RECYCLÉ

Jury :

Mr. TAALLAH BACHIR	Professeur	Président	Université de Biskra
Mme. ZEGHICHI LEILA	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Mr. ALLAL MEFTAH	Docteur	Co-Rapporteur	Université de Biskra
Mme. HACHEMI SAMIA	Professeur	Examineur	Université de Biskra

Encadreur :

- Mme. ZEGHICHI LEILA

Année universitaire : 2025



Dédicace

Avec l'aide du Tout-Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie:

À mes chers parents,

Mes piliers et mes modèles, qui n'ont jamais cessé de croire en moi.
Merci pour votre immense amour, vos sacrifices silencieux, et votre patience
dans les

moments difficiles. Ce travail est autant le vôtre que le mien.

À mes amis,

Merci pour vos sourires, votre gentillesse dans les moments de fatigue, et vos
encouragements qui ont éclairé mon chemin. Vous avez rendu ce parcours plus
léger et plus

beau.

À Professeure **Leila ZEGHICHI**,

Merci du fond du cœur pour votre bienveillance, votre confiance, et votre
accompagnement

sincère. Votre soutien a été une lumière précieuse dans cette aventure.
Je vous dédie ce mémoire avec tout mon respect, ma gratitude, et beaucoup
d'affection.





Remerciements :

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à Madame
la

Professeure **ZEGHICHI Leila** encadrant principal de ce mémoire, pour son
accompagnement précieux, ses orientations scientifiques rigoureuses et son
engagement

constant tout au long de ce travail. Elle a su faire preuve d'un professionnalisme
exemplaire,

de patience et de disponibilité, en me guidant pas à pas avec des remarques
constructives et

des conseils avisés qui ont grandement contribué à l'aboutissement et à la qualité de
ce

mémoire.

J'adresse également mes remerciements au Docteur **Meftah ALLAL** pour ses
remarques

pertinentes et son soutien technique et méthodologique, qui ont constitué un apport
appréciable à ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous mes enseignants le long de mon
parcours

éducatif , et au responsable du laboratoire de GC.

J'adresse mes remerciements au membres de jury qui vont examiner mon travail

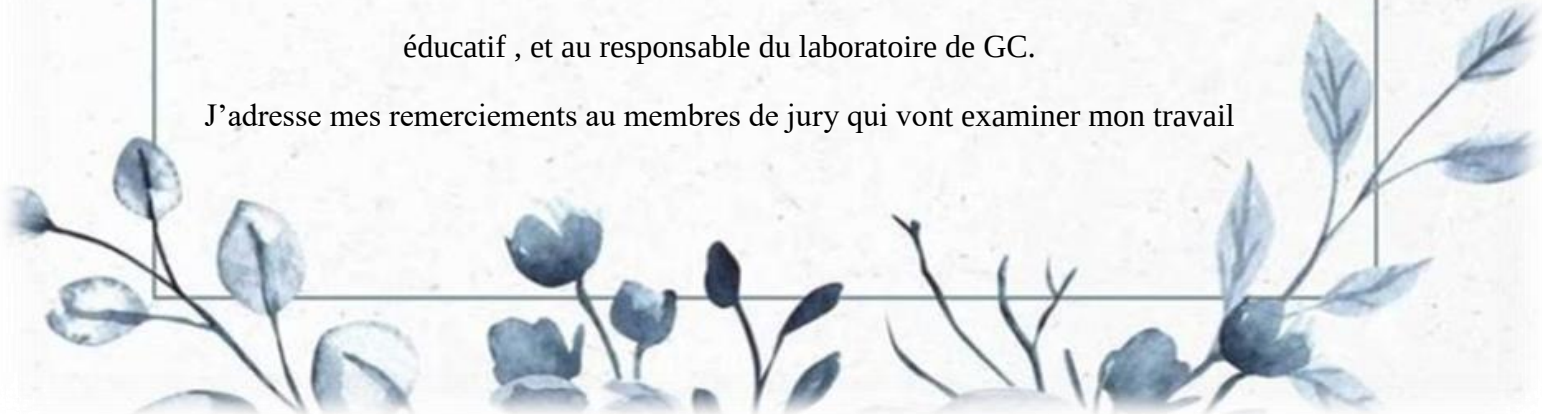


Table des matières

Dedication	
Remerciements	
Table of contents	
List of Figures	
List of Tables	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : valorisation des granulats recyclés dans les bétons

1. Introduction	4
2. Les différents types de granulats.....	4
2.1 Les granulats naturels :	5
2.1.1 Les Granulats Alluvionnaires :	5
2.1.2. Les Granulats de Carrières:.....	5
2.1.3. Les granulats artificiels	6
2.1.4 Les granulats recyclés	7
2.2 Elaboration des granulats recyclés :	8
3. Description du granulat recyclé.....	9
4. Caractérisation des granulats de béton recyclé	10
4.1. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR.....	10
4.2. Masse volumique et absorption d'eau des GBR.....	11
4.3 Résistance aux chocs et à l'abrasion.....	12
4.4 Absorption	12
4.5 La porosité des granulats recyclés	13
4.6 Granulométrie	14
5. Propriétés du béton de granulats recyclés à l'état frais	14

5.1. La maniabilité	14
5.2. La densité.....	15
6. Propriétés du béton de granulats recyclés à l'état durci	15
6.1. Perméabilité	15
6. 2. Porosité	15
6 .3. Caractéristiques mécaniques.....	15
6.3.1. Résistance à la traction par flexion	15
6.3.2 La résistance à la traction par fendage	16
6.3.3 La résistance à la compression.....	16
7. Durabilité du béton de granulats recyclés	17
8. Conclusion.....	18

Chapitre 2 : Les méthodes de traitement des granulats recyclés

1. Introduction	20
2. Traitement des granulats recyclés par carbonatation accélérée	20
3. traitements de surface des granulats de béton recycle par précipitation de carbonate microbien	22
4. Traitement mécanique	23
5 Traitement thermique :	25
5.1. Traitement thermique (haute température) :	25
5.2. Traitement thermique (basse température) :	25
5. 3. Traitement thermomécanique (micro-ondes) :	26
6. Traitement chimique :	27
7. Traitement chimico-mécanique :	28
8. traitement par géo polymérisation :	29
9. conclusion.....	29

Chapitre 3 :Plan d'expérience et modélisation

1. Introduction :	31
2. Définition :	31
3. Principe :	31

4. Analyse des résultats :	31
5. Démarche méthodologique :	32
6. Terminologie :	33
6.1. Les différents types de facteurs :	33
6.2. Notion d'espace expérimental :	33
7. Notion de modélisation mathématique:.....	35
8. Méthodologie des plans d'expériences :	36
8.1. La recherche des facteurs influents :	36
8.2. La modélisation :	36
8.3. L'optimisation :	36
9. Les types de plan d'expérience :	37
9.1. Plan factoriel complet :	37
10. Intérêt des plans d'expériences :	37

Chapitre 4: Matériaux utilisés et procédures expérimentales

1. Introduction	40
2. Matériaux utilisés et leur caractérisation :	40
2.1 Le ciment:	40
2.2. Eau	43
2.3. Sable	43
2.4. Les granulats recyclés :	49
2.5. sika latex pro :	55
3. Préparation du coulis de traitement des GBR	56
4. formulation du béton :	56
4.1 Formulations adoptées (Données de calcule) :	56
4.2. Formulation de bétons de référence :	57
4.4. Fabrication des bétons:	58
4.4.1. Identification des mélanges des bétons :	58

4.4.2 Préparation du mélange et procédure de malaxage des bétons :.....	58
5. Procédure expérimentales :	59
5.1. Malaxeur [EN 196-1] :	59
5.2 Confection des éprouvettes du béton :.....	59
5.3. Essais à l'état durci :.....	60
5.3.1. Essais de Résistance à la compression EN 12390-3	60
5.3.2. La masse volumique l'état durci [EN12363]	61
5.3.3. Absorption d'eau par immersion (NF P 18-459)	61
6. conclusion.....	62

Chapitre 5 : Discussion des résultats

1. Introduction :.....	64
2. élaborations du coulis d'encapsulation :	64
3. Programmes expérimentaux.....	64
3.1. Traitement des GR selon le plan factoriel complet	64
3.2. Caractérisation des GRT :.....	65
3.2.1. Masse volumique absolue :.....	65
3.2.3. Masse volumique apparente :.....	67
3.2.4. Absorption des granulats GBR et GRT:	68
3.2.5. résistance à l'abrasion (micro deval) :.....	69
4. Elaboration des bétons BGRT.....	70
5. caractérisation des bétons :.....	71
5.1. La masse volumique des bétons BGR et BGRT.....	71
5.2 Absorption	72
5.3. Résistance en compression :.....	73
5.4. Texture des GBR et BGRT.....	74
6. optimisation du traitement des GBR	75

6.1. ANOVA for selected factorial model	76
6.2 Fit Statistiques	77
6.3 Final Equation in Terms of Coded Factor	77
6.4. les courbes d'isoréponse :	78
7. Conclusion.....	82
Conclusion générale	84
Référence bibliographique	85

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents).....	11
Tableau 2. 1: Absorption d'eau des GR avant et après carbonatation.	22
Tableau 2. 2: Comparaison des traitements mécaniques pour l'amélioration de la qualité des granulats de béton recyclé.	24
Tableau 4. 1: la composition chimique du ciment	41
Tableau 4. 2: la composition minéralogique (Formule de Bogue).....	42
Tableau 4. 3: Caractéristiques physiques du ciment [FICHE TECHNIQUE].	42
Tableau 4. 4: Caractéristiques mécaniques du ciment	43
Tableau 4. 5: La Masse volumique apparente du sable.....	43
Tableau 4. 6: La Masse volumique absolue sable	44
Tableau 4. 7: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.....	45
Tableau 4. 8: Résultats d'équivalent du sable naturel	46
Tableau 4. 9: Absorption d'eau de sable d'oued.....	47
Tableau 4. 10: Analyse granulométrique du sable naturel (0/5).	48
Tableau 4. 11: la masse volumique apparent 3 fraction.	49
Tableau 4. 12: la masse volumique absolue 3 fractions	50
Tableau 4. 13: absorption d'eau des granulats recycles.	51
Tableau 4. 14: Résultat de l'essai Micro-Deval pour la fraction 15/25 mm.	52
Tableau 4. 15: L'analyse granulométrique de graviers recyclés (15/25) M=3000 g	52
Tableau 4. 16: L'analyse granulométrique de graviers recyclés (8/15) M=3000 g.	53

Tableau 4. 17: L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) M=2000 g.	54
Tableau 4. 18: Composition du béton dosé à 350 Kg / m ³ de ciment [5].....	57
Tableau 5. 1: matrice d'expérimentation.....	64
Tableau 5. 2: la matrice d'expérimentation avec la réponse choisie	76
Tableau 5. 3: L'analyse de la variance (ANOVA) pour le modèle factoriel sélectionné- Réponse: Rc.....	76
Tableau 5. 4: Paramètres statistique du modèle factoriel sélectionné.....	77
Tableau 5. 5: Réponses optimales des caractéristiques de résistance à la compression en fonction du rapport E/C, du pourcentage de latex et de la température de cure	81

Liste des figures

Figure 1. 1: Photos des différents types de granulats.....	5
Figure 1. 2: Les différentes catégories de déchets de chantiers	8
Figure 1. 3: Concassage des déchets de démolition (Centrale de tri Picheta dans le val d'Oise) ...	9
Figure 1. 4: Exemple de granulat recyclé	10
Figure 1. 5: Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps	13
Figure 1. 6: Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton.....	14
Figure 1. 7: Evolution de la résistance à la traction par fendage, dans le temps, en fonction des taux de remplacement des granulats recyclés.	16
Figure 1. 8: Evolution de la résistance en compression des bétons de granulats recyclés	17
Figure 2. 1: Variation de la densité en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP.	21
Figure 2. 2: Traitement par précipitation microbienne (MEB).	23
Figure 2. 3: MCP en fonction du pH des milieux de croissance	23
Figure 2. 4: Élimination du mortier collé en fonction de la température de chauffage et du temps de broyage.....	26
Figure 2. 5: À gauche : Schéma montrant le mécanisme d'affaiblissement d'ITZ et la séparation du mortier de l'agrégat [68]. À droite : Facteurs d'atténuation des micro-ondes des agrégats grossiers et des mortiers humides et secs.....	27
Figure 3. 1: le niveau bas, le niveau haut et le domaine d'un facteur.	34
Figure 3. 2: les points expérimentaux dans un domaine d'étude	35
Figure 4. 1: Ciment utilisé CEM I 42.5 N – SR3	41
Figure 4. 2: la masse volumique apparente du sable.....	44
Figure 4. 3: la masse volumique absolue du sable.	44
Figure 4. 4: Équivalent de sable d'oued.	45
Figure 4. 5: l'Absorption d'eau de sable.	46

Figure 4. 6: l'analyse granulométrique du sable 0.5.	47
Figure 4. 7: courbe d'analyse granulométrique de sable.	48
Figure 4. 8: la masse volumique apparente granulates étudiée.....	49
Figure 4. 9: la masse volumique absolue des 3 fractions.	50
Figure 4. 10: absorption d'eau dans les 3 fractions.	51
Figure 4. 11: essai micro-deval de la fraction 15/25.	51
Figure 4. 12: La courbe d'analyse granulométrique de fraction 15/25.	53
Figure 4. 13: d'analyse granulométrique de fraction 15/25.	53
Figure 4. 14: La courbe d'analyse granulométrique de fraction 8/15.	54
Figure 4. 15: La courbe d'analyse granulométrique de fraction 3/8.	55
Figure 4. 16: sika latex pro.....	55
Figure 4. 17: traitement des GBR.....	56
Figure 4. 18: Méthode de pré-saturation des GBR pendant 24 heures.	58
Figure 4. 19: Malaxeur planétaire à axe vertical.	59
Figure 4. 20: Les moules cubiques (10 × 10 × 10) cm ³	60
Figure 4. 21: Dispositif pour l'essai des résistances à la compression EN [12390-4].	61
Figure 4. 22: Absorption par immersion.	62
 Figure 5. 1: Schéma représentatif du processus d'élaboration et d'encapsulation des GBR. ...	65
Figure 5. 2: la masse volumique absolue de GBR et GRT.	66
Figure 5. 3: la masse volumique absolue de GBR et GRT	67
Figure 5. 4: la masse volumique apparente de GBR et GRT.	67
Figure 5. 5: la masse volumique apparente de GBR et GRT.	67
Figure 5. 6: Diagramme de l'absorption de GBR et GRT.	68
Figure 5. 7: absorption d'eau de GBR et GRT.....	68
Figure 5. 8: Diagramme de résistance a l'abrasion (micro-deval) du GBR et GRT.	69
Figure 5. 9: résistance a l'abrasion (micro-deval) du GBR et GRT.....	70

Figure 5. 10: Elaboration des bétons BGRT et BGR.	71
Figure 5. 11: Diagramme de la masse volumiques des bétons BGRT et GBR.....	71
Figure 5. 12 : la masse volumiques des bétons BGRT et GBR.	71
Figure 5. 13: absorption des bétons BGR et BGRT.....	72
Figure 5. 14: absorption des bétons BGR et BGRT.....	72
Figure 5. 15: résistance en compression des bétons BGR et BGRT.....	73
Figure 5. 16: essai de résistance en compression des bétons BGR et BGRT.	73
Figure 5. 17: BGR.....	74
Figure 5. 18: GR.....	75
Figure 5. 19: GRT	75
Figure 5. 20: diagramme de parito	77
Figure 5. 21: relation entre les valeurs réelles et les valeurs prédites	78
Figure 5. 22: Courbes de niveau 2D pour la résistance à la compression.....	79
Figure 5. 23: Graphiques de réponse 3D , pour la résistance à la compression.....	80
Figure 5. 24: configuration des réponses suivant les niveaux des facteurs.....	81

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
GBR	Granulats de Béton Recyclé
GRT	Granulats Recyclés Traités (au latex)
GR	Gravier Recyclé
GN	Gravier Naturel
BGR	Béton à base de Granulats Recyclés
BGRT	Béton à base de Granulats Recyclés Traités
E/C	Rapport Eau/Ciment (Eau sur Ciment)
ITZ	Interfacial Transition Zone (Zone de Transition Interfaciale)
PCD	Pâte de Ciment Durcie
PCA	Pâte de Ciment Adhérente
MA	Mortier Adhérent
DRX	Diffraction des Rayons X
GR_AV	Gravier Recyclé Avant carbonatation (Avant carbonatation)
GR_AP	Gravier Recyclé Après carbonatation (Après carbonatation)
MCP	Microbial Carbonate Precipitation (Précipitation Microbienne de Carbonate)
Sika Latex Pro	Adjuvant latex utilisé pour modifier le coulis
BGRT1 à BGRT8	Formulations expérimentales du béton avec granulats traités
GRT1 à GRT8	Séries d'échantillons de granulats traités testés
Rc	Résistance à la compression
ρ_{app}	Masse volumique apparente
NF P 18-555	Norme Française pour la masse volumique des granulats
NF P 18-459	Norme Française pour l'absorption d'eau par immersion
NF P 18-577	Norme Française pour l'essai Micro-Deval (usure)
Design-Expert	Logiciel utilisé pour l'analyse statistique expérimentale

Résumé (Français)

Dans le contexte de la construction durable et de la préservation des ressources naturelles, la valorisation des granulats de béton recyclé (GBR) apparaît comme une alternative partielle ou totale dans la fabrication du béton. Cependant, leurs propriétés physiques et mécaniques, notamment une forte absorption d'eau et une résistance réduite, limitent leur usage à grande échelle.

Cette étude vise à améliorer les performances du GBR par un traitement de surface basé sur un enrobage avec un coulis de ciment modifié au latex. Un plan d'expériences factoriel a été utilisé pour étudier l'effet de trois facteurs : le rapport eau/ciment, le taux de latex, et le mode de cure (à l'air ou à 60 °C).

Des essais physiques et mécaniques ont été réalisés pour évaluer l'impact du traitement. Les résultats ont montré une amélioration significative de la densité apparente, une réduction du taux d'absorption, et une augmentation notable de la résistance à la compression.

Ces résultats confirment que le GBR ainsi traité peut être utilisé comme un composant efficace et durable dans le béton, contribuant aux objectifs de l'économie circulaire et à la réduction de l'empreinte environnementale.

Mots-clés : granulats recyclés, traitement au latex, béton, durabilité, résistance à la compression, optimisation

Abstract

In the context of sustainable construction and the depletion of natural resources, the valorization of recycled concrete aggregates (GBR) emerges as a partial or full alternative in concrete production. However, their physical and mechanical properties—especially high water absorption and low strength—hinder their wide-scale use.

This study aims to enhance GBR performance through a surface treatment involving coating with latex-modified cement grout. A factorial experimental design was used to assess the influence of three factors: water-to-cement ratio, latex content, and curing method (air or thermal at 60°C).

Physical and mechanical tests were conducted to evaluate the effect of the treatment. The results showed significant improvements in apparent density, a reduction in water absorption, and a notable increase in compressive strength.

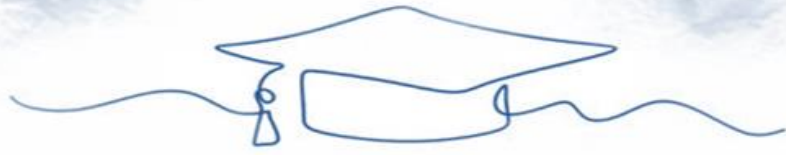
These findings confirm that GBR treated with this method can be considered an effective and sustainable component in concrete, supporting the construction sector's contribution to circular economy goals and environmental impact reduction.

Keywords: recycled aggregates, latex treatment, cement grout, concrete, compressive strength, durability, factorial design

ملخص

في سياق التوجه نحو البناء المستدام والحد من استنزاف الموارد الطبيعية، تبرز أهمية ترميم الحصى المعاد تدويره (GBR) كبديل جزئي أو كلي في صناعة الخرسانة. غير أن خصائصه الفيزيائية والميكانيكية، لا سيما ارتفاع معدل الامتصاص وضعف المقاومة، تمثل عائقاً أمام استخدامه الواسع. تهدف هذه الدراسة إلى تحسين أداء GBR من خلال تطبيق معالجة سطحية تعتمد على تغليفه طلاء إسمنتي معدّل باللاتكس. تم اعتماد خطة تجريبية من نوع "Plan Factoriel" لدراسة تأثير ثلاثة عوامل: نسبة الماء إلى الإسمنت، محتوى اللاتكس، ونوع المعالجة (هوائية أو حرارية 60°). تم إجراء اختبارات فيزيائية وميكانيكية لتقييم أثر المعالجة، وأظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في الكثافة الظاهرية، انخفاضاً في معدل الامتصاص، وزيادة معتبرة في مقاومة الضغط. تؤكد هذه النتائج أن GBR المعالج بهذه الطريقة يمكن أن يُعتمد عليه كمكون فعال ومستدام في الخرسانة، مما يعزز من مساهمة القطاع في تحقيق أهداف الاقتصاد الدائري وتقليل الأثر البيئي.

الكلمات المفتاحية: الحصى المعاد تدويره، المعالجة باللاتكس، الخرسانة، المقاومة الميكانيكية، المتانة، تصميم التجارب



Introduction générale

Introduction générale

La valorisation des granulats recyclés dans les bétons constitue aujourd'hui un axe de recherche prioritaire, en cohérence avec les objectifs du développement durable et de l'économie circulaire [1]. En effet, la raréfaction progressive des ressources naturelles, notamment les granulats alluvionnaires et concassés, conjuguée à une prise de conscience accrue des impacts environnementaux liés à l'extraction et au transport de ces matériaux, pousse le secteur de la construction à explorer des alternatives plus durables [2]. Dans ce contexte, l'intégration de granulats recyclés issus de la démolition de structures en béton s'affirme comme une solution pertinente. Elle permet non seulement de réduire la pression sur les gisements naturels, mais aussi de valoriser les déchets de chantier, qui représentent une part importante des déchets produits par le secteur du BTP. Cette approche s'inscrit dans une logique vertueuse de réduction des impacts environnementaux, de préservation des ressources et d'optimisation de la gestion des déchets [3].

L'augmentation continue de la demande en matériaux de construction, couplée aux impacts négatifs de l'extraction des ressources naturelles, pousse les chercheurs à explorer de nouvelles solutions. Parmi celles-ci, l'utilisation des granulats recyclés apparaît comme une voie viable pour la production de bétons performants tout en contribuant à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des déchets [4].

Cependant, l'emploi des granulats recyclés pose divers défis, notamment en termes de performance mécanique faible et forte absorption [5], de durabilité et de maniabilité des bétons produits. Ces propriétés sont fortement influencées par les caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés, telles que leur porosité élevée et leur capacité d'absorption d'eau accrue par rapport aux granulats naturels [5].

Dans cette optique, ce mémoire propose une méthode pour améliorer les propriétés des granulats recyclés ; une approche expérimentale est mise en œuvre afin d'évaluer concrètement l'efficacité du traitement par enrobage au coulis de ciment modifié par le latex. Après l'incorporation de ces granulats modifiés dans le mélange béton, les propriétés mécaniques et physiques du matériau seront analysées.

Une optimisation du traitement par plan factoriel est faite en considérant trois facteurs indépendants qui influencent les propriétés des granulats recyclés ainsi que le béton.

Ces facteurs sont : le rapport E/C du coulis de ciment, la teneur en latex et le type de durcissement soit à l'air libre ou à une température de 60 °c

Ce travail s'articule autour de cinq chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré à la valorisation des granulats recyclés dans les bétons. Le deuxième présente les différentes méthodes de traitement des granulats recyclés. Le troisième chapitre traite le plan d'expériences et la modélisation. Le quatrième chapitre décrit les matériaux utilisés ainsi que les procédures expérimentales mises en œuvre. Enfin, le dernier chapitre présente et analyse les résultats obtenus, en mettant en évidence les performances mécaniques des bétons à base de granulats recyclé traité par latex.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.



Chapitre 1:

Valorisation des granulats recyclés

dans les bétons

1. Introduction

L'augmentation de la population mondiale et l'amélioration globale du niveau de vie moyen des résidents entraînent une hausse de la production des articles de consommation, générant simultanément un volume croissant de déchets. L'accumulation de ces résidus, qui peuvent durer des milliers d'années, engendre d'importants enjeux pour nos sociétés de consommation, car ils polluent notre environnement et provoquent parfois des dommages dans les écosystèmes vivants. De surcroît, cette activité foisonnante de production épuise les ressources naturelles et l'énergie, mettant ainsi en péril l'économie de plusieurs nations. Effectivement, la diminution des stocks de granulats naturels et l'anticipation d'une baisse de leur production incitent à explorer d'autres sources d'approvisionnement en granulats pour le secteur du béton. Par conséquent, l'industrie du béton et du génie civil utilise peu ou pas du tout les granulats recyclés provenant des déchets de démolition, des résidus de production de produits en béton et d'autres déchets. Cependant, leur potentiel d'utilisation dans des produits à faible résistance mécanique est considérable, à condition de respecter certaines précautions d'usage.

C'est pour cette raison que le recyclage et la valorisation des déchets sont actuellement perçus comme une solution prometteuse pour combler l'écart entre production et consommation tout en préservant l'environnement. [6]

2. Les différents types de granulats

Les agrégats employés dans le béton peuvent être d'origine naturelle, synthétique ou recyclée (Figure 1.1).

- « Naturels », quand ils sont dérivés de roches non consolidées ou compactes et qu'ils n'ont subi aucun procédé autre que mécanique (réduction de taille) ;
- « Artificiels », quand ils résultent de la transformation thermique et mécanique de roches ou de minerais
- « Recyclés », lorsqu'ils proviennent du démantèlement d'ouvrages ou quand ils sont réemployés [7].



Figure 1. 1: Photos des différents types de granulats [8].

2.1 Les granulats naturels :

Les granulats naturels ont deux origines : les carrières de roches massives et les dépôts alluvionnaires. Sur le plan géologique, les granulats naturels sont issus de trois types de roches

- Éruptives : granites et basaltes porphyres,
- Sédimentaires : calcaires, grès et quartzites,
- Métamorphiques : gneiss ainsi que les amphibolites [8].

L'analyse des compositions minérales révèle trois catégories distinctes : les roches calcaires, les roches siliceuses et les silice-calcaires [7].

2. 1.1 Les Granulats Alluvionnaires :

Dits roulés, dont la forme a été obtenue par l'érosion. On trouve principalement des dépôts alluvionnaires dans le lit d'une rivière (et éventuellement en mer) [9]. Ces granulats subissent un lavage pour se débarrasser des particules argileuses, et sont ensuite criblés pour obtenir diverses catégories de granulats [10].

2.1.2. Les Granulats de Carrières:

L'obtention des granulats se fait par le biais de l'abattage et du concassage, suivis de processus de criblage ou de tamisage pour choisir des grains d'une taille spécifique. Les caractéristiques des granulats concassés sont influencées par plusieurs facteurs : source de la roche, uniformité du banc, niveau de concassage... [11]. Ces granulats démontrent une excellente adhésion avec la pâte de ciment grâce à leur texture de surface et leur rugosité. En

revanche, ils requièrent davantage d'eau pour une maniabilité équivalente en raison de leurs angles et par conséquent de leurs surfaces spécifiques étendues [12].

2.1.3. Les granulats artificiels

Dans cette classification, on trouve des granulats issus de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels traités.

❖ Sous-produits et Déchets de L'industrie:

✚ Laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est le sous-produit majeur de l'industrie sidérurgique, il regroupe toutes les composantes minérales présentes dans la charge du haut fourneau (minerai et additifs) qui demeurent après l'extraction du fer [11].

✚ Le laitier cristallisé broyé :

Il est produit grâce à un refroidissement progressif à l'air libre, en fosse. Il présente les caractéristiques et l'apparence d'une roche magmatique. Sa porosité peut varier, plus le refroidissement est progressif et en couches fines, plus le laitier est cristallisé et dense [8]. Sa composition chimique est principalement composée de chaux, magnésie, silice et alumine, et il a une densité apparente supérieure à 1250 Kg/cm³ [14].

✚ Granulats à caractéristiques spéciales produits industriellement :

Ces granulats sont spécifiquement élaborés pour des applications particulières, comme les granulats extrêmement résistants destinés à augmenter la durabilité des sols industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou les granulats réfractaires [13].

✚ Agrégats légers par expansion ou frittage :

Ces granulats présentent des propriétés de résistance, d'isolation et de poids très attractives. Les matériaux les plus courants sont l'argile ou le schiste expansé, et leur masse volumique peut varier de 400 à 800 kg/m³ en fonction du type et de la granulométrie. Ils autorisent la production de bétons structuraux ainsi que de bétons offrant une bonne isolation thermique [11].

2.1.4 Les granulats recyclés

Le granulat recyclé est le produit obtenu à partir de la conversion de matériaux inorganiques précédemment utilisés dans le domaine de la construction. Cette catégorie inclut des matériaux tels que le béton recyclé, les granulats d'enrobés bitumineux, etc.

Les résidus de construction :

Les résidus de construction se composent principalement des déchets issus des chantiers liés à la construction et aux travaux publics, ainsi que des déchets générés par les activités industrielles dédiées à la production de matériaux de construction. Ils sont caractérisés comme des déchets inertes qui ne se dégradent pas, ne s'enflamment pas, ne génèrent aucune autre réaction physique ou chimique, sont non biodégradables et n'altèrent pas d'autres substances avec lesquelles ils sont en contact d'une manière susceptible de provoquer une pollution environnementale ou de nuire à la santé humaine [15].

Les déchets admissibles sont :

béton, pierres, tuiles, céramiques, briques, carrelages ainsi que les enrobés bitumineux dépourvus de goudron. L'amiante est classée comme déchet inerte, cependant son emploi est prohibé en raison de problèmes de santé [16].

La figure (1.2) montre les divers types de déchets générés sur les chantiers et leur champ d'application [17].

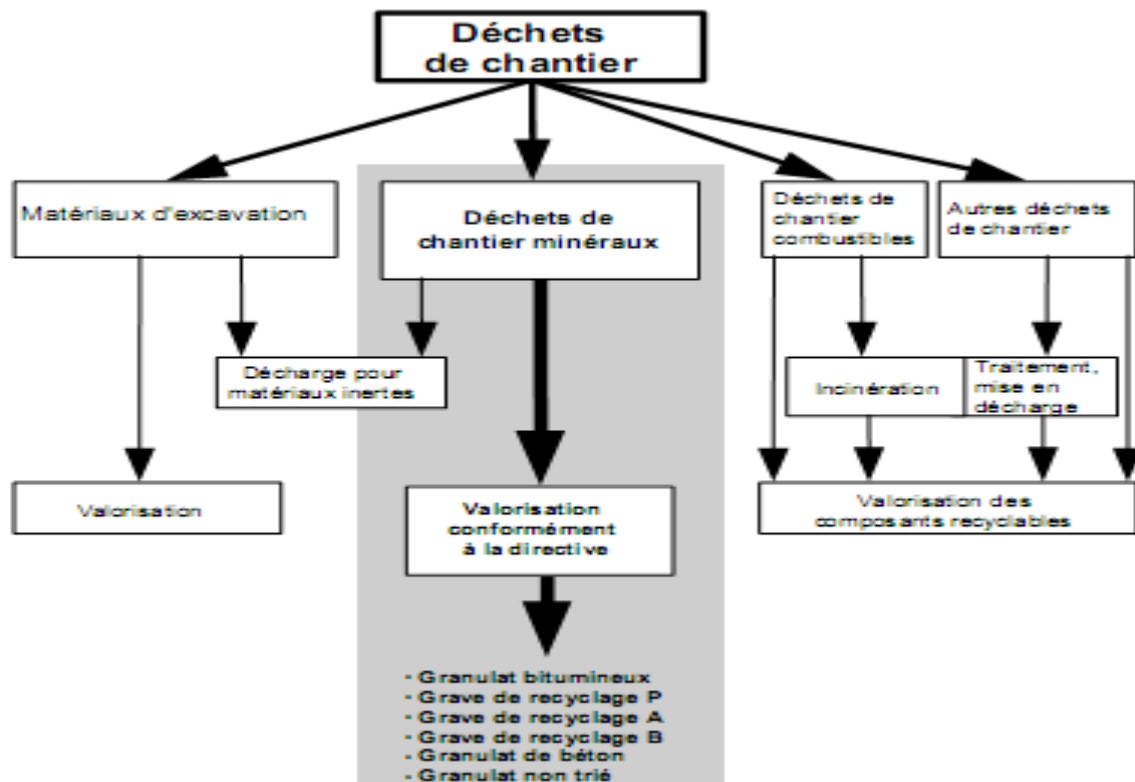


Figure 1. 2: Les différentes catégories de déchets de chantiers [17]

2.2 Elaboration des granulats recyclés :

La production de granulats recyclés se fait dans des installations fixes ou mobiles, qui comportent les mêmes étapes principales de traitement que celles utilisées pour les granulats naturels (concassage, criblage et éventuellement lavage). Toutefois, un traitement préalable particulier doit être effectué. Il implique le processus de découpe des ferrailles et la réduction des plus gros composants. (Veuillez consulter la Figure 1.3).

Le concasseur à percussion offre une réduction granulaire supérieure (comportant moins de particules fines) et favorise la séparation des renforts du béton, cependant l'usure de l'équipement est considérable et la taille des granulats d'entrée est restreinte [18]. Il offre aussi la possibilité d'améliorer la cubicité du matériau produit [19].



Figure 1. 3: Concassage des déchets de démolition (Centrale de tri Picheta dans le val d'Oise) [20]

3. Description du granulat recyclé

Les granulats recyclés sont constitués du granulat d'origine et du mortier qui y est lié. On les envisage comme un système constitué de deux phases distinctes : le mortier et le granulat d'origine. La quantité de mortier collé au granulat d'origine a une influence significative sur les caractéristiques du granulat recyclé et facilite l'évaluation de sa qualité. L'une des répercussions de la présence du mortier adhérent est l'émergence d'une zone de transition entre le granulat initial et le mortier attaché, en plus de la zone de transition qui se constitue entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La configuration d'un granulat recyclé est illustrée dans(la figure 1.4) [21].

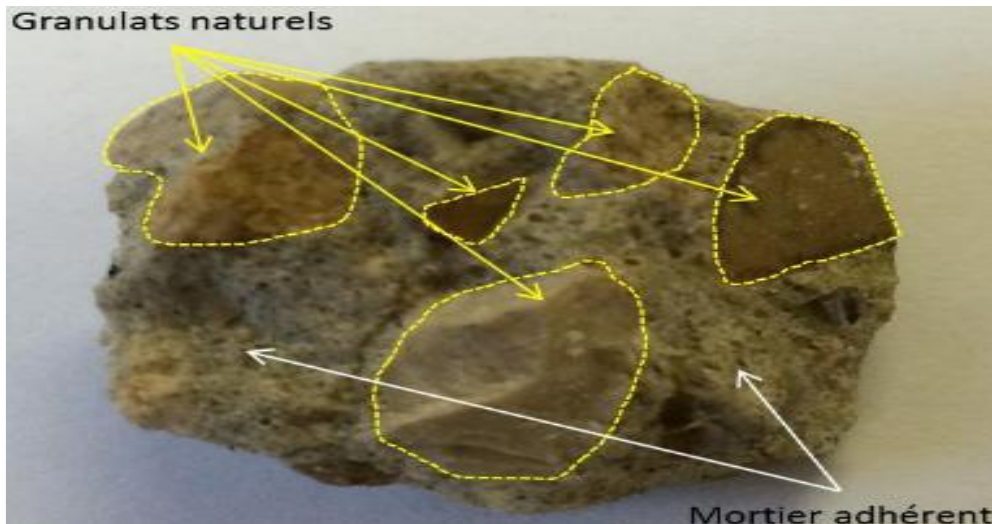


Figure 1. 4: Exemple de granulat recyclé [21].

4. Caractérisation des granulats de béton recyclé

Les granulats de béton recyclé (GBR) se composent d'une combinaison étroite de granulats naturels (GN) et de pâte de ciment durcie adhérente. Ils peuvent aussi renfermer des contaminants (bitume, métaux, plastique, plâtre, terre, bois, etc.) présents dans les Déchets de Construction et de Démolition. Ainsi, les GBR présentent une plus grande hétérogénéité que les GN. De plus, du fait de leur composition spécifique, ils ont des caractéristiques qui diffèrent considérablement de celles des GN. Généralement, comparés aux granulats naturels, les GBR [22] :

- ✓ Sont plus légers, plus anguleux et ont des compacités plus faibles ;
- ✓ Sont plus poreux, plus fragiles et ont une plus grande absorption d'eau ;
- ✓ Sont susceptibles de réduire l'efficacité des super plastifiants en raison des interactions potentielles avec les sulfates et les impuretés.

4.1. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR

Les diverses réglementations et directives relatives aux critères chimiques des GBR pour leur réemploi dans le béton se focalisent sur certaines caractéristiques spécifiques, comme la concentration totale en chlorures et sulfates solubles (dans l'eau ou l'acide) présentes dans le mortier adhésif, ou encore la présence de substances organiques, en vue de déterminer leur possibilité de réutilisation. Toutefois, il est également indispensable de

connaître d'autres propriétés chimiques et minéralogiques des GBR pour éviter certaines maladies, telles que la réaction alcali-silice, et pour saisir les mécanismes liés. Des études de DRX ont été réalisées sur divers types de sables et gravillons de GBR, développées dans le cadre d'un projet de recherche appelé RECYBETON [23] mené sur quatre sites de recyclage identifiés 1 à 4.

Ces observations indiquent que le quartz et la calcite (c'est-à-dire, le calcaire) sont les deux minéraux qui apparaissent systématiquement. Avec une intensité de pics particulièrement élevée, sans tenir compte du contexte géologique et géographique.

Tableau 1. 1: Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents)[24].

Plateforme	Principaux minéraux identifiés par DRX à l'exclusion du quartz et de la calcite
1	Dolomite, Feldspaths K-Na (microcline/albite)
2	Micas (muscovite), Feldspaths K-Na (microcline/albite), chlorite
3	Dolomite et Feldspaths K, pics très faibles (microcline/albite)
4	Dolomite, Feldspaths K-Na

4.2. Masse volumique et absorption d'eau des GBR

Habituellement, les GBR présentent une capacité d'absorption d'eau plus élevée et une densité volumique réelle plus faible que les granulats naturels, ceci est dû à la présence des pâtes de ciment durcies PCD. Actuellement, il n'y a pas de norme spécifique pour déterminer la densité réelle et l'absorption d'eau des GBR. Les normes relatives aux granulats naturels sont également appliquées aux GBR [25].

Les caractéristiques physiques des GBR peuvent fluctuer considérablement en fonction de leur provenance et de leur dimension (sable ou gravillon). La densité moyenne réelle de tous les résultats compilés dans la littérature est de 2 327 kg/m³ pour les gravillons et de 2 065 kg/m³ pour les sables de GBR. les résultats d'Absorption 24 h , les taux sont de 4,7 % pour les granulats et de 9,5 % pour les sables [25].

Cependant, les protocoles conçus pour les granulats naturels ne conviennent pas vraiment aux GBR. Parce que l'immersion des GBR peut provoquer un décollement partiel de la PCD. Ainsi, le séchage à l'étuve à 105 °C destiné à déterminer la masse sèche peut retirer une partie de l'eau associée aux hydrates de la PCD. On dispose de techniques particulières pour les GBR. Toutefois, ces techniques ne permettent pas de définir avec précision l'absorption d'eau dès le commencement de l'expérience. Ces techniques ont démontré que, à l'inverse des granulats naturels examinés, l'absorption d'eau par les GBR n'est pas systématiquement complète après une immersion de 24 heures dans l'eau. Dans certaines situations, un équilibre stable peut nécessiter jusqu'à 120 heures à atteindre [25].

4.3 Résistance aux chocs et à l'abrasion

L'attribution de la catégorie de résistance à la fragmentation des gravillons recyclés destinés au béton selon les directives de la norme européenne [NF EN 206/CN, 2014] se fonde sur le coefficient Los Angeles (LA), qui est déterminé conformément à la norme [NF EN 1097-2, 2010] pour les gravillons naturels. Typiquement, le coefficient Los Angeles, évalué sur les matériaux de construction recyclés, se situe entre 20 et 40. Ainsi, elle dépasse légèrement les valeurs standards des granulats naturels. C'est la composition en mortier des GBR qui justifie cette divergence.

4.4 Absorption

L'évaluation de la qualité d'un granulat recyclé peut être réalisée facilement en mesurant son absorption. L'absorption du granulat est principalement due au mortier résiduel. Un taux d'absorption élevé signale une abondance de mortier résiduel [26] et par conséquent, influence davantage les caractéristiques du béton préparé avec ce type de granulats. Cette caractéristique est particulièrement cruciale, car elle influence la qualité de l'eau à intégrer au mélange pour une maniabilité spécifique. Étant donné que le granulat recyclé est largement plus prisé que le granulat naturel, la quantité d'eau qu'il retient lorsqu'il est saturé est nettement plus importante. Il est donc indispensable d'ajuster la quantité d'eau intégrée au mélange pour conserver le même ratio E/L.

Lors de l'emploi du granulat recyclé séché, une autre difficulté pourrait survenir. Étant donné qu'une absorption accrue se produit dans les 30 premières minutes pour un granulat recyclé [27], l'emploi de ce dernier à l'état sec pourrait nuire aux propriétés rhéologiques du béton frais.

La figure 1.5 présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 premières minutes.

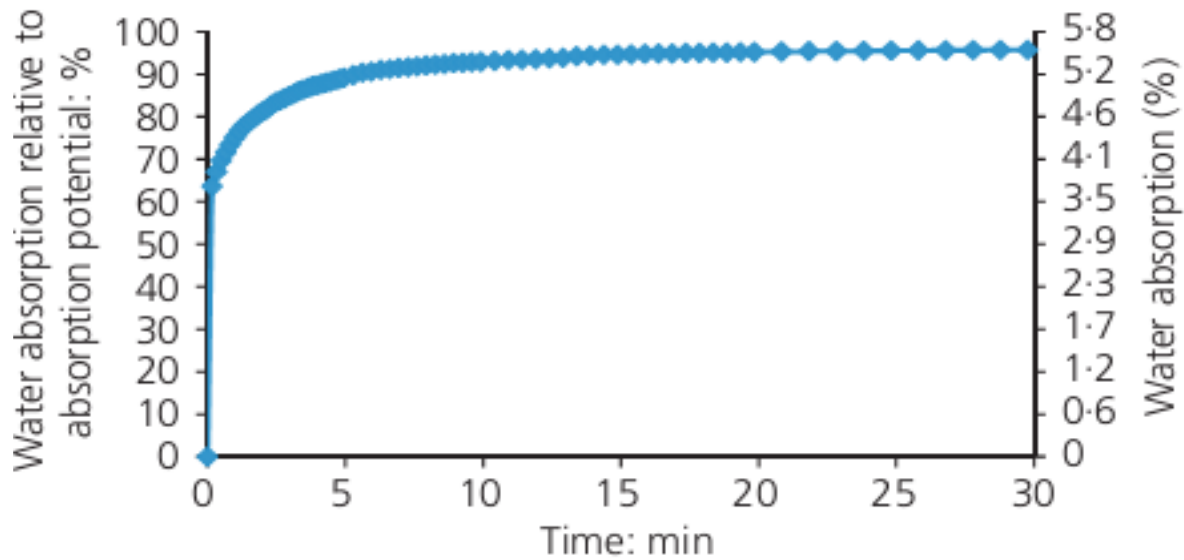


Figure 1. 5: Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [28].

4. 5 La porosité des granulats recyclés

C'est elle qui est responsable de l'importante adsorption d'eau. Cette haute porosité est une caractéristique physique du matériau qui est liée à la constitution des granulats recyclés. La porosité des granulats recyclés est aussi influencée par la proportion de ciment dans le béton d'origine. Cette dernière s'accroît notablement avec l'augmentation de la quantité de pâte de ciment [29]. Ce vieux mortier de ciment est poreux et présente des microfissures dues aux tensions subies durant sa période d'utilisation, ainsi qu'au cours du processus de concassage pour la fabrication des granulats recyclés [30], [31].

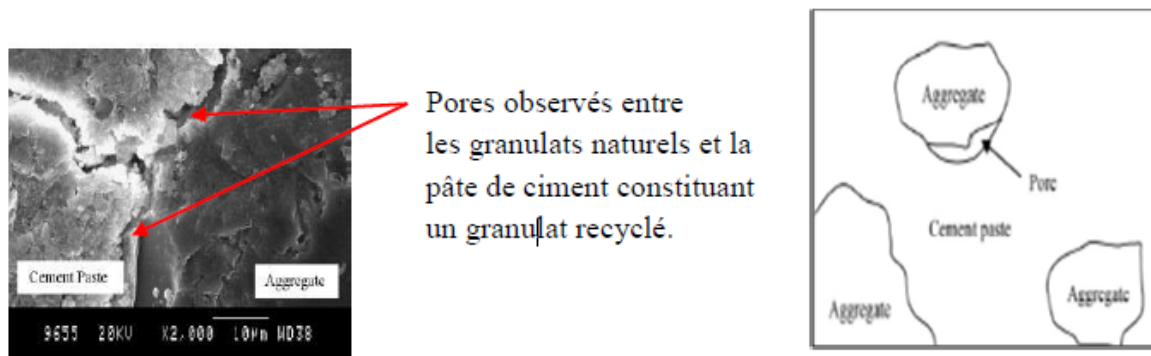


Figure 1. 6: Interface granulat naturel/pâte de ciment d'un granulat recyclé de béton[32].

4.6 Granulométrie

Le profil de taille des GR diffère généralement de celui des GN. Toutefois, dans de nombreuses études, les GR sont générés en utilisant les méthodes de broyage et de criblage. De ce fait, leur taille se trouve généralement à la limite supérieure de la gradation du broyeur. Selon Gonzalez-Fonteboia et al. [33], ils ont combiné deux fractions de gravier naturel pour obtenir une distribution granulométrique comparable à celle des GR.

L'hétérogénéité dans la taille des particules aide à diminuer l'espace global des interstices entre les granulats. De nombreux chercheurs ont constaté que les granulats recyclés contiennent souvent plus de particules fines que les granulats conventionnels [34] [35].

5. Propriétés du béton de granulats recyclés à l'état frais

5.1. La maniabilité

L'affaissement du béton intégrant tous types d'agrégats recyclés devrait être inférieur à celui du béton conventionnel en raison de la plus grande capacité des granulats recyclés à absorber l'eau par rapport aux granulats naturels. La surface et l'angularité des granulats recyclés ont également un impact significatif sur la maniabilité du béton [36]. Plusieurs études et publications antérieures ont signalé une maniabilité réduite des bétons contenant des granulats recyclés par rapport aux bétons de granulats naturels, soulignant que l'ajout d'eau supplémentaire était nécessaire pour gérer l'ouvrabilité [37], [38], [39].

5.2. La densité

Le béton frais qui intègre des granulats recyclés a une masse volumique légèrement plus faible que celui qui contient des granulats naturels, en raison de la densité inférieure des granulats recyclés. La principale raison de la baisse de densité est la présence résiduelle de mortier de ciment attaché à l'agrégat [40].

6. Propriétés du béton de granulats recyclés à l'état durci

6.1. Perméabilité

Elle est bonifiée avec le taux de substitution du granulat. Cette hausse est en grande partie attribuée à l'absorption d'eau par les granulats recyclés. Toutefois, certains travaux n'ont pas observé cette hausse pour un taux de remplacement de 20%. [41]

6. 2. Porosité

Cette capacité est généralement liée à leur potentiel d'absorption, au volume des pores et à leur distribution. En raison du mortier adhérent aux granulats, les bétons recyclés présentent une porosité supérieure à celle du béton standard. Les pourcentages de porosité rapportés dans les sources littéraires varient entre 14% et 20,1%. [42]

6 .3. Caractéristiques mécaniques

6.3.1. Résistance à la traction par flexion

Les recherches menées sur la résistance à la flexion des bétons recyclés montrent des résultats qui varient légèrement d'une étude à l'autre. Si toutes les études montrent une légère baisse de la résistance à la flexion du béton recyclé comparativement au béton traditionnel, aucune différence notable n'est observée même lorsque 100% des agrégats sont recyclés [43]. Cela est attribué à la liaison inter faciale diminuée de la zone de transition entre le GBR et le nouveau mortier [44]. Il apparaît également que la qualité de la surface des granulats joue un rôle crucial dans la résistance à la traction et que la rugosité des granulats recyclés est considérable, ce qui a renforcé l'adhérence entre la pâte et le granulat.

6.3.2 La résistance à la traction par fendage

Tout comme pour la compression, il est évident que la résistance à la traction par fendage des bétons intégrant des granulats recyclés est moins élevée comparée au béton traditionnel, d'autant plus qu'elle se réduit davantage avec l'augmentation de la proportion de granulats recyclés.

Plusieurs recherches indiquent que la résistance à la traction par fendage des bétons intégrant des granulats recyclés s'améliore significativement lorsque les périodes de cure sont prolongées. Selon Kou et al [45], une amélioration de la microstructure de la zone de transition inter faciale (ITZ) et, par conséquent, un renforcement du lien entre le nouveau béton et les anciens agrégats pourraient expliquer l'augmentation constatée de la résistance à la traction.

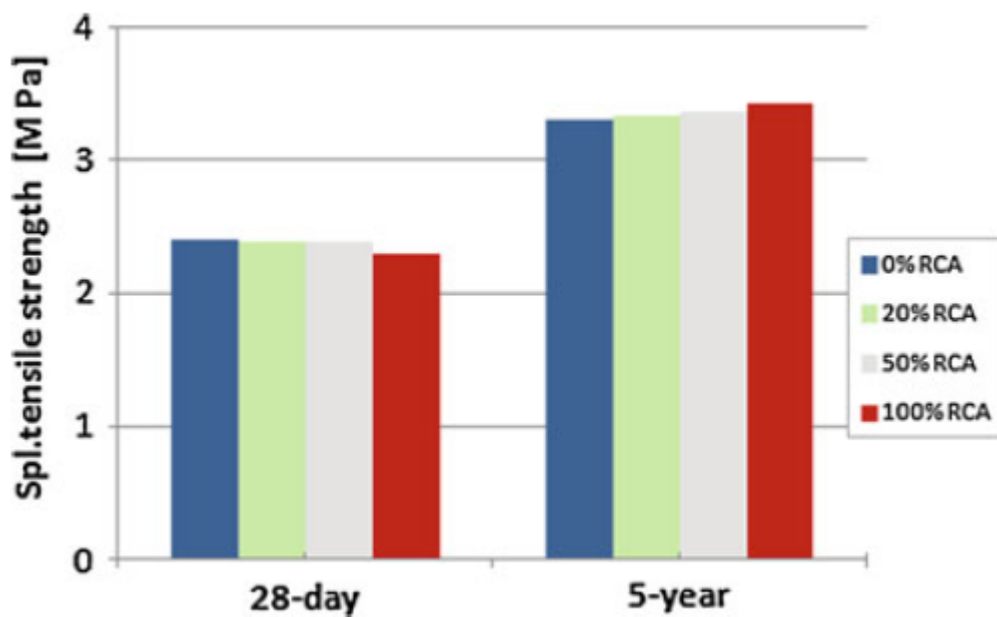


Figure 1. 7: Evolution de la résistance à la traction par fendage, dans le temps, en fonction des taux de remplacement des granulats recyclés[45].

6.3.3 La résistance à la compression

Il existe un lien étroit entre la résistance mécanique du béton et les propriétés mécaniques des granulats. Selon plusieurs chercheurs [46], [47], les bétons composés de

granulats recyclés présentent une solidité mécanique satisfaisante et peuvent parvenir à des résistances à la compression comparables à celles d'un béton traditionnel. La résistance à la compression des bétons fabriqués avec des granulats recyclés est directement affectée par la robustesse des granulats employés. Étant donné que les granulats recyclés ont généralement une densité plus faible que les granulats naturels, due à la présence de l'ancien mortier souvent hétérogène, la résistance à la compression des bétons recyclés est habituellement moins élevée.

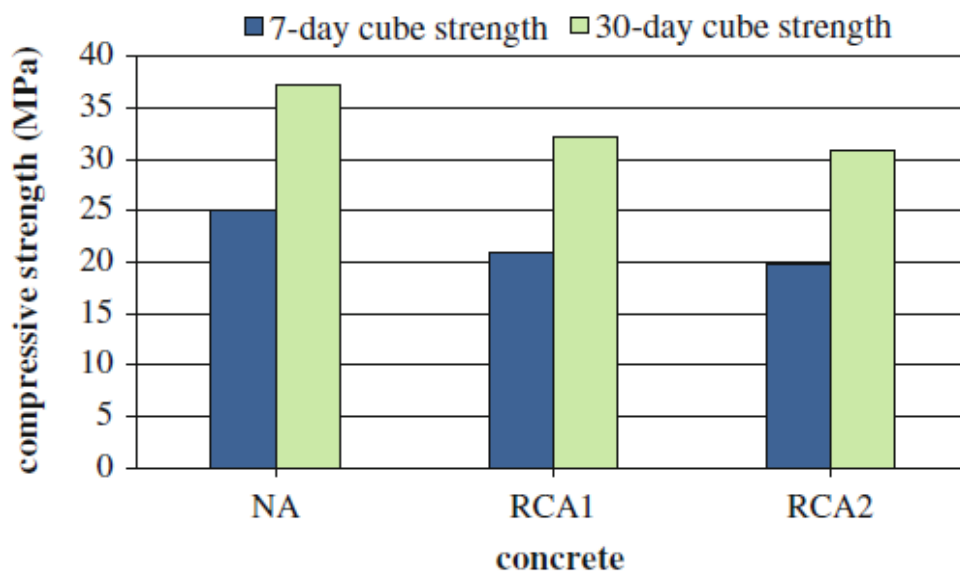


Figure 1. 8: Evolution de la résistance en compression des bétons de granulats recyclés [48]

7. Durabilité du béton de granulats recyclés

Que ce soit dans du béton recyclé ou du béton traditionnel, les attaques chimiques ciblent surtout la pâte de ciment, engendrant ainsi des réactions chimiques similaires avec les mêmes processus d'agressions. Ces attaques sont d'autant plus préoccupantes que le béton est poreux et qu'il renferme de l'eau libre [49].

Silva et al. [50] ont découvert que l'accroissement des volumes de GBR entraîne des profondeurs plus importantes de carbonatation lorsque tous les autres paramètres restent constants. Le recours à 100% de GBR dans le béton peut conduire à une profondeur de carbonatation pouvant aller jusqu'à deux fois plus que celle du béton classique. Cela peut s'expliquer aisément par la porosité supérieure des granulats fins due à la plus grande proportion de mortier collé, qui n'a pu être dissocié lors du processus de concassage.

Les bétons intégrant des granulats recyclés issus de béton à air entraîné montrent une résistance aux cycles de gel et de dégel, qui est même légèrement supérieure à celle du béton témoin [51]. En revanche, les bétons qui utilisent des granulats recyclés sans air entraîné montrent de mauvaises performances, bien que le contenu en air du béton neuf soit acceptable [52].

8. Conclusion

De nombreuses études à l'échelle mondiale ont porté sur l'usage des granulats recyclés dans le béton. Globalement, une grande variabilité des résultats a été notée en ce qui concerne les caractéristiques mécaniques des bétons recyclés, surtout l'impact du taux de remplacement sur leur rendement.

Ce chapitre souligne les spécificités des granulats recyclés : densité, porosité, capacité d'absorption d'eau, distribution granulométrique, résistance à l'abrasion. Ces caractéristiques ont un impact direct sur les performances du béton, y compris sa facilité de manipulation, sa densité, sa résistance à la compression, ainsi que sa longévité face à la carbonatation, et aux cycles de gel et de dégel.



Chapitre 2:

Les méthodes de traitement des granulats recyclés

1. Introduction

Face à l'expansion rapide du secteur de la construction, une quantité considérable de résidus issus de la construction et de la démolition est produite chaque année à l'échelle mondiale. Actuellement, seule une partie minime de ces débris de béton est remise en circulation sous la forme de granulats recyclés pour produire du béton. Pour optimiser l'utilisation des granulats recyclés dans le béton, il est essentiel d'examiner les moyens d'améliorer leurs caractéristiques.

Les granulats recyclés se composent d'un mélange étroit de granulats naturels et de pâte de ciment durcie. Ce matériau est généralement beaucoup plus perméable que les granulats naturels, et aucune technique efficace n'est disponible pour distinguer les mortiers des particules GR à partir des granulats naturels dans une usine de recyclage.

Les propriétés et la composition du ciment durci exercent une influence majeure sur les caractéristiques des granulats recyclés. Les caractéristiques des granulats recyclés (GR) sont influencées par de nombreux facteurs, notamment le type de béton source, les impuretés, la technique de concassage utilisée pour leur élaboration, le processus d'altération (particulièrement la carbonatation) et les conditions dans lesquelles ils sont entreposés. La porosité des granulats recyclés (GR) représente un obstacle significatif à leur réemploi, car l'absorption d'eau lors du malaxage réduit la maniabilité des bétons.

La présence de mortier de ciment résiduel entraîne une densité réduite, un taux d'absorption d'eau accru, une diminution de la résistance à l'abrasion (test Los Angeles) et une diminution de la solidité des GR comparativement aux granulats naturels.

À cet effet, les scientifiques envisagent de trouver une solution pour réduire cette absorption d'eau et la porosité, en cherchant des méthodes pour optimiser les caractéristiques des granulats recyclés. Ce chapitre exposera des illustrations de divers traitements existants (tirés de la littérature) destinés à réduire cette absorption excessive, afin qu'ils soient aussi performants que les granulats naturels [53].

2. Traitement des granulats recyclés par carbonatation accélérée

Des scientifiques ont employé une méthode de carbonatation qui modifie les caractéristiques du mortier entourant le granulat naturel et réduit la haute porosité des granulats recyclés, diminuant ainsi le taux d'absorption d'eau [53].

Selon les travaux des chercheurs, l'emploi de la technique de carbonatation accélérée en laboratoire a montré que la portion soluble dans l'acide salicylique se réduit, tandis que la densité et la surface spécifique des (GR) tendent à augmenter. En revanche, la porosité des (GR) se réduit, entraînant une diminution de leur capacité à absorber l'eau.

L'accroissement de la densité est attribué à l'augmentation de la taille des particules, qui résulte à la conversion de la portlandite en calcite, une substance plus dense que la portlandite.

Suite à la carbonatation, l'inclinaison de la ligne représentant la densité par rapport à la dimension des particules est moindre que celle des GR_AV. Cette observation peut s'expliquer par le fait que la portion plus fine des granulats possède une concentration en ciment plus importante que celle de la fraction grossière, et que la densité de cette dernière a augmenté suite au processus de carbonatation.

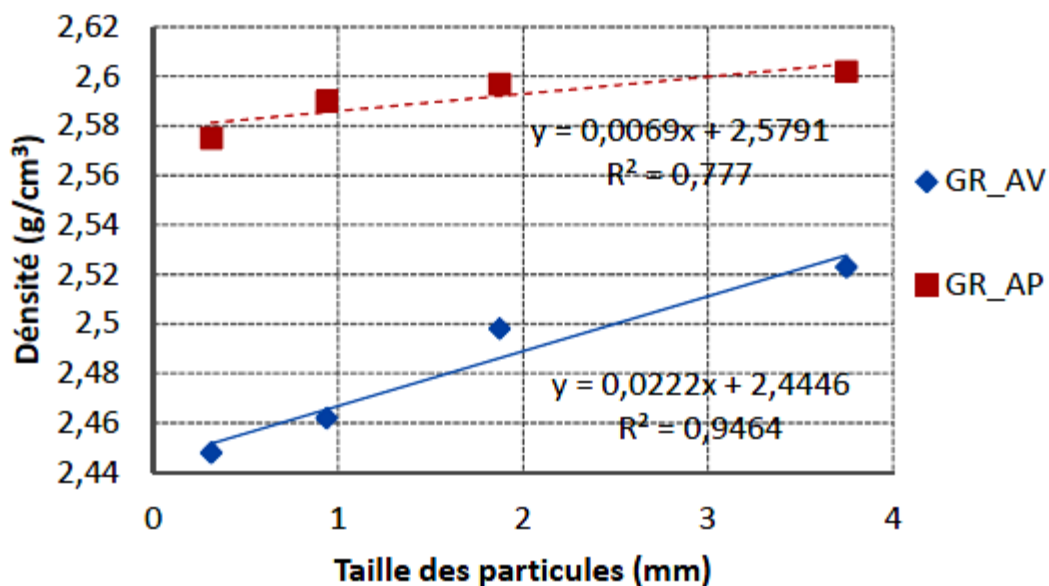


Figure 2. 1: Variation de la densité en fonction de la taille des particules pour GR_AV et GR_AP[54].

Zhao et al. [54]. ont observé que l'absorption d'eau mesurée pour les GR_AP est considérablement plus faible que celle mesurée pour les GR_AV : l'absorption d'eau diminue de 26,3%, 28,5%, 33,1%, 35,3% pour les fractions 2,5/5 mm, 1,25/2,5mm, 0,63/1,25mm et 0/0,63mm respectivement. Ceci pourrait être le résultat de la diminution de la porosité due à la carbonatation

Tableau 2. 1: Absorption d'eau des GR avant et après carbonatation[54].

Fraction (mm)	GR-AP (%)	GR_AV (%)	Diminution après carbonatation (%)
0/0.63	6.35	9.82	35.3
0.63/1.25	6.27	9.37	33.1
1.25/2.5	5.57	7.79	28.5
2.5/5	5.25	7.12	26.3

3. traitements de surface des granulats de béton recycle par précipitation de carbonate microbien :

Analysé le traitement de surface des granulats de béton recyclé (GR) via la précipitation du carbonate microbien (MCP). Ils sont arrivés à la conclusion qu'une bactérie capable d'hydrolyser l'urée peut déclencher la précipitation de cristaux de CaCO_3 du GR et limiter l'absorption d'eau. Un nombre de pics de MCP atteignant 0,111, associé à un pH de 9,5, indique une concentration élevée en calcium. De manière similaire, le taux, la quantité et la nature des MCP sur GR peuvent être ajustés (augmentés) grâce à une gestion appropriée de la culture et des conditions de précipitation [53].

Des tests ont été menés pour examiner les impacts du pH et de la température sur la précipitation microbienne de carbonate (MCP). Les cellules de bactéries concentrées extraites de la centrifugeuse ont été diluées à 106 cellules/ml dans un milieu liquide de croissance, composé d'un bouillon nutritif (3 g/l), d'urée (20 g/l), de NH_4Cl (10 g/l), de Na_2CO_3 (2,12 g/l) et du CaCl_2 (5,6 g/l). Ils ont observé une hausse notable de la quantité de MCP sur GR et une diminution de l'absorption d'eau comparée au GR témoin [53].

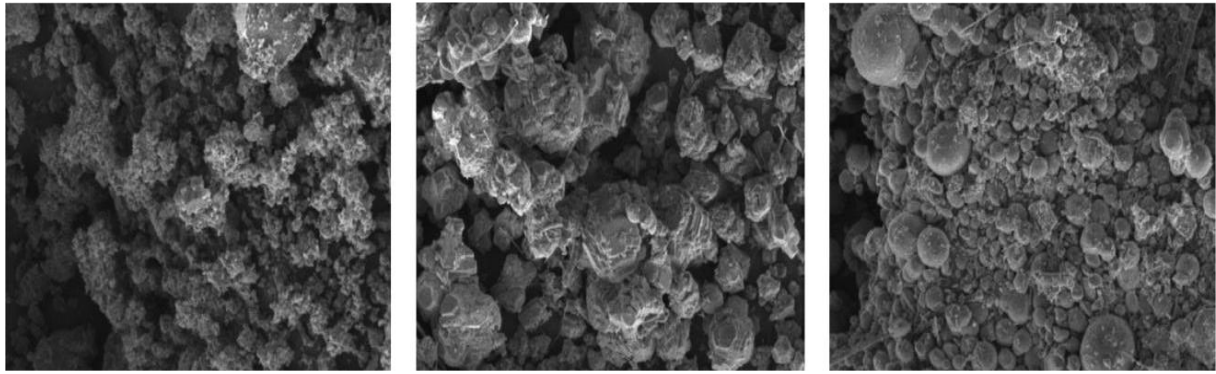


Figure 2. 2: Traitement par précipitation microbienne (MEB)[53].

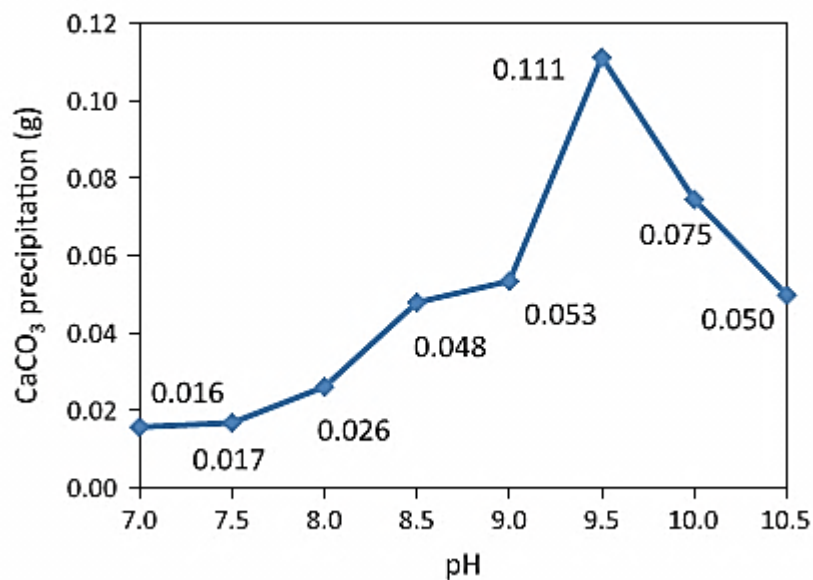


Figure 2. 3: MCP en fonction du pH des milieux de croissance [53].

4. Traitement mécanique

Des recherches ont démontré que la performance du béton fait de granulats recyclés peut être comparable à celle du béton fait de granulats vierges, si l'on utilise du béton de granulats recyclés de qualité supérieure [56].

Le mortier adhérent aux granulats de béton recyclé peut être détaché et trié de manière optimale en employant des procédés mécaniques tels que : l'impact et l'abrasion. C'est une méthode simple, aisée et largement utilisée. Toutefois, la fragmentation du granulat de béton

recyclé en particules plus petites lors du processus de broyage peut être importante, ce qui peut entraîner l'apparition de microfissures qui détériorent le granulat dans cette méthode, on utilise des forces mécaniques pour écraser et retirer le mortier.

Au Japon, deux méthodes ont été suggérées : le rotor à arbre décalé [57] et l'abrasion mécanique. Dans la technique des rotors à axe décalé, des fragments de béton sont acheminés vers le bas entre un cylindre extérieur et un cylindre intérieur en rotation excentrique à grande vitesse, permettant ainsi la distinction de l'agrégat grossier du mortier par fragmentation. Dans l'approche du meulage mécanique, un tambour est segmenté en petites portions à l'aide de cloisons. Le ciment des granulats recyclés est éliminé par abrasion contre des billes d'acier disposées dans chaque section tournante partielle du tambour.

Tableau 2.2 : Comparaison des traitements mécaniques pour l'amélioration de la qualité des granulats de béton recyclé

Tableau 2. 2: Comparaison des traitements mécaniques pour l'amélioration de la qualité des granulats de béton recyclé[58].

Méthode de traitement	Étapes de traitement	Taille du matériau d'entrée (mm)	Capacité de production (t/h)	Densité (g/cm ³)	Eau absorption (%)	Mortier collé (%)	Récupération sous forme de granulat grossier (%)
Concasseur à rotor à arbre excentrique	0	—	—	2,22	5,61	—	—
Concasseur à rotor à arbre excentrique	1 2 3 1	2,55–40	30–60	2,58	2,1	—	39
				2,65	1,6		32
				2,67	1,0		27
Concasseur abrasif à vis	2	40	5–10	2,47	3,19	11,0	53,5
				2,51	2,53	7,8	46,8
				2,53	1,85	6,4	45,1
				2,55	1,55	4,0	43,7

5 Traitement thermique :

5.1. Traitement thermique (haute température) :

Cette méthode consiste à chauffer le granulat de béton recyclé à des températures supérieures à 300 degrés pendant une période approximative de 2 heures. Les contraintes thermiques provoquent une dilatation inégale du mortier et des granulats, ce qui compromet leur adhérence. Parallèlement, le mortier se déshydrate, facilitant ainsi son détachement. L'immersion du granulat de béton recyclé dans l'eau avant une exposition à la chaleur peut optimiser l'efficacité de l'extraction du mortier, grâce à une pression de vapeur plus importante au sein des pores et de la zone d'interface inter faciale [59].

L'idée qui sous-tend ce traitement est comparable à l'impact du feu ou des températures hautes sur la surface du béton. Les granulats de béton recyclé, dont la taille est inférieure à 50 mm, exposés à une température de 300°, le mortier qui s'y attache se déshydrate et devient friable, tandis que le lien entre le mortier et les granulats se brise en raison des contraintes thermiques induites. [60] a chauffé l'agrégat de béton recyclé à 700 en suivant une stratégie en deux parties : (a) pour faciliter l'élimination du mortier déshydraté et (b) pour réutiliser le mortier (qui s'active à 700) comme alternative au ciment ou comme stabilisateur de sol. Les chercheurs ont réussi à extraire 45 % de granulats grossiers, 35 % de granulats fins et 13 % de mortier adhérent à partir des granulats recyclés du béton. [61] ont examiné l'impact de la chaleur sur le taux d'élimination du mortier collé en chauffant l'agrégat à 750, ainsi que son emploi en tant que substitut au ciment. Toutefois, on estime que les caractéristiques de l'agrégat traité pourraient se détériorer à des températures supérieures à 500 en raison de l'expansion thermique générant des tensions internes, conduisant à une microfissuration thermique et à une modification de phase minérale au sein de l'agrégat. [62].

5.2. Traitement thermique (basse température) :

Ce processus repose sur l'impact des cycles de congélation et décongélation appliqués au granulat de béton recyclé saturé d'eau ou de substances chimiques (solution de sulfate de sodium à 26%), qui détériore l'adhésion dans la zone de transition interfaciale entre le mortier et le granulat à cause du gonflement causé par la glace/produit chimique lorsqu'elle gèle, générant des pressions internes. les chercheurs ont noté que le taux d'élimination du mortier connaissait une augmentation significative lorsqu'il est soumis à un traitement thermique entre 300 et 500 et mécaniquement frotté pendant une durée de 30 à 120 minutes. L'effet du temps

de broyage sur la suppression du mortier.. Pour identifier la température optimale pour l'élimination du mortier, l'agrégat a été exposé à quatre températures distinctes : 250, 350, 500 et 750 degrés, avec une durée de présence d'une heure dans le four. Les chercheurs ont constaté que 350 était la température optimale, menant à une hausse de densité de 1,09% et une réduction de l'absorption en eau d'environ 9,5% [63].

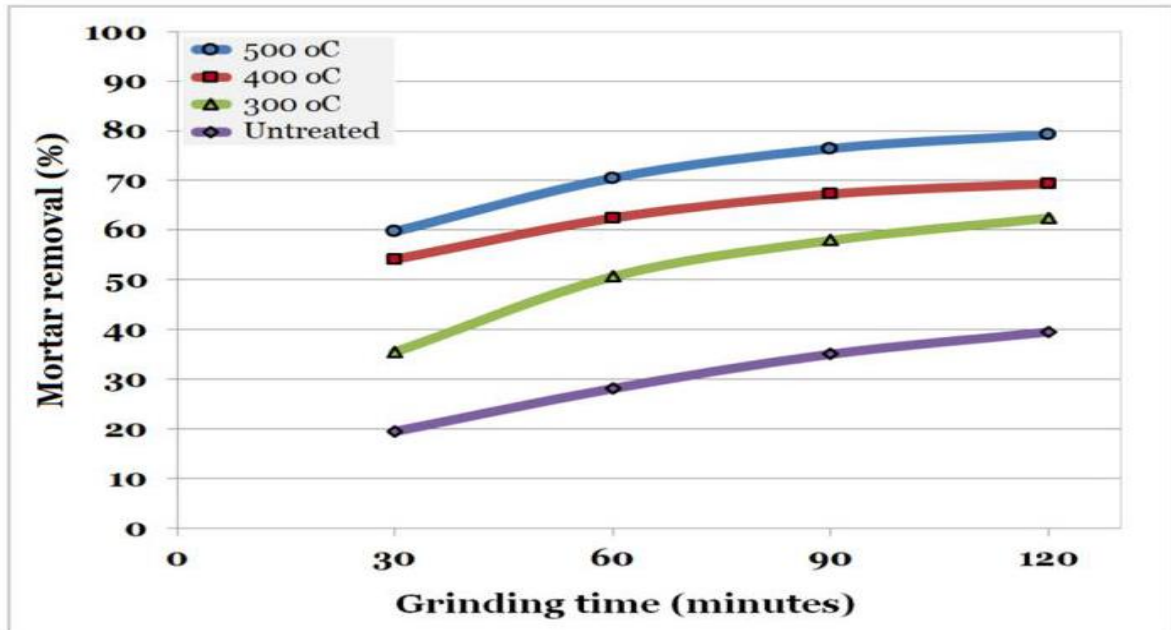


Figure 2. 4: Élimination du mortier collé en fonction de la température de chauffage et du temps de broyage[63].

5. 3. Traitement thermomécanique (micro-ondes) :

L'application des micro-ondes peut efficacement éliminer le mortier adhérent, optimisant la qualité des granulats recyclés du béton en une durée réduite. Le mortier collé et l'agrégat présentent des propriétés électromagnétiques distinctes, ce qui fait que le chauffage par micro-ondes est basé sur cette différence. En effet, ces deux matériaux réagissent différemment aux micro-ondes en raison de leurs densités respectives. Les contraintes thermiques et les fissures initient leur apparition dans la zone de transition inter faciale avant de progresser graduellement vers la surface [63].

L'impact du traitement par micro-ondes sur l'agrégat de GBR est directement lié à l'écart d'absorption énergétique entre le mortier et l'agrégat, conduisant à une élévation des contraintes thermiques dans le mortier par rapport à l'agrégat. L'énergie micro-onde

recommandée ne doit pas dépasser 7,1 kWh/t [64]. De plus, l'efficacité du traitement par micro-ondes est influencée par la taille et le type d'agrégat de GBR [65]. Ce procédé s'avère plus performant pour les gros agrégats de GBR, avec des taux d'élimination du mortier avoisinant les 71%, contre un taux de 19% pour les agrégats fins du GBR.

D'autres recherches concernant le traitement par micro-ondes assisté [64], [66], [67] ont démontré une fragmentation totale du mortier, observant des taux d'élimination de 65,1% pour les gros agrégats de GBR (>20 mm), comparativement à 29,7% pour les agrégats fins de GBR (<2 mm). Les observations expérimentales montrent que le GBR issu d'agrégats de GBR traités aux micro-ondes affiche des améliorations notables concernant la résistance à la compression, la résistance à la flexion et le module d'élasticité.

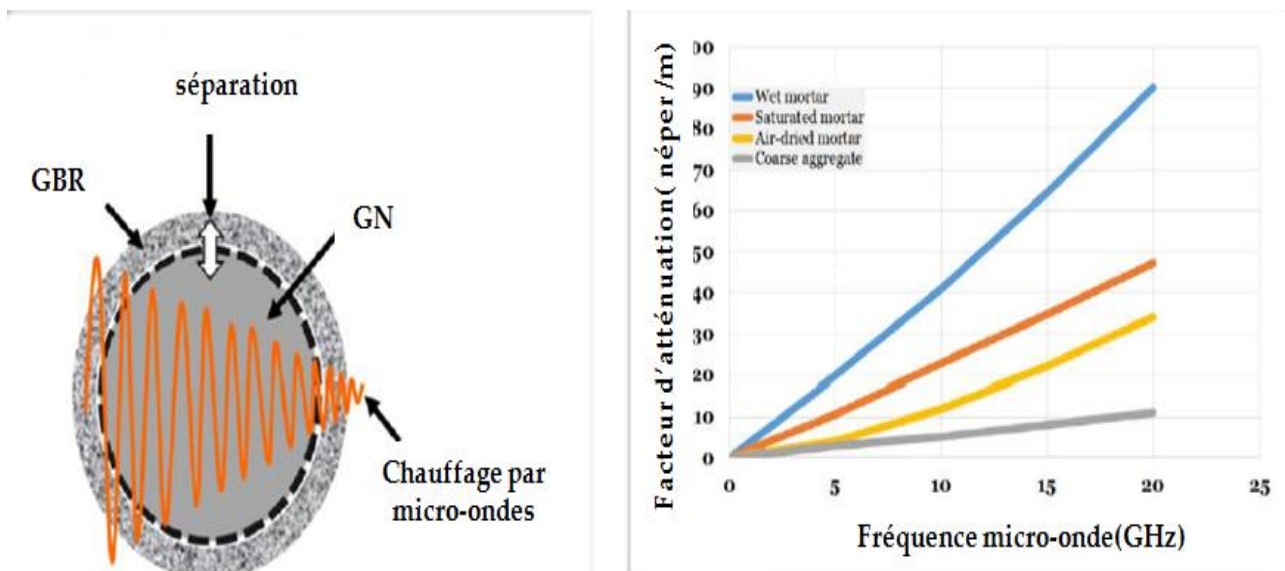


Figure 2. 5: À gauche : Schéma montrant le mécanisme d'affaiblissement d'ITZ et la séparation du mortier de l'agrégat [68]. À droite : Facteurs d'atténuation des micro-ondes des agrégats grossiers et des mortiers humides et secs[69].

6. Traitement chimique :

La raison principale de la médiocrité des (GBR) est l'existence de pâte collée au GN. Cette pâte réduit la zone de transition inter faciale (ITZ) entre l'agrégat et le ciment, ce qui a un impact majeur sur les propriétés mécaniques du béton. Il a été observé qu'une notable

amélioration des propriétés physiques et mécaniques des GBR est rapportée lorsqu'ils sont soumis à des solutions acides de faible concentration, comme l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide phosphorique (H₃PO₄) [70].

Dès que les concentrations acides atteignent des valeurs plus hautes, toute la pâte collée aux GBR est supprimée. Les bétons incorporant des GBR traités montrent de meilleures propriétés mécaniques par rapport à ceux intégrant des GBR non traités.

Contrairement aux acides forts, l'acide acétique ne produit aucun ion nuisible comme le chlorure (Cl) dont la présence ne peut entraîner une dégradation de la structure du béton, notamment la corrosion des barres d'armature en béton. l'acide acétique peut être réactivé par lixiviation au calcium, en introduisant du CO₂ dans la solution [70].

Le traitement des GBR avec diverses concentrations d'acide acétique (1 %, 3 % et 5 %) et des durées de réaction adéquates a provoqué une diminution de l'absorption d'eau du GBR, oscillant entre approximativement 9 % et 19 % [70].

7. Traitement chimico-mécanique :

Plusieurs études de recherche ont exploré les méthodes d'amélioration des caractéristiques des granulats de béton recyclé (GBR) en utilisant des traitements mécaniques, chimiques et hybrides. J. V. Marshall et ses collaborateurs [72] ont examiné l'impact de différents traitements, tels que le lavage mécanique (MS), l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide chlorhydrique (HCl), sur les GBR incorporés dans six formulations de béton. Les données ont démontré des progrès notables en termes de résistance à la compression (de 7,78 % à 25,79 %), de résistance à la traction (de 5,22 % à 18,80 %) et de résistance à la flexion (de 4,91 % à 25,24 %) comparativement aux granulats non traités. Par ailleurs, des progrès ont été notés dans les essais de séchage (de 6,07 % à 28,88 %) et une diminution de l'absorption d'eau (de 4,84 % à 31,06 %), avec un pH variant entre 11,9 et 12,24. L'efficacité du lavage mécanique a été notable, même si les résultats demeurent inférieurs à ceux du béton traditionnel [72].

Plusieurs études ont suggéré des thérapies mixtes qui allient des traitements chimiques à des cycles de chaleur. Dans la recherche [63], divers granulats ont été plongés dans une solution de Na₂SO₄ à 26 % pendant une durée de 24 heures, par la suite, ils ont été exposés à cinq cycles de congélation/dégèlement quotidiennement pendant une semaine, ce qui a conduit à un retrait du mortier pouvant atteindre 29,4 %. L'étude [a utilisé du HCl à 37% et de l'acide acétique à 0,1M en combinaison avec un traitement mécanique par abrasion grâce à

l'appareil Micro-Deval. Cela a conduit à une réduction de l'absorption d'eau de 4,23% comparativement aux granulats non traités, alors qu'avec l'acide acétique, l'absorption a baissé de 2,03%. Pour finir, la recherche a démontré l'efficacité d'un traitement mixte combinant HCl à 0,1M et Na_2SO_4 à 1,65M dans l'élimination du mortier résiduel, avec HCl se révélant plus performant. Les granulats traités à l'HCl ont présenté une résistance à la compression supérieure de 14 % comparativement aux granulats non traités, alors que ceux soumis au Na_2SO_4 ont démontré une baisse de la résistance de 5 % [63].

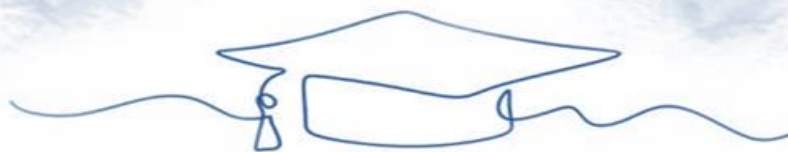
8. traitement par géo polymérisation :

Selon Zhao et al. [73], des GBR ont été pré enduits dans une suspension de silicate de sodium soigneusement agité, puis immergés pendant une durée de cinq à dix minutes. La hausse de la résistance à la compression du BGR final utilisant des GBR traités était de 32,4 % comparée au béton non traité. Toutefois, l'utilisation du silicate de sodium a ses propres contraintes. Puisque le gel de réaction alcali-silice résulte de l'interaction entre un alcali et des phases réactives de silice, l'ajout d'alcali (comme le NaOH) peut accroître le risque de dommages liés à la réactivité alcali-silice (RAS) [74].

9. conclusion

Ce chapitre a permis d'examiner les différentes méthodes de traitement appliquées aux granulats de béton recyclé (GBR), dans l'objectif d'améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques pour un usage optimisé dans le béton.

Les traitements abordés, qu'ils soient physiques (mécaniques, thermiques, micro-ondes), chimiques, ou hybrides (chimico-mécaniques et thermochimiques), ont tous démontré, à des degrés divers, leur capacité à réduire la porosité et à améliorer la qualité des GBR. Par exemple, la carbonatation accélérée et la précipitation microbienne de carbonate ont permis de réduire l'absorption d'eau de manière significative.



Chapitre 3:

Plan d'expérience

et modélisation

1. Introduction :

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles [75]. Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le nombre de mélanges à préparer, qui répondent correctement à nos attentes. L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et son mode de fonctionnement.

2. Définition :

Les plans d'expériences constituent essentiellement une stratégie de planification d'expérience afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique.

3. Principe :

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

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres.
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

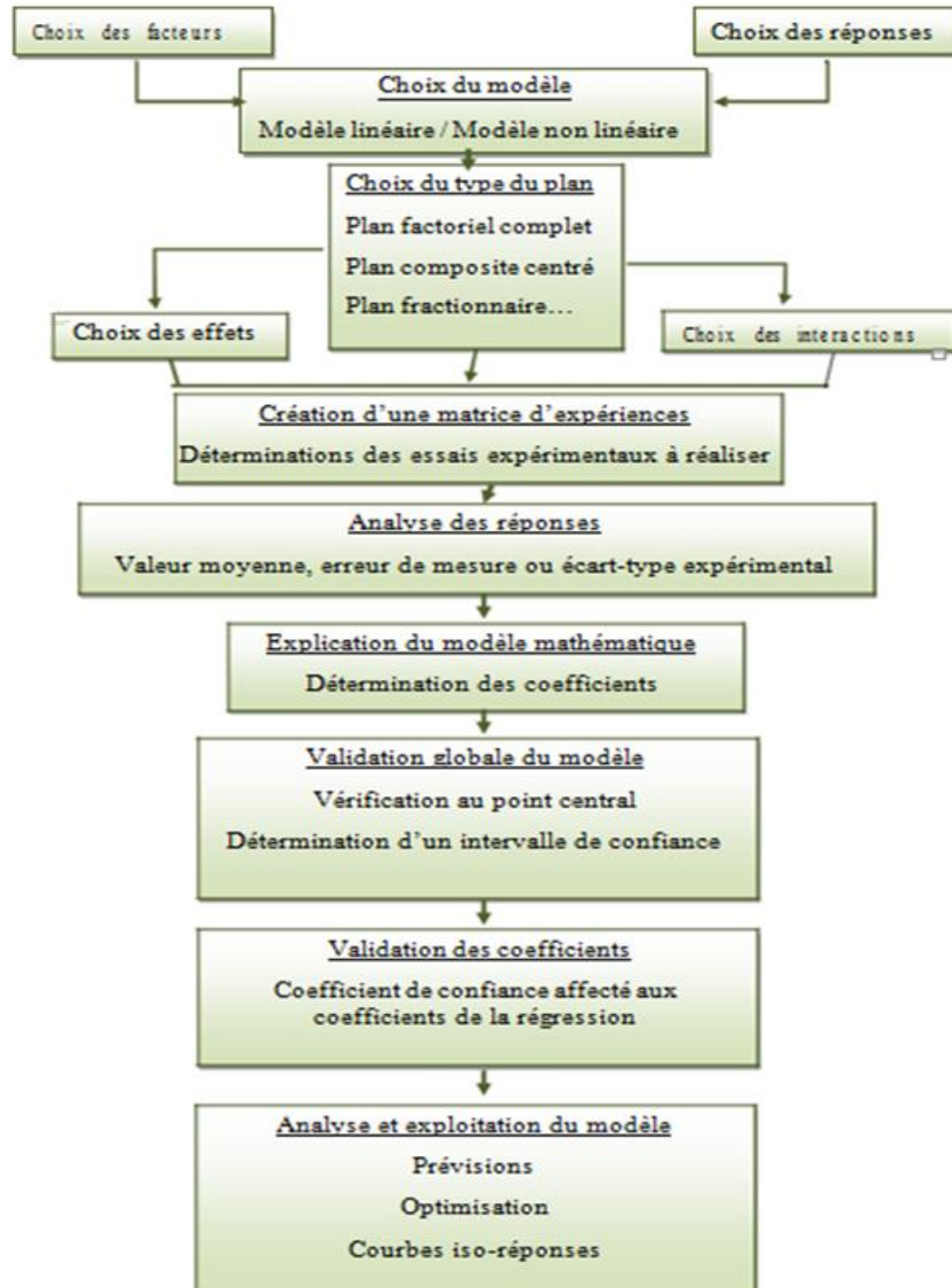
L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées.

4. Analyse des résultats :

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension du phénomène

5. Démarche méthodologique :

Le schéma ci-dessous présente un organigramme général de traitement des plans d'expériences.



6. Terminologie :

6.1. Les différents types de facteurs :

La construction des plans d'expériences et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens [75].

❖ Facteurs continus :

La pression est un exemple de facteurs contenu. Dans un intervalle de pression donnée, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

❖ Facteur discrets :

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

❖ Facteurs ordonnables :

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

❖ Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : Haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

6.2. Notion d'espace expérimental :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de

cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure 3.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelé **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

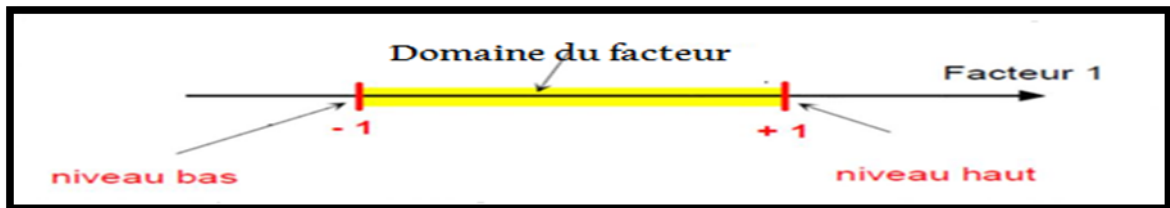


Figure 3. 1: le niveau bas, le niveau haut et le domaine d'un facteur[75].

Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1.

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent le « **domaine d'étude** ». Ce domaine d'étude, est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (figure 3.2).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

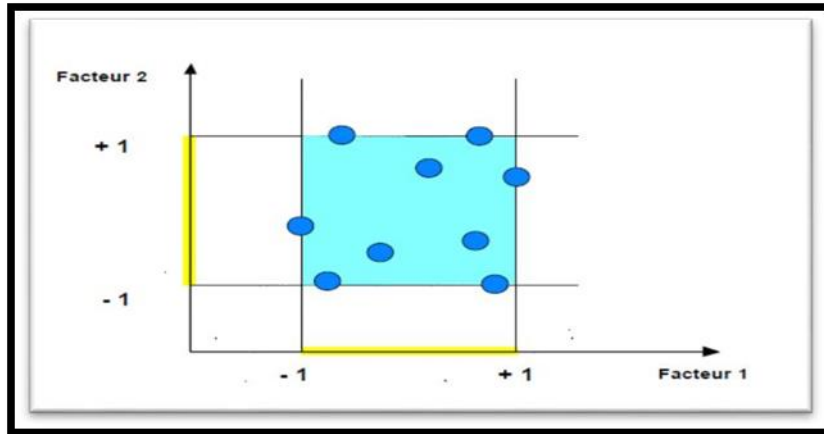


Figure 3. 2: les points expérimentaux dans un domaine d'étude

7. Notion de modélisation mathématique:

On choisit à priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor – Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré ou moins élevé:

$$\text{Où: } y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij} = x_i x_j \dots x_z$$

- 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_i sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé " modèle postulé" ou " modèle a priori"[76].

8. Méthodologie des plans d'expériences :

Pour l'élaboration d'un plan d'expérience, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

8.1. La recherche des facteurs influents :

Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié ; la question est de savoir quels sont les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse

- ❖ Lesquels a une influence significative ?
- ❖ Que vaut cette influence ?
- ❖ Et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe à la seconde étape :

8.2. La modélisation :

Dans cette phase, on recherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre et au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, ou n est le nombre des expériences et k est le nombre des effets

8.3. L'optimisation :

Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde de phénomène étudié.

9. Les types de plan d'expérience :

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : **les plans de mélanges, les plans factoriels, les plans hydrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman**. Pour pouvoir expliquer l'avantage de cette méthode de plans d'expériences nous allons donner comme suit, quelques détails concernant les plans factoriels, les plans de mélanges et les plans hydrides.

9.1. Plan factoriel complet :

Nous allons dans un premier temps présenter les plans factoriels, c'est-à-dire les plans d'expériences à 2 niveaux par facteur. Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets avec deux niveaux et $2K$ facteurs, ceux-ci sont notés. Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisée, comme dans la méthodologie standard. Pour un plan factoriel complet optimal à $2K$ facteurs, il va donc falloir mener expériences. Le principe consiste alors à répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteur noté : .La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés A, B, C et D.

10. Intérêt des plans d'expériences :

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans les nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

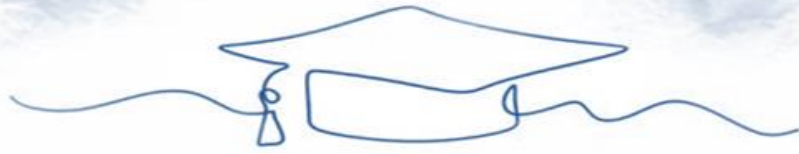
- ❖ Industries des matériaux.
- ❖ Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques.
- ❖ Industries mécaniques et automobiles.
- ❖ Industries métallurgique.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- ❖ Diminution du nombre d'essais.
- ❖ Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs.

- ❖ Détection des interactions entre facteurs.
- ❖ Modélisation des réponses étudiées.
- ❖ Une précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque on fournissant un modèle expérimental précis du système étudié).



Chapitre 4:

Matériaux utilisés et

procédures expérimentables

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes propriétés physiques et mécaniques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les méthodes d'essais appliquées pour les caractériser. L'objectif est de fournir une base solide pour l'interprétation des performances des bétons à base de granulats recyclés traités élaborés par la suite.

D'un point de vue expérimental, cette section examine en détail les caractéristiques des granulats recyclés étudiés, avant et après traitement, notamment en ce qui concerne leur granulométrie, leur porosité, leur absorption d'eau et leur résistance mécanique. Elle présente également les autres matériaux entrant dans la composition des bétons, tels que le ciment, l'eau de gâchage, les adjuvants et les éventuels liants ou agents de traitement. Enfin, les protocoles des essais physiques et mécaniques effectués sur les matériaux de base et sur les bétons incorporant des granulats recyclés y sont décrits, conformément aux normes en vigueur.

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de Biskra. Les matériaux utilisés sont :

- ✚ **Un ciment CEM I 42.5 N – SR3 (ciment portland résistant aux sulfates) :** provenant de la cimenterie Lafarge de Biskra, commercialisé sous la marque "MOUKAOUEM Plus".
- ✚ **Le béton recyclé (BGR) est obtenu à partir d'éprouvettes cylindriques de béton ordinaire concassées** (fractions 3/8, 8/15 et 15/25 mm), provenant de la wilaya de Biskra. Ce béton est dosé à **350 kg/m³** de ciment et présente une résistance à la compression de **30 à 35 MPa** après 28 jours.
- ✚ **Le sable d'oued (0/5):** mm : de la région de Lioua (wilaya de Biskra).
- ✚ **L'eau de gâchage :** Eau de gâchage (l'eau de robinet).
- ✚ **le latex :** pour l'enroulage de la fraction 15/25.

2. Matériaux utilisés et leur caractérisation :

2.1 Le ciment : Le ciment utilisé est un ciment Portland pur de type CEM I 42.5 N – SR3, fabriqué par la cimenterie Lafarge de Biskra et commercialisé sous la marque MOUKAOUEM Plus. La figure ci-après représente le ciment utilisé dans ce travail:



Figure 4. 1: Ciment utilisé CEM I 42.5 N – SR3

➤ **Les caractéristiques chimiques et minéralogiques des ciments utilisés EN 196-2:**

La composition chimique et minéralogique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie Lafarge de Biskra, par la norme EN 196-2, les analyses selon la fiche technique sont résumées dans les tableaux :

Tableau 4. 1: la composition chimique du ciment [77]

Oxydes principaux	Teneur moyenne (%)
CaO (chaux)	62 – 67 %
SiO ₂ (silice)	19 – 23 %
Al ₂ O ₃ (alumine)	3 – 6 %
Fe ₂ O ₃ (oxyde de fer)	2 – 4 %
SO ₃ (anhydride sulfurique)	≤ 3 %
MgO (oxyde de magnésium)	≤ 5 %
Na ₂ O + K ₂ O (alcalins)	≤ 1 %
Perte au feu (LOI)	≤ 3 %

Tableau 4. 2: la composition minéralogique (Formule de Bogue) [77]

Phase minérale	Formule chimique	Nom courant	Symbol	Proportion typique (%)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Alite	C_3S	50 – 60 %
Silicate dicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Bélite	C_2S	15 – 25 %
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminate	C_3A	3 – 10 %
Ferrite tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferrite	C_4AF	8 – 15 %

➤ Propriétés physiques:

Tableau 4. 3: Caractéristiques physiques du ciment [FICHE TECHNIQUE]. [77]

Propriété physique	Valeur	Unite	Observation
Masse volumique absolue	3.10	g/cm^3	Mesurée sur poudre sèche
Masse volumique apparente	1.05	g/cm^3	Dépend du degré de tassage
Surface spécifique Blaine	3600	cm^2/g	Finesse de mouture
Temps de début de prise	≥ 60	minutes	Début du durcissement
Temps de fin de prise	≤ 600	minutes	Fin du durcissement

➤ **Caractéristiques mécaniques du ciment****Tableau 4. 4: Caractéristiques mécaniques du ciment [77]**

Propriété mécanique	Valeur	Unité	Observation
Résistance à la compression à 2 jours	≥ 20	MPa	Résistance initiale (norme EN 196-1)
Résistance à la compression à 28 jours	≥ 42.5	MPa	Résistance finale (norme EN 196-1)

2.2. Eau

En référence à la norme *NF EN 1008*, l'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de béton est l'eau potable du robinet du laboratoire de matériau de construction du département de génie civil et hydraulique à l'université de Biskra.

2.3. Sable

Le sable employé est issu de Lioua, située dans la wilaya de Biskra. Ce sable, d'origine naturelle, est caractérisé par des grains de granulométrie fine (0 à 5 mm) adaptés aux applications en béton. Grâce à ses propriétés physiques et chimiques favorables, il garantit une compacité optimale et une bonne adhérence avec le liant cimentaire. Il est particulièrement approprié pour la fabrication de bétons de qualité, sous réserve d'un contrôle rigoureux de sa propreté.

➤ **La Masse volumique apparente (NF P 18-555):**

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de la matière solide de celui-ci (hors pores).

Les résultats de la masse volumique des deux sables figurent dans le tableau suivant:

Tableau 4. 5: La Masse volumique apparente du sable

Norme	Unité	Valeur	Propriété
NF P 18-555	g/cm ³	1.45 – 1.60	Masse volumique apparente (ρ_e)

Les (figures 4.2) résume les étapes du mode opératoire de l'essai de la masse volumique apparente



Figure 4. 2: la masse volumique apparente du sable.

➤ **La Masse volumique absolue (NF P 18-555):**

La masse volumique absolue : M_{abs}

Les valeurs des masses absolues sont présentées dans le tableau :

Tableau 4. 6: La Masse volumique absolue sable

Norme	Unité	Valeur	Propriété
NF P 18-555	g/cm^3	2.65	Masse volumique absolue (ρ_e)



Figure 4. 3: la masse volumique absolue du sable.

➤ **Équivalent de sable : (EN P18-598) :**

Cet essai est défini par la norme NF P 18-598 [Normes AFNOR], il est utilisé pour évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du mortier, par conséquence la proportion des impuretés argileuses contenants dans le sable par rapport à la quantité des grains solide sableux.

Il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Il consiste de laver un poids défini de sable dans une solution la vente. Après agitation, on laisse le mélange se décanter pendant 20 min, on en déduit l'équivalente se sable qui est par l'équation suivent:

✚ L'équivalent de sable visuel est défini par : $ESV = h_1/h_2 \times 100 \%$

✚ L'équivalent de sable par piston est défini par : $ESP = h_1/h_2' \times 100\%$



Figure 4. 4: Équivalent de sable d'oued.

Tableau 4. 7: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
E.S≥85	E.S>80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

Tableau 4. 8: Résultats d'équivalent du sable naturel

ES final	ESP (%)	ESV (%)	h ₂ ' (cm)	h ₂ (cm)	h ₁ (cm)	Essai
84.9	84.3	85.5	14.0	13.8	11.8	Essai 1
85.4	85.1	85.7	14.1	14.0	12.0	Essai 2
85.15	/	/	/	/	/	Moyenne

L'essai d'équivalent de sable, réalisé conformément à la norme NF P 18-598, a été appliqué sur deux échantillons prélevés. Les résultats montrent un équivalent de sable final moyen de 85.15 %, attestant de la bonne qualité du sable utilisé.

➤ **Absorption d'eau (P18-459) :**

Absorption d'eau Ab (%) d'une substance est le rapport entre le poids de l'eau contenue dans cette substance et le poids de la même matière sèche

$$Ab(\%) = 100 (Ma - Ms / Ms)$$

Ms : Peser la matière sèche.

Ma : poids de matière humide.



Figure 4. 5: l'Absorption d'eau de sable.

Tableau 4. 9: Absorption d'eau de sable d'oued.

Absorption d'eau (%)	Poids humide (g)	Poids sèche (g)	Essai
2.46 %	122.95	120.00	Essai1
2.54 %	123.05	120.00	Essai2
2.50 %	/	/	moyenne

L'essai d'absorption d'eau a été réalisé conformément à la norme NF P 18-555, sur deux échantillons de sable prélevés au niveau de Lioua. Les résultats obtenus indiquent un taux moyen d'absorption de 2,50 %, traduisant une porosité relativement faible à modérée, ce qui reflète un bon comportement du matériau vis-à-vis de l'eau. Cette valeur est en cohérence avec le taux élevé d'équivalent de sable ($ES = 85$), confirmant la faible teneur en éléments fins et la bonne qualité du sable étudié.

➤ **Les caractéristiques géométriques :**

✚ **L'analyse granulométrique NF EN 933-1 :**

La masse de sable est calculée par la formule suivante :

MS : (Masse de sable) $\geq 0.2D_{max}$. $D_{max} = 5 \text{ mm}$ on a pris MS = 2 kg).



Figure 4. 6: l'analyse granulométrique du sable 0.5.

Le tableau suivant présente l'analyse granulométrique de 2 kg d'échantillon de sable:
(Tableau 4.10)

Tableau 4. 10: Analyse granulométrique du sable naturel (0/5).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5	0.8	0.8	0.04	99.96
3.15	160.97	160.97	8.04	91.96
2.5	91.96	252.93	12.646	87.35
1.25	159.49	412.42	20.62	79.38
0.63	236.3	648.72	32.43	67.57
0.315	882.04	1530.76	76.53	23.47
0.16	359.01	1889.77	94.48	5.52
0.08	86.59	1976.36	98.81	1.19
Fond	19.89	1996.25	99.81	0.19

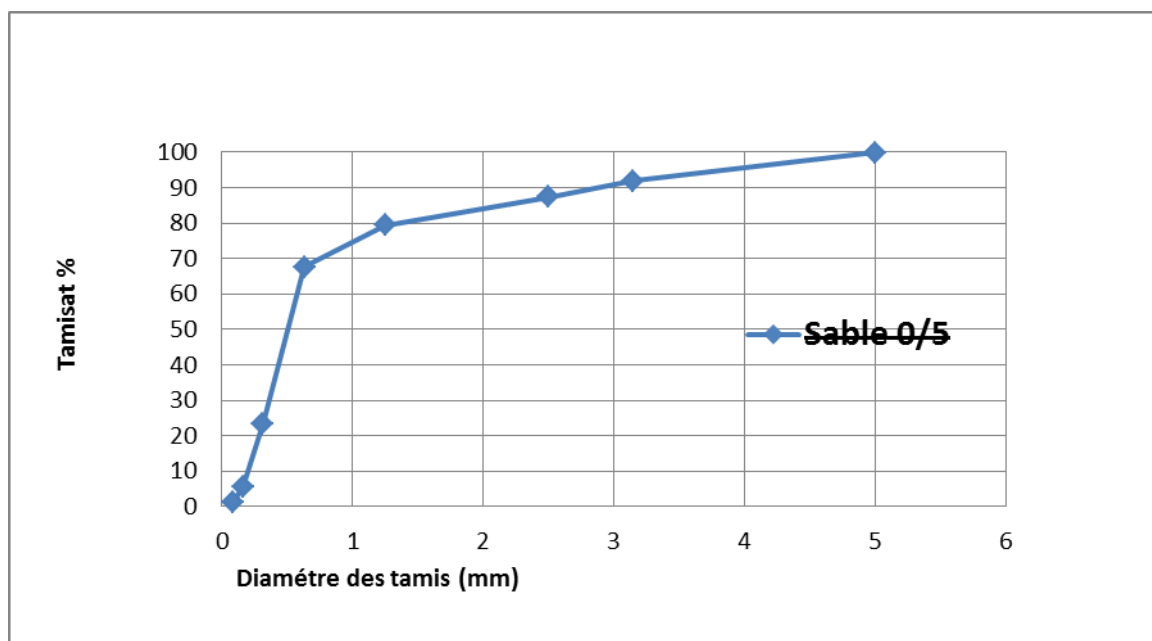


Figure 4. 7: courbe d'analyse granulométrique de sable.

2.4. Les granulats recyclés :

On a utilisé trois fractions de granulat grossier

➤ La masse volumique apparente (NF P 18-555) :

Dans cette étude, la masse volumique apparente a été déterminée pour trois fractions de granulats grossiers, à savoir 15/25 mm, 8/15 mm, et 3/8 mm, conformément à la norme NF P 18-555. Cette caractéristique permet d'évaluer la densité des granulats en tenant compte du vide inter granulaire. Les résultats obtenus pour chaque fraction sont présentés dans le (tableau 4.11) suivant :



Figure 4. 8: la masse volumique apparente granulats étudiée

Tableau 4. 11: la masse volumique apparent 3 fraction.

Fractions	15/25	8/15	3/8
Masse volumique apparents (g/cm ³)	1.15	1.19	1.10

➤ La masse volumique absolue (NF P 18-555) :

La masse volumique absolue a été déterminée pour les trois fractions de granulats grossiers (15/25 mm, 8/15 mm et 3/8 mm), conformément à la norme NF P 18-555. Cette masse volumique correspond à la densité réelle du matériau solide, en excluant les vides entre

les grains et les pores accessibles à l'eau. Elle constitue un paramètre fondamental pour le calcul des formulations et pour l'évaluation de la compacité des granulats. Les résultats obtenus sont présentés dans le (tableau 4.12) suivant

Tableau 4. 12: la masse volumique absolue 3 fractions

Fractions	15/25	8/15	3/8
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.40	2.50	2.30



Figure 4. 9: la masse volumique absolue des 3 fractions.

➤ **Absorption (NF P 18-555) :**

L'essai d'absorption d'eau a été réalisé sur les trois fractions de granulats grossiers (15/25 mm, 8/15 mm et 3/8 mm), suivant les prescriptions de la norme NF P 18-555. Cette mesure permet d'évaluer la quantité d'eau que les granulats peuvent retenir dans leurs pores après immersion. Elle joue un rôle déterminant dans l'ajustement de la teneur en eau des formules de béton, afin de garantir la régularité des performances mécaniques et de la mise en œuvre. Les résultats obtenus sont consignés dans le (tableau 4.13) ci-après :

Tableau 4. 13: absorption d'eau des granulats recycles.

Fractions	15/25	8/15	3/8
Absorption d'eau %	3.55	4.20	6.13

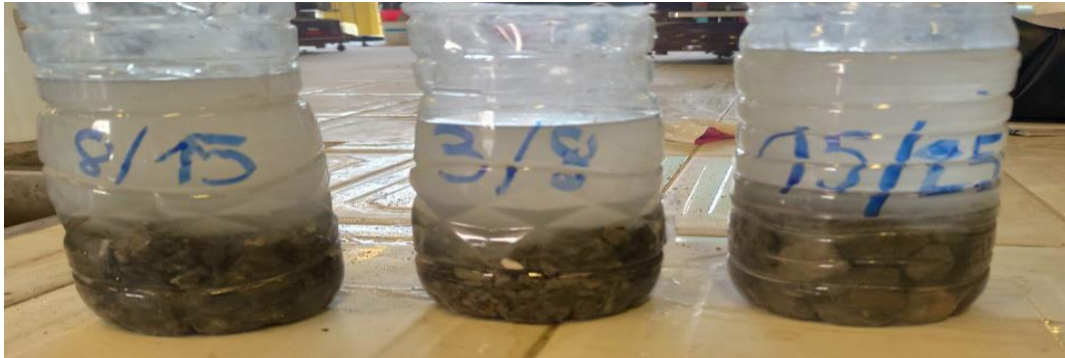


Figure 4. 10: absorption d'eau dans les 3 fractions.

➤ **Micro-deval NF P 18-577**

L'essai Micro-Deval a été réalisé uniquement sur la fraction 15/25 mm, conformément à la norme NF P 18-577. Ce choix s'explique par le fait que cette fraction constitue la base du matériau qui fera l'objet d'un traitement ultérieur dans le cadre de cette étude. L'objectif est d'évaluer sa résistance à l'usure avant et éventuellement après traitement. Le résultat obtenu est présenté dans le (tableau 4.14) ci-dessous.



Figure 4. 11: essai micro-deval de la fraction 15/25.

Tableau 4. 14: Résultat de l'essai Micro-Deval pour la fraction 15/25 mm.

Fraction de granulat	Micro-deval
15/25	18.6 %

➤ **Les caractéristiques géométriques :**

✚ **L'analyse granulométrique NF EN 933-1 :**

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme **NF EN 933-1**, en utilisant un tamisage à sec avec une colonne de tamis normalisés. Cette analyse permet de déterminer la répartition des dimensions des grains et d'évaluer leur régularité et continuité, notamment pour une utilisation en béton. Le (tableau 4.15) suivant présente les résultats de l'analyse granulométrique :

-Les tableaux suivants présentent les résultats de l'analyse granulométrique des trois fractions : **3/8 mm**, **8/15 mm** et **15/25 mm**. : (Tableau 4.15) (Tableau 4.16) (Tableau 4.17).

Tableau 4. 15: L'analyse granulométrique de graviers recyclés (15/25) M=3000 g

	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
25	52.41	52.41	1.71	98.29
16	1840.27	1892.68	61.75	38.25
12.5	1077.43	2970.11	96.9	3.1
8	79.28	3049.39	99.49	0.51
Fond	15.76	3065.15	100.0	0.0

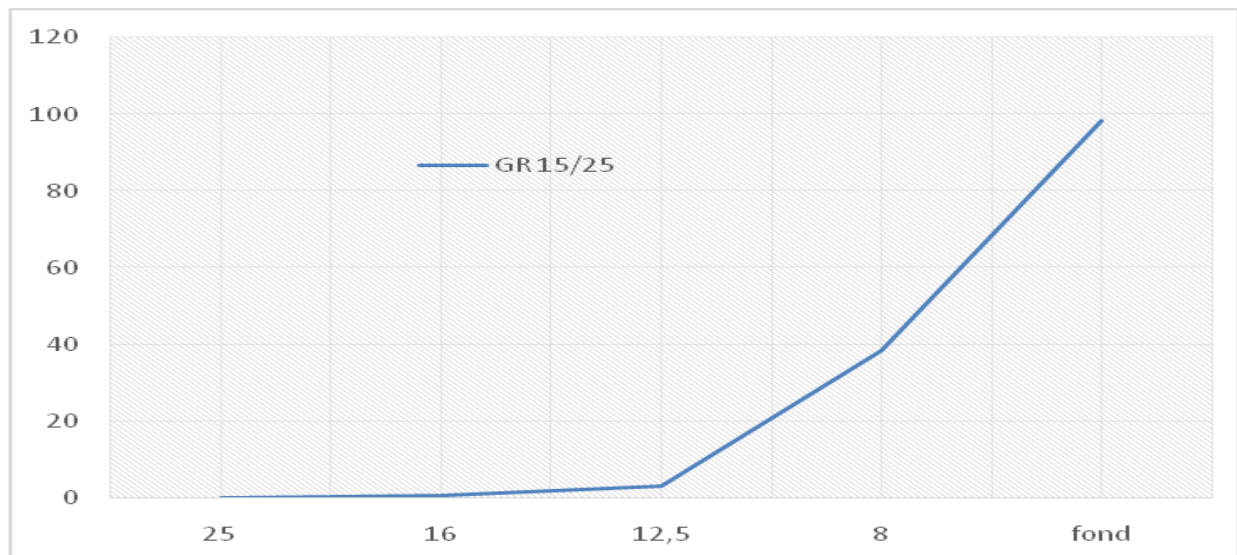


Figure 4. 12: La courbe d'analyse granulométrique de fraction 15/25.



Figure 4. 13: d'analyse granulométrique de fraction 15/25.

Tableau 4. 16: L'analyse granulométrique de graviers recyclés (8/15) M=3000 g.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	13.64	13.64	0.454	99.54
12.5	686.42	700.06	23.33	76.67
10	1384.5	2084.56	69.48	30.52
8	599.07	2683.63	89.45	10.55
6.3	259.68	2943.31	98.11	1.89
5	31.89	2975.2	99.17	0.83
Fond	32.43	3007.63	100.25	0.0

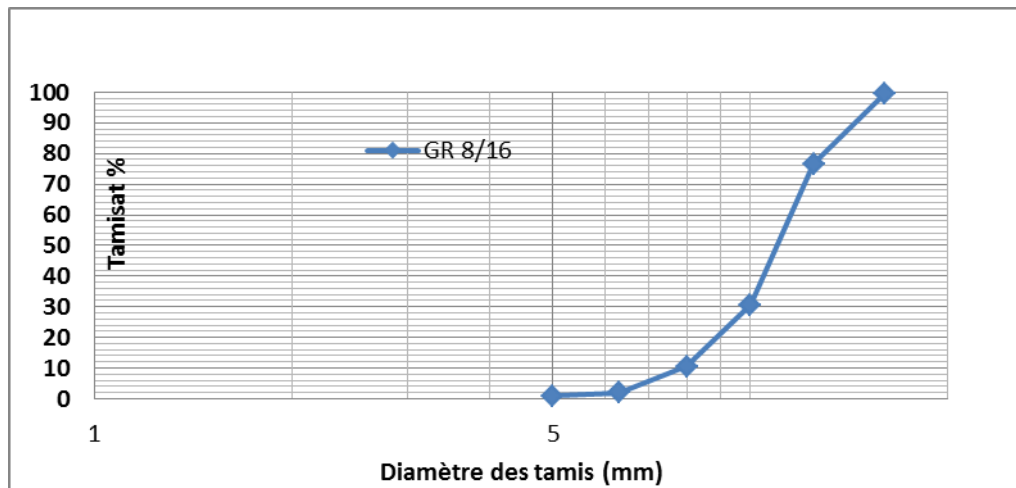


Figure 4. 14: La courbe d'analyse granulométrique de fraction 8/15.

Tableau 4. 17: L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) M=2000 g.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	0.7	0.7	0.035	99.97
6.3	540.56	541.26	27.063	72.93
5	554.36	1095.62	54.78	45.22
3.15	740.17	1835.79	91.78	8.87
2.5	66.96	1902.75	95.13	4.87
1.25	69.49	1972.24	98.61	1.39
Fond	7.5	1979.74	98.98	1.02

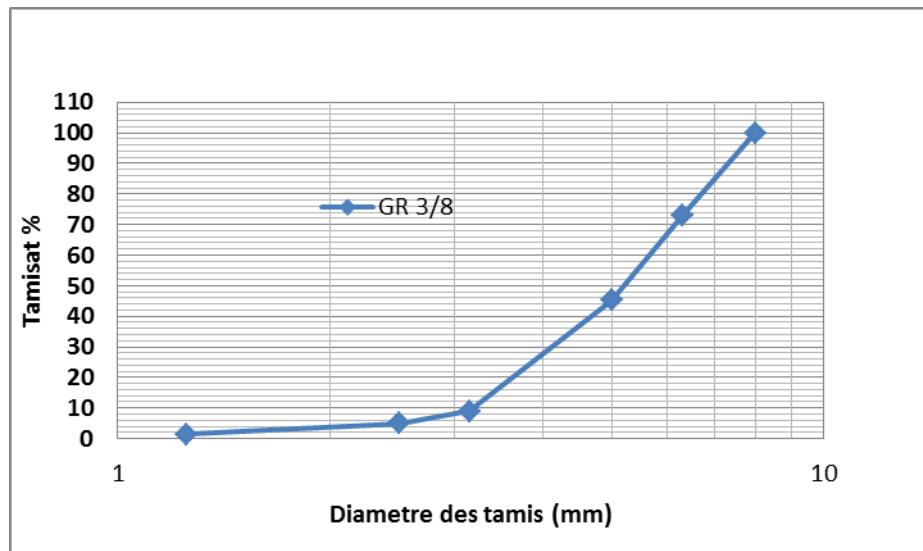


Figure 4. 15: La courbe d'analyse granulométrique de fraction 3/8.

2.5. sika latex pro :

Le Sika Latex® Pro est une dispersion aqueuse de résine synthétique sous forme liquide, utilisée comme adjuvant pour améliorer l'adhérence, la maniabilité, l'imperméabilité et la résistance mécanique des mortiers et bétons. Il est particulièrement recommandé pour les travaux de réparation, de collage, ou pour les couches de liaison entre anciens et nouveaux bétons.

Ce produit permet d'augmenter la cohésion du mélange, de réduire la fissuration due au retrait, et d'améliorer la résistance aux agressions chimiques ou mécaniques. Dans le cadre de cette étude, le Sika Latex Pro a été incorporé dans les formulations expérimentales en respectant les dosages prescrits par le fabricant.



Figure 4. 16: sika latex pro.

3. Préparation du coulis de traitement des GBR

Il s'agit d'un coulis de ciment (ciment + eau) avec un E/C variable, l'addition du latex au coulis à pour objectif d'améliorer les propriétés des GBRT.



Figure 4. 17: traitement des GBR

4. formulation du béton :

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 CEM I 42.5 N – SR3 , béton plastique de serrage d'une vibration courante et très plastique avec affaissement $=7$ cm), 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 (Dmax , 100%)**Donc, **B (25, 100%)**

Le point **A (XA, YA) :**

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

$$YA = 50 - \sqrt{D + K + KS + KP} = 41,00$$

Avec :

- Coefficient **K = 2**
- Facteur **Kp = -6**
- Coefficient **Ks = 0,00**

Donc A (12.5 ; 41).

4.2. Formulation de bétons de référence :

Le (BGR) ont été formulés selon la méthode Dreux-Gorisse [5]. Ainsi, le volume de béton nécessaire pour 1 m³ de béton à granularité continue est répertorié dans le (Tableau 4.18).

Tableau 4. 18: Composition du béton dosé à 350 Kg / m³ de ciment [5].

Constituants	Proportion (%)	Volume (l)	Densité	Poids (Kg/m ³)
Sable de dune	32	218,27	2,60	522.22
G3/8	8	54,57	2.30	141.34
G8/16	24	163,71	2,50	419.07
G16/25	36	245,56	2,40	636.07
Ciment	350 Kg/m ³	112,9	3,10	350
Eau	197 L/m ³	197	1	197 L
Adjuvant	-	-	-	Sans adjuvant

4.4. Fabrication des bétons:

4.4.1. Identification des mélanges des bétons :

Dans ce chapitre, un mélange de béton de référence (GBR) a été utilisé, sans ajout d'adjuvant. L'objectif est d'étudier les caractéristiques du béton élaboré, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

- **Mélange 01** : Béton à base de 100 % de GBR.
- Huit (8) sont préparés à base de granulats recyclés traités par (revêtement par latex) BGRT.

4.4.2 Préparation du mélange et procédure de malaxage des bétons :

➤ Méthode de pré-saturation des GBR :

Il a été démontré que la technique de pré-saturation permet d'évaluer efficacement l'absorption des différentes fractions de GBR, environ cinq minutes après leur immersion. Cette méthode conduit à des vitesses d'absorption et à des valeurs finales similaires. Par ailleurs, une absorption d'eau importante a été observée dès les premières minutes suivant l'immersion, pour les trois fractions de GBR. Il convient également de souligner que ces fractions ont été immergées jusqu'à stabilisation complète de l'absorption, comme illustré dans les figures correspondantes. Enfin, les granulats ont été soigneusement nettoyés à l'aide d'un tissu avant l'essai.



Figure 4. 18: Méthode de pré-saturation des GBR pendant 24 heures.

5. Procédure expérimentales :

5.1. Malaxeur [EN 196-1] :

La Figure 4.19 illustre le malaxeur utilisé pour la préparation des mélanges de béton. Il s'agit d'un malaxeur planétaire à axe rotatif vertical, d'une capacité de 50 litres. Le processus de malaxage des constituants s'effectue selon les étapes suivantes .

On introduit dans la cuve du malaxeur les constituants dans l'ordre suivant : ciment, sable, puis GBR préalablement saturé. Un malaxage à sec est réalisé pendant environ 1 minute pour assurer une bonne homogénéité des éléments secs. Ensuite, l'eau de gâchage est ajoutée progressivement, et le malaxage est poursuivi pendant 2 minutes supplémentaires jusqu'à l'obtention d'un béton homogène.

Ce procédé permet de garantir une consistance uniforme et une bonne qualité du mélange pour les essais.



Figure 4. 19: Malaxeur planétaire à axe vertical.

5 .2 Confection des éprouvettes du béton :

Pour effectuer les tests de compression, des échantillons cubiques en béton de $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ ont été fabriqués à partir du béton frais. Les moules employés étaient en métal, préalablement nettoyés et huilés pour faciliter le démoulage (voir Figure 4.20).

Il n'y a qu'une seule cavité dans chaque moule. L'introduction du béton s'est faite en deux strates. La première couche a été mise dans le moule et répartie de manière uniforme à l'aide d'une grande spatule. Puis, la seconde couche a été posée et soigneusement nivelée.

Une fois le moule rempli, une vibration a été effectuée à l'aide d'une table vibrante pendant un temps prédéfini, visant à éliminer les bulles d'air et garantir une compaction adéquate et uniformité du béton dans le moule. Ce processus est crucial pour augmenter la compacité et prévenir l'apparition d'espaces vides susceptibles de nuire aux caractéristiques mécaniques des spécimens.

Après la fin de la vibration, le surplus de béton a été éliminé et la surface a été égalisée afin d'obtenir un plan uniforme. Les moules pleins ont par la suite été protégés par une pellicule plastique afin de prévenir l'évaporation rapide de l'eau.

Après un démoulage effectué au bout de 24 heures, les éprouvettes ont été maintenues dans des conditions appropriées pour le durcissement (durcissement humide) jusqu'à la conduite des tests.



Figure 4. 20: Les moules cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm^3 .

5.3. Essais à l'état durci :

5.3.1. Essais de Résistance à la compression EN 12390-3

Les résistances à la compression ont été déterminées à 28 jours, conformément à la norme européenne **EN 206-1**. La valeur retenue correspond à la moyenne arithmétique des résultats les plus proches obtenus (voir figure 4.21). L'essai de compression est réalisé en appliquant une charge croissante à une vitesse constante de **0,5 kN/s** jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Après

rupture, la charge maximale enregistrée (**F**) ainsi que la résistance à la compression (**RC**) sont relevées. Cette dernière est ensuite calculée à l'aide de la formule suivante : $RC = \frac{F}{S}$



Figure 4. 21: Dispositif pour l'essai des résistances à la compression EN [12390-4].

5.3.2. La masse volumique l'état durci [EN12363]

Après une période de cure de 28 jours, les éprouvettes ont été retirées du bassin de conservation, puis essuyées à l'aide d'un chiffon humide pour éliminer l'excès d'eau en surface. Chaque échantillon a ensuite été pesé avec une balance électronique de précision. Pour le calcul de la masse volumique apparente, on a utilisé le volume théorique du moule (1000 cm³) selon la relation suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V}$$

- ✓ ρ_{app} : masse volumique apparente (g/cm³)
- ✓ m : masse de l'échantillon (g)
- ✓ V : volume théorique de l'éprouvette (cm³)

5.3.3. Absorption d'eau par immersion (NF P 18-459)

L'essai a été réalisé conformément à la norme **NF P 18-459**. Après 28 jours de cure, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à (105 ± 5) °C jusqu'à masse constante, puis refroidies dans un dessiccateur. Elles ont ensuite été immergées dans l'eau pendant 24 heures. Après immersion, chaque éprouvette a été essuyée en surface et pesée.



Figure 4. 22: Absorption par immersion.

6. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés et le détail des différentes formulations élaborées, ainsi que les différentes méthodes d'essais dans le cadre de cette étude.



Chapitre 5:

Discussion des résultats

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 avant le malaxage du béton.

2. élaborations du coulis d'encapsulation :

La méthode choisie pour le traitement des GBR consiste en l'élaboration d'un coulis de ciment modifié par l'ajout du latex, et d'enrober les GBR par immersion dans ce coulis, Seulement La faction 16/25 sera traitée, Il est important de noter que les grandes fractions jouent un rôle essentiel dans le squelette granulaire. .

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

Trois facteurs sont choisis : le rapport E/C, la teneur en latex et la température de durcissement 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 2^3 qui le plus adapté dans le cas des facteurs indépendants.

➤ Remarque :

Les GR utilisés sont secs, la durée de trempage dans le coulis est 10 min et la durée de durcissement est prise égale à 3 jours ces conditions sont optimales [69].

3. Programmes expérimentaux

Le programme expérimental pour la conception de l'encapsulation a été divisé en quatre étapes:

3.1. Traitement des GR selon le plan factoriel complet

La matrice d'expérimentation est représentée sur le tableau suivant :

Tableau 5. 1: matrice d'expérimentation.

N°essais	Facteur 1 Le rapport E/C	Facteur 2 Teneur en latex	Facteur 3 La température
1	0.5	15 %	20°
2	1	15%	20°
3	0.5	35%	20°
4	1	35%	20°
5	0.5	15%	60°
6	1	15%	60°
7	0.5	35%	60°
8	1	35 %	60°
Niveaux des facteurs	0.5 - 1	15 % 35 %	20° - 60 °

✚ Huit types de GBRT sont obtenus notés par GRT1, GRT2, GRT3 GRT8.



Figure 5. 1: Schéma représentatif du processus d'élaboration et d'encapsulation des GBR.

3.2. Caractérisation des GRT :

3.2.1. Masse volumique absolue :

La Masse volumique absolue est mesurée après le traitement des GR, les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.2.

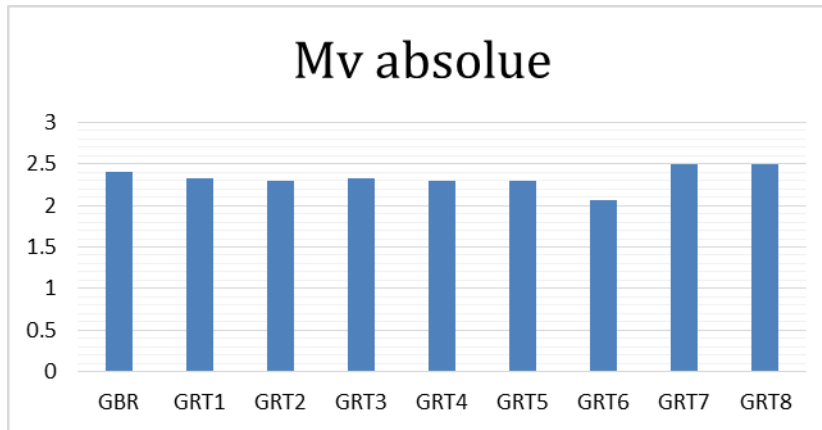


Figure 5. 2: la masse volumique absolue de GBR et GRT.

L'analyse des résultats de la masse volumique absolue (Mv) montre que le granulat de référence (GBR) présente une valeur de 2,4, tandis que les granulats traités au latex (GRT) affichent des valeurs variables en fonction de la température de traitement.

Les échantillons traités à 60°C, tels que GRT7 (2,5) et GRT8 (2,5), montrent les valeurs les plus élevées, ce qui suggère que l'élévation de la température améliore la compacité en favorisant la réticulation du latex, augmentant ainsi la densité. En revanche, certains échantillons traités à 20°C, comme GRT6 (2,06), présentent la densité la plus faible, ce qui pourrait indiquer un traitement moins efficace à basse température.

Les autres échantillons ayant des températures intermédiaires ou des ratios différents, comme GRT1 (2,32), GRT3 (2,32) et GRT2/GRT4/GRT5 (2,3), montrent des valeurs proches de la référence, ce qui reflète une influence moins marquée de la température sur la densité dans ces cas.

Ces résultats mettent en évidence que la température de traitement (60°C) joue un rôle crucial dans l'amélioration de la densité absolue des granulats traités au latex, probablement en favorisant une meilleure cohésion et une réduction de la porosité interne.

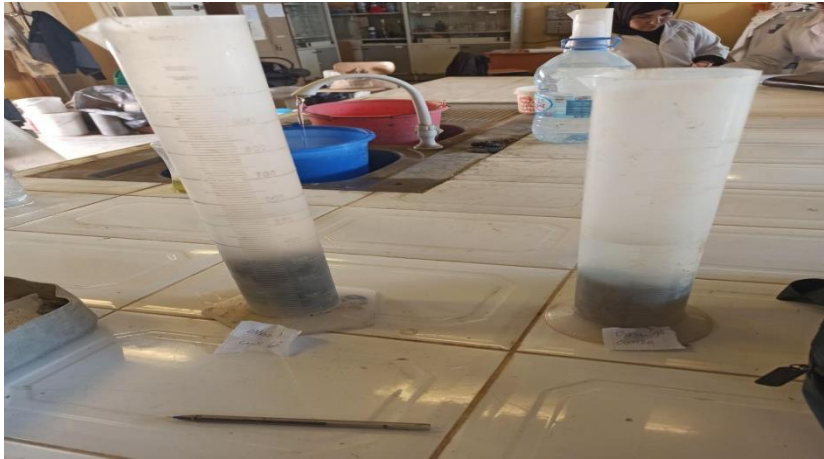


Figure 5. 3: la masse volumique absolue de GBR et GRT

3.2.3. Masse volumique apparente :

La Masse volumique apparente est mesurée après le traitement des GR, les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.4

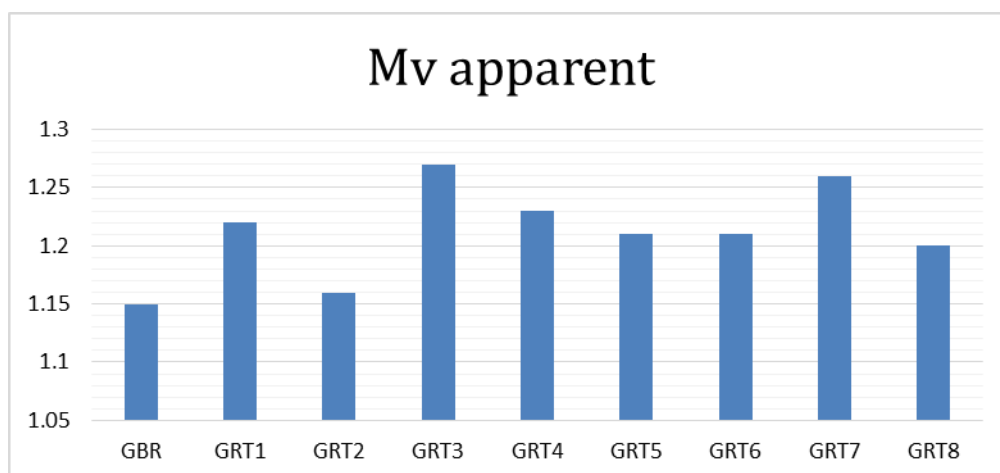


Figure 5. 4: la masse volumique apparente de GBR et GRT.



Figure 5. 5: la masse volumique apparente de GBR et GRT.

L'analyse des résultats de la masse volumique apparente (M_v) montre que le granulat de référence (GBR) présente une valeur de 1,15, tandis que les granulats traités au latex (GRT) affichent des valeurs légèrement plus élevées, indiquant une augmentation de la densité apparente après traitement. Les échantillons GRT1 (1,22), GRT3 (1,27) et GRT7 (1,26) montrent les valeurs les plus élevées, suggérant que l'ajout de latex contribue à une meilleure compacité du granulat pour des rapports E/C de 0.50 ; D'autres échantillons, comme GRT2 (1,16) et GRT3 (1,19), présentent des valeurs proches de la référence, ce qui reflète une faible variation après traitement. Ces résultats indiquent que l'incorporation de latex peut influencer positivement la masse volumique apparente, probablement en comblant les pores internes du granulat et en améliorant ainsi sa compacité.

3.2.4. Absorption des granulats GBR et GRT:

L'absorption est mesurée après le traitement des GR par immersion des échantillons dans l'eau pendant 24 heures, les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.6

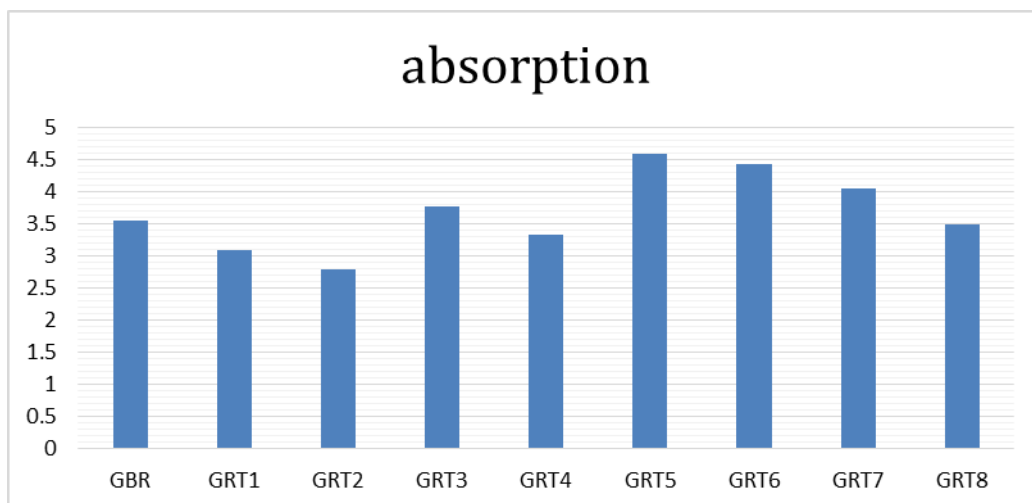


Figure 5. 6: Diagramme de l'absorption de GBR et GRT.



Figure 5. 7: absorption d'eau de GBR et GRT.

L'analyse des résultats d'absorption montre que le granulat de référence (GBR) enregistre une valeur de 3,55, tandis que les granulats traités au latex (GRT) présentent une variabilité dans l'absorption. Les échantillons GRT1 (3,09), GRT2 (2,8), GRT4 (3,34) et GRT7 (3,5) affichent des valeurs inférieures à l'échantillon de référence, indiquant une légère amélioration de la résistance à l'absorption due au traitement au latex. En revanche, certains granulats traités, tels que GRT5 (4,5), GRT6 (4,43) et GRT8 (4,05), montrent des valeurs plus élevées que l'échantillon de référence, ce qui reflète une augmentation de l'absorption dans certains cas. Ces différences sont attribuées à l'effet de la température de traitement, car l'interaction entre ces facteurs peut influencer la capacité d'absorption du granulat. En général, les résultats montrent que l'impact du traitement au latex sur l'absorption n'est pas uniforme, mais varie selon les conditions expérimentales.

L'absorption marque une augmentation pour les mélanges ayant des rapports E/C de 0,5, du fait que la couche de revêtement dans ce cas est plus épaisse que celle pour les mélanges de rapport E/C =1, de même l'augmentation de la température contribue à la création d'une porosité à cause du départ de l'eau.

3.2.5. résistance à l'abrasion (micro deval) :

Les résultats de la résistance à l'abrasion obtenus sont illustrés sur la figure 5.8.

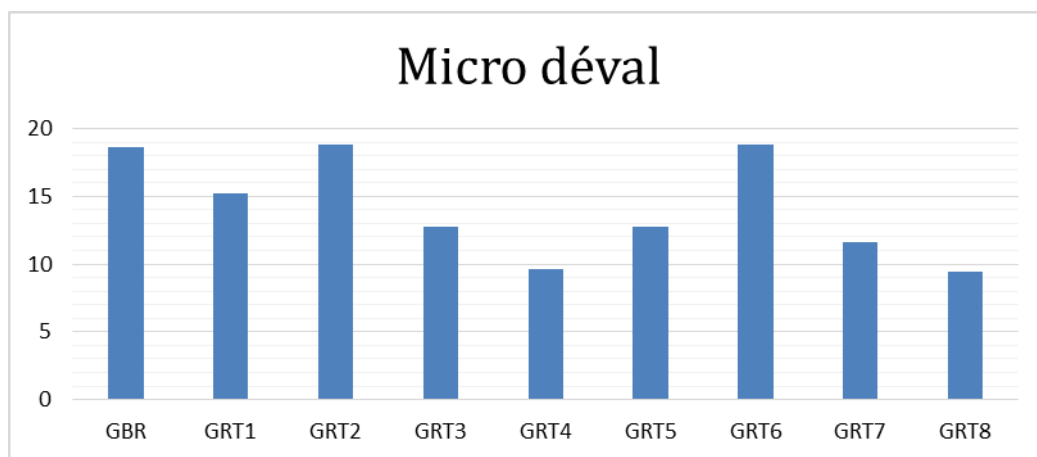


Figure 5. 8: Diagramme de résistance a l'abrasion (micro-deval) du GBR et GRT.



Figure 5. 9: résistance a l'abrasion (micro-deval) du GBR et GRT

Les granulats traités au latex montrent une gamme de performances variées dans les tests de micro déval. Les granulats GRT2 et GRT6, avec des valeurs de 18,8, ont montré des performances comparables à celles du granulat de référence, tandis que GRT8 (avec la valeur la plus basse de 9,44) indique une résistance améliorée à l'usure. Les granulats encapsulés par un coulis de rapport E/C = 0.5 montrent une résistance remarquable à l'abrasion du fait que la couche qui couvre le granulat est épaisse le rendant plus résistant , l'addition de 35 % du latex contribue efficacement à l'amélioration de cette résistance .

4. Elaboration des bétons BGRT

Les formulations des bétons (BGRT) et (BGR), ont été élaborées selon la méthode [Dreux gorisse] ; dont la composition est illustrée au (tableau 4.17)

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.

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 5.1) en adoptant la même composition.

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 après les tests d'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 5. 10: Elaboration des bétons BGRT et BGR.

5. caractérisation des bétons :

5.1. La masse volumique des bétons BGR et BGRT

La masse volumique des bétons BGR et BGRT est déterminée à l'état durci après 28 jours de durcissement dans un milieu humide, les résultats obtenus sont représentés sur la figure 5.11.

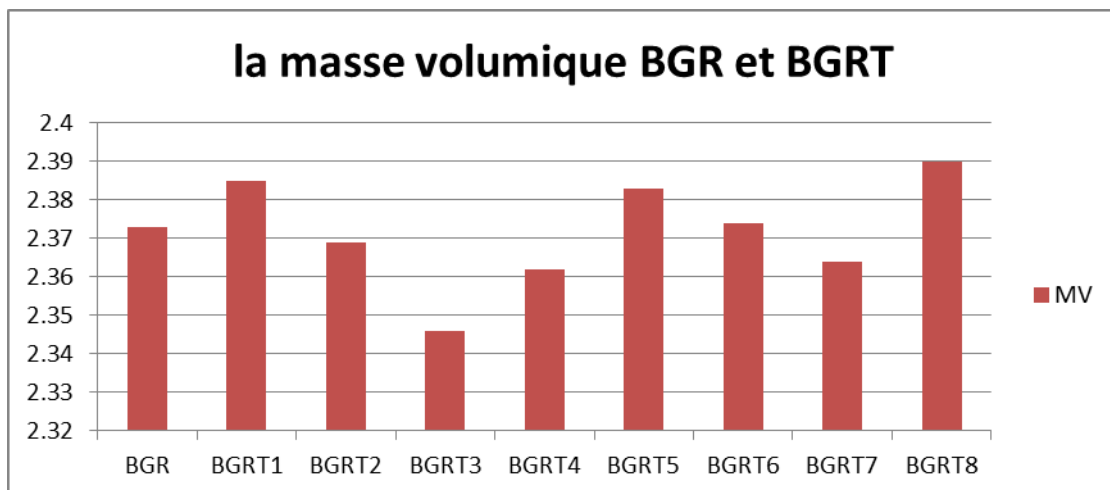


Figure 5. 11: Diagramme de la masse volumiques des bétons BGRT et GBR.



Figure 5. 12 : la masse volumiques des bétons BGRT et GBR.

L'analyse des résultats de la masse volumique (MV) montre que la température a un impact important sur les propriétés du béton traité au latex (BGRT). Les échantillons à 60 °C présentent des valeurs plus élevées de masse volumique que ceux à 20 °C. Par exemple, BGRT8 à 60 °C a une masse volumique de 2.39, tandis que BGRT3 à 20 °C a 2.346.

Ces valeurs sont en accord avec les valeurs d'absorption, les GRT affichant la grande absorption sont ceux une fois incorporés dans le béton qui affichent des masses volumiques élevées.

5.2 Absorption

L'absorption des bétons BGR et BGRT est déterminée à l'état durci après 28 jours de durcissement dans un milieu humide, les résultats obtenus sont représentés sur la figure 5.13.

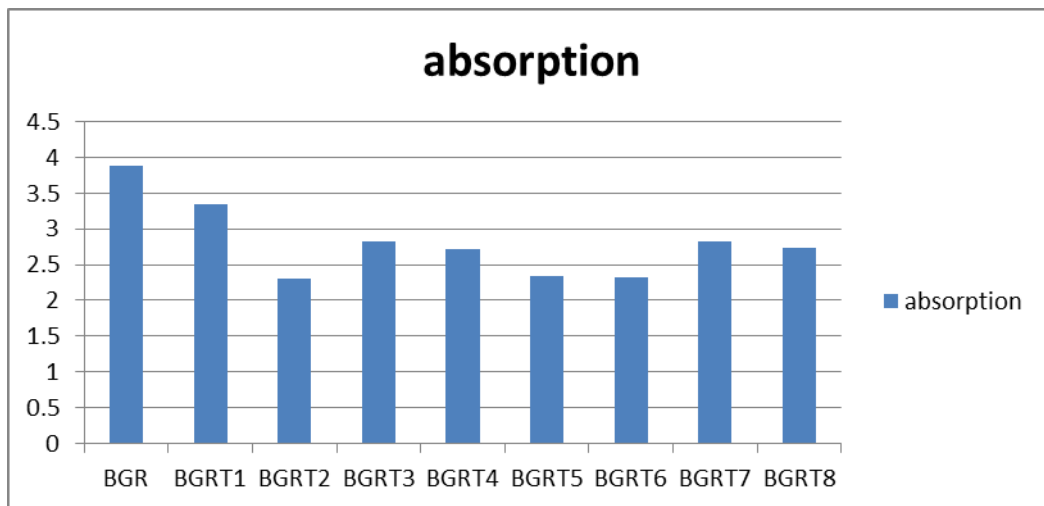


Figure 5. 13: absorption des bétons BGR et BGRT.



Figure 5. 14: absorption des bétons BGR et BGRT

L'analyse des résultats d'absorption montre que le granulats de référence (BGR) présente la valeur d'absorption la plus élevée (3,88), indiquant une plus grande porosité par rapport

aux granulats traités au latex (BGRT). Les granulats traités avec un rapport E/C de 0,5 montrent généralement une absorption plus faible par rapport à ceux avec un rapport de 1, ce qui suggère que la réduction du rapport E/C diminue la porosité. De plus, l'augmentation de la teneur en latex de 15 % à 35 % contribue également à réduire l'absorption, comme en témoignent les faibles valeurs obtenues pour BGRT4 (2,71) et BGRT8 (2,74). La température a également un effet significatif : les granulats traités à 60°C présentent des valeurs d'absorption peu élevées ou presque identiques rapport à ceux traités à 20°C, ce qui pourrait s'expliquer par une meilleure réticulation du latex. Ainsi, l'optimisation des facteurs (rapport E/C, teneur en latex et température) contribue à améliorer l'imperméabilité des granulats traités.

5.3. Résistance en compression :

La figure 5.16 présente les résultats de la résistance en compression après 28 jours de durcissement dans un milieu humide.

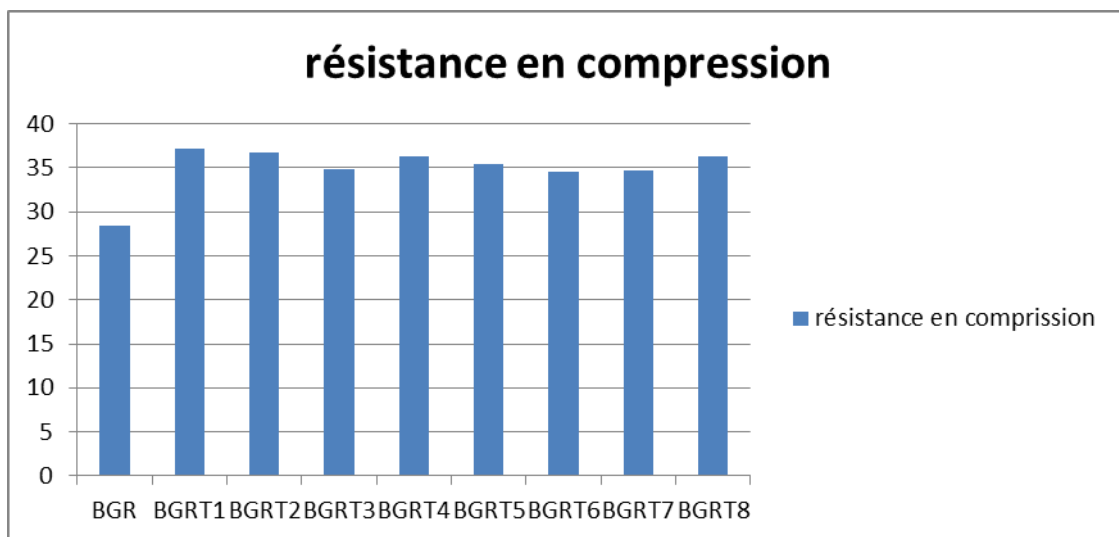


Figure 5. 15: résistance en compression des bétons BGR et BGRT.



Figure 5. 16: essai de résistance en compression des bétons BGR et BGRT.

L'analyse des résultats de résistance en compression montre que le granulat de référence (BGR) présente une valeur de 28,36 MPa, ce qui est nettement inférieur aux valeurs obtenues pour les granulats traités au latex (BGRT).

Le traitement des GR par le coulis de ciment améliore nettement la résistance du béton quelque soit le rapport E/C (une légère augmentation est remarquée pour $E/C = 0.5$), le ciment enrobe les pores du mortier attaché, renferme les fissures existantes (la guérison des fissures dans la zone interfaciale suite au dépôt de nouveaux produits d'hydratation), l'adhérence du nouveau mortier au GRT est renforcée, ce qui influence positivement la résistance du BGRT.

Les résultats indiquent aussi que l'ajout de latex au coulis de ciment enrobant les granulats recyclés améliore significativement la résistance en compression, notamment pour BGRT1 (37,21 MPa) et BGRT2 (36,7 MPa), qui affichent les valeurs les plus élevées. La résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en latex, ce qui est visible dans les résultats de BGRT4 (36,32 MPa) et BGRT8 (36,31 MPa). De plus, les échantillons traités à 60°C montrent généralement une légère amélioration de la résistance par rapport à ceux traités à 20°C, ce qui pourrait s'expliquer par une meilleure réticulation du latex à température élevée. Ainsi, l'utilisation de latex, combinée à une température de traitement adéquate, contribue à renforcer la résistance mécanique des granulats.

5.4. Texture des GBR et BGRT

Un microscope optique a été utilisé pour visualiser l'interface mortier adhérent - granulat naturel.

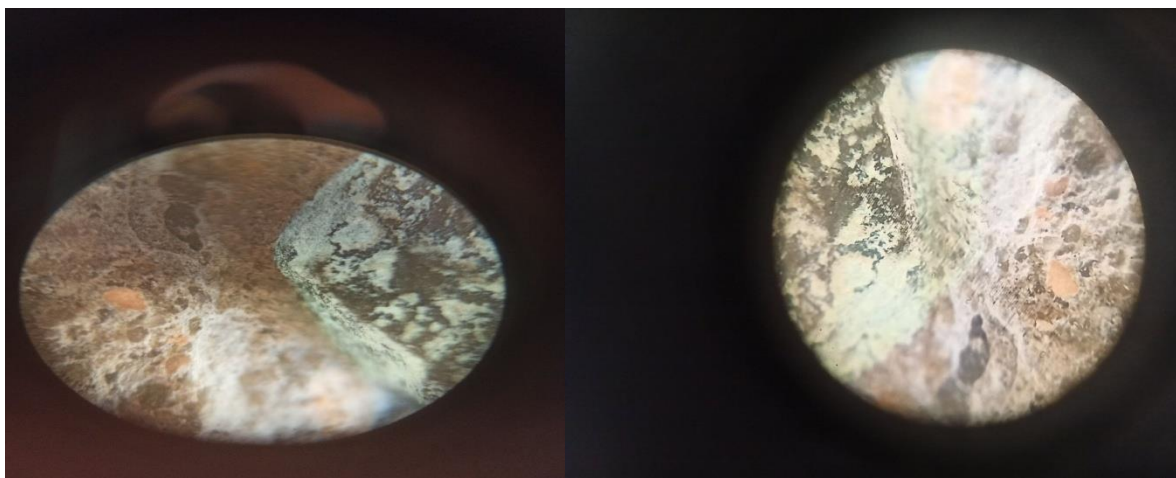


Figure 5. 17: Texture du BGR au microscope.

- L'interface mortier - granulat est illustrée sur la figure 5.18.

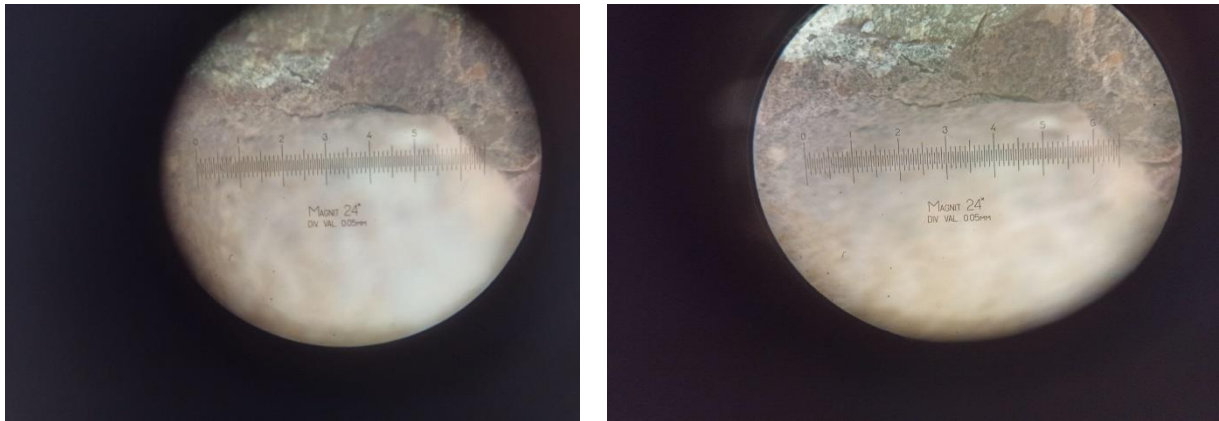


Figure 5. 18: Interface mortier–granulat recyclé (GR)

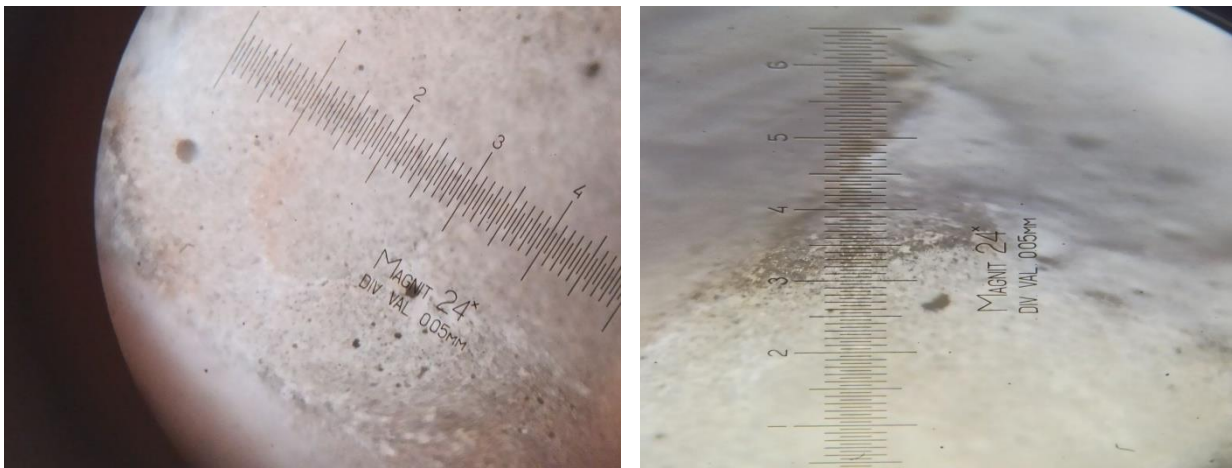


Figure 5. 19: Surface du GRT traité au coulis de ciment.

La figure 5.19 illustre la texture d'un granulat recyclé traité par un coulis de ciment, la surface présente une porosité variée (petits pores et d'autres moyens).

6. optimisation du traitement des GBR

Pour optimiser le traitement présenté dans la matrice d'expérimentation une réponse est choisie : la résistance en compression des différents bétons.

Tableau 5. 2: la matrice d'expérimentation avec la réponse choisie

N°essais	Facteur 1 Le rapport E/C A	Facteur 2 Teneur en latex B	Facteur 3 La température C	Résistance en compression Mpa	Absorption %	Masse volumique
1	0.5	15 %	20°	37.21	3.35	2.385
2	1	15%	20°	36.70	2.30	2.369
3	0.5	35%	20°	34.88	2.82	2.346
4	1	35%	20°	36.32	2.71	2.362
5	0.5	15%	60°	35.45	2.34	2.383
6	1	15%	60°	34.53	2.32	2.374
7	0.5	35%	60°	34.76	2.82	2.365
8	1	35 %	60°	36.31	2.74	2.390
Niveaux des facteurs	0.5 - 1	15 % - 35 %	20° - 60 °			

Le logiciel Design-Expert V13.0.5.0 est utilisé pour effectuer une analyse de régression quadratique des données présentées dans le tableau 5.2.

La relation entre les variables de réponse Y (RC) et les facteurs d'influence X1 (le rapport E/C), X2 (%L) et X3 (degré de T) est présentée à l'aide des équations de régression du premier ordre.

6.1. ANOVA for selected factorial model

Response 1: Rc

**Tableau 5. 3: L'analyse de la variance (ANOVA) pour le modèle factoriel sélectionné-
Réponse: Rc**

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	Significance
Model	6,20	5	1,24	23,59	0,0412	significant
A/E	1,10	1	1,10	20,98	0,0445	
B/L	1,13	1	1,13	21,55	0,0434	
C/T	0,8778	1	0,8778	16,70	0,0550	
AB	1,81	1	1,81	34,52	0,0278	
BC	1,27	1	1,27	24,20	0,0389	

6.2 Fit Statistiques

Tableau 5. 4: Paramètres statistique du modèle factoriel sélectionné

	Valeur		Valeur
Std. Dev.	0,2293	R ²	0,9833
Mean	35,84	Adjusted R ²	0,9416
C.V. %	0,6396	Predicted R ²	0,7332
		Adeq Précision	12,6039

$R^2 = 0.98$ indiquant une bonne corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Cela confirme que le modèle de régression correspond bien aux différents tests effectués sur les données.

6.3 Final Equation in Terms of Coded Factor

La résistance à la compression est donnée par le modèle comme suit :

$$R_c = 35,84 + 0.371 A - 0.376 B - 0.331 C + 0.476 AB + 0.398 BC$$

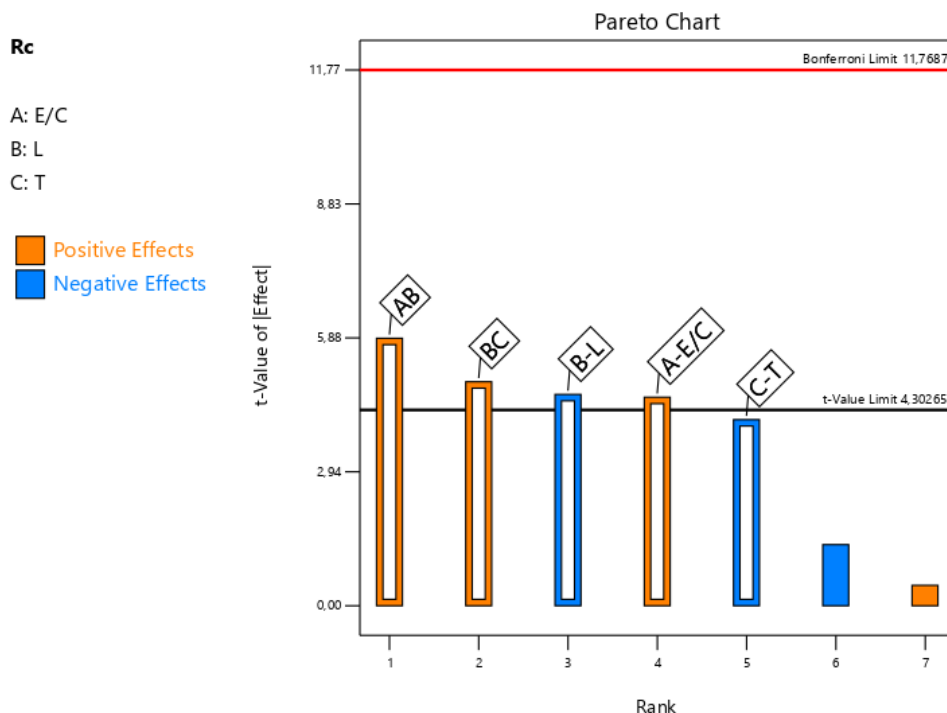


Figure 5. 20: diagramme de parito

D'après le diagramme de parito les facteurs les plus influents sur la résistance sont: l'interaction : E/C et % latex suivie par l'interaction % latex et température .

pour les facteurs indépendants le % du latex dans le coulis a plus d'influence que les deux autres facteurs .

Les relations entre les valeurs prédites et expérimentales (prédites vs réelles) sont très proches d'une ligne droite. Manifestement, les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les prévisions réelles

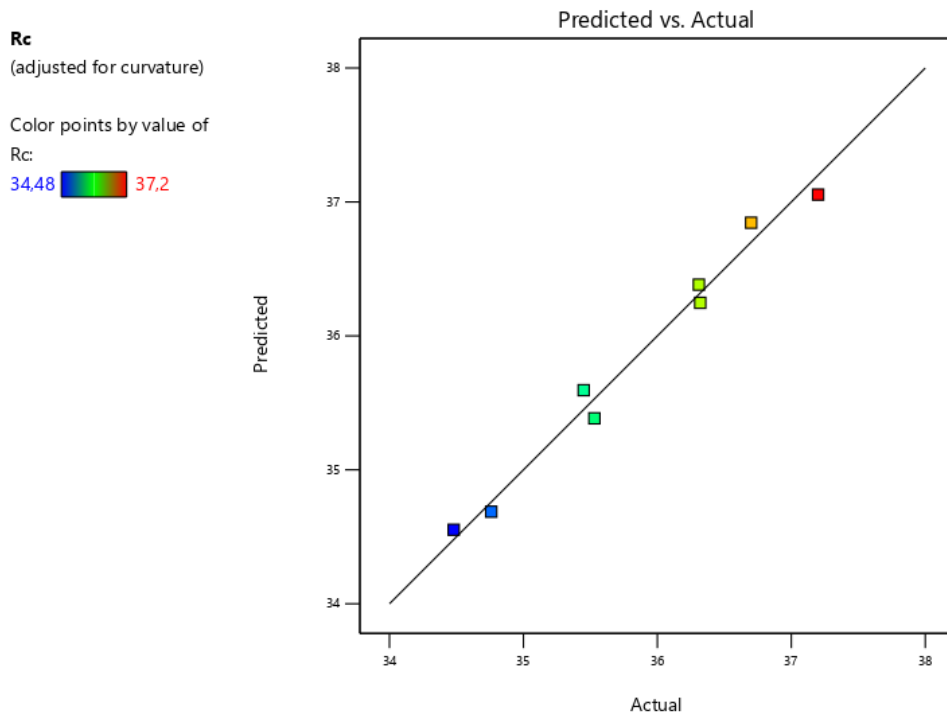


Figure 5. 21: relation entre les valeurs réelles et les valeurs prédites

6.4. les courbes d'isoréponse :

Les figures (5.22 et 5.23) montrent la représentation bidimensionnelle de la surface de réponse et les graphiques tridimensionnels. Ils mettent en évidence l'interaction entre trois facteurs :

- le rapport E/C, le pourcentage de latex
- le pourcentage de latex et le degré de Température.

Factor Coding: Actual

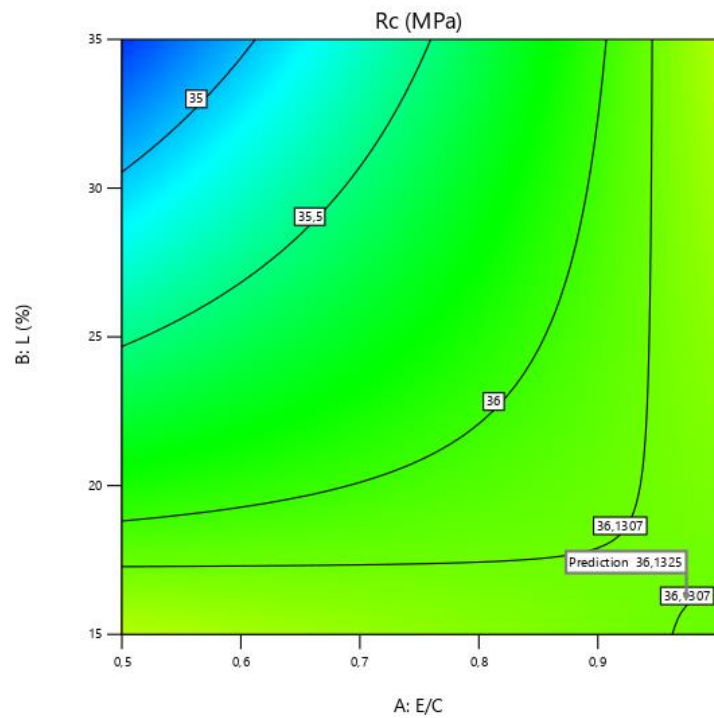
Rc (MPa)34,48  37,2

X1 = A

X2 = B

Actual Factor

C = 40



Factor Coding: Actual

Rc (MPa)34,48  37,2

X1 = B

X2 = C

Actual Factor

A = 0,75

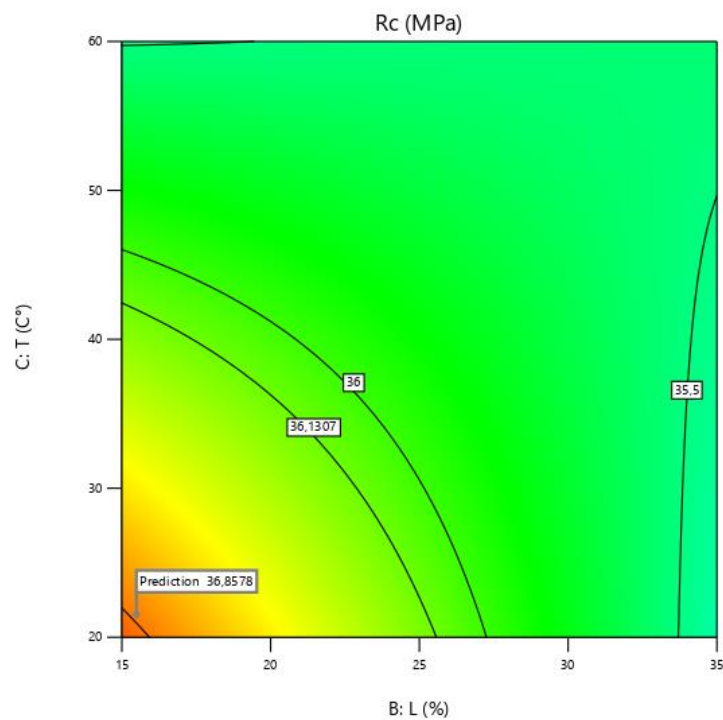


Figure 5. 22: Courbes de niveau 2D pour la résistance à la compression.

Les résistances maximales du béton sont obtenues pour des teneurs en latex de 15 à 20 % à des températures inférieures à 30 °C.

Factor Coding: Actual

3D Surface

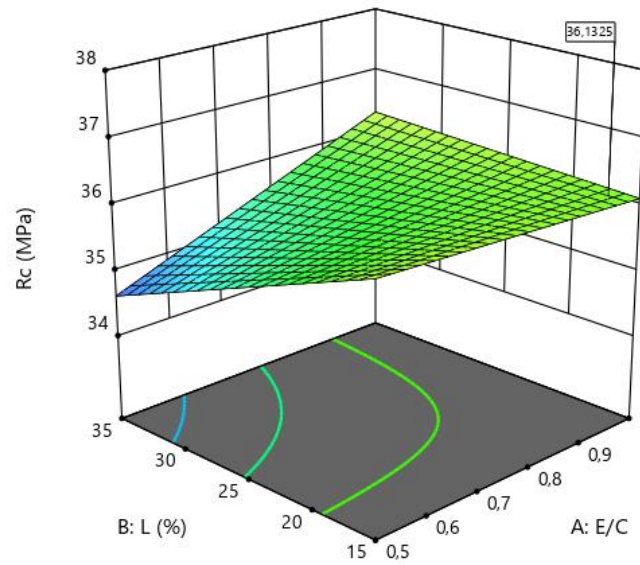
Rc (MPa)34,48  37,2

X1 = A

X2 = B

Actual Factor

C = 40



Factor Coding: Actual

3D Surface

Rc (MPa)34,48  37,2

X1 = B

X2 = C

Actual Factor

A = 0,75

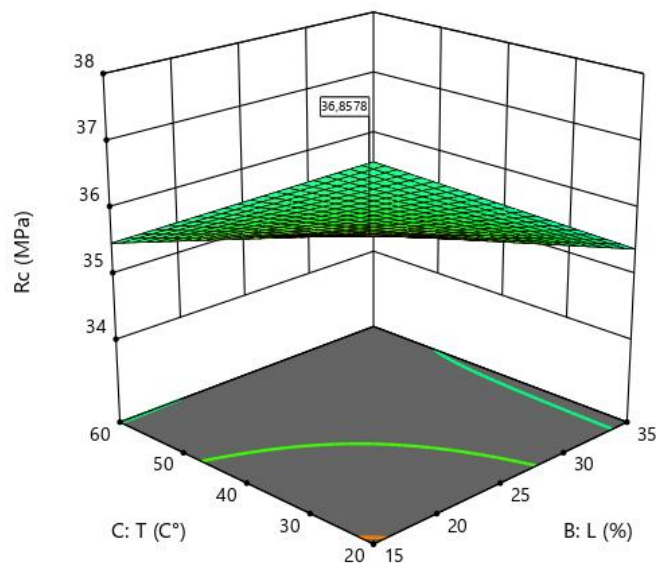


Figure 5. 23: Graphiques de réponse 3D, pour la résistance à la compression.

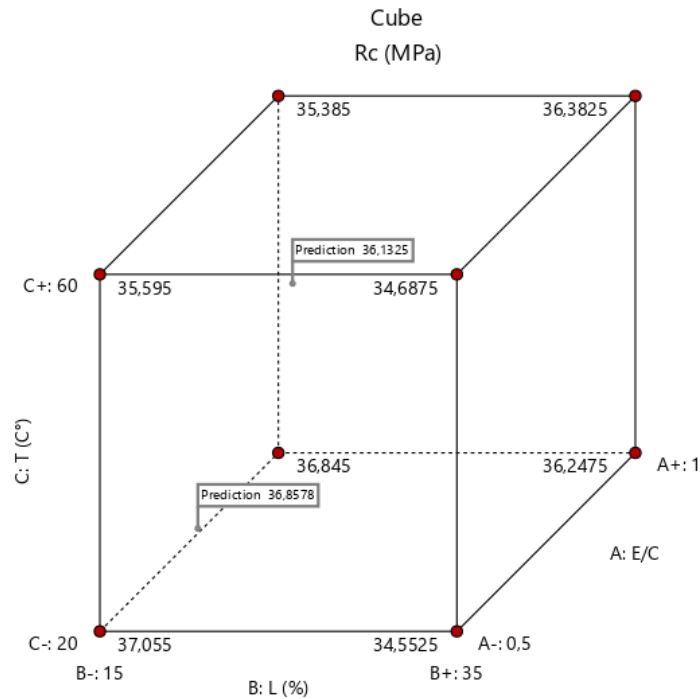
Factor Coding: Actual

Rc (MPa)

X1 = B

X2 = C

X3 = A

Predicted values shown**Figure 5. 24: configuration des réponses suivant les niveaux des facteurs****Solution :**

Les réponses optimisées sont 5 réponses dont on retient la réponse avec la désirabilité la plus élevée.

cad : $E/C = 0.5$, % du latex = 15 % et une température de cure de 20°C des conditions qui donnent la valeur optimale de la résistance en compression

Tableau 5. 5: Réponses optimales des caractéristiques de résistance à la compression en fonction du rapport E/C, du pourcentage de latex et de la température de cure

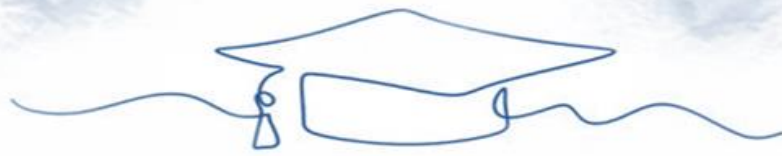
Number	E/C	L	T	Rc	Ab	Desirability	
1	0,500	15,000	20,000	37,055	2,680	0,947	Selected
2	0,503	15,000	20,000	37,054	2,679	0,946	
3	0,506	15,000	20,267	37,045	2,679	0,943	
4	0,519	15,071	20,000	37,037	2,682	0,940	
5	0,500	15,139	20,000	37,037	2,682	0,940	

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact du traitement des granulats recyclés (GBR) par encapsulation avec un coulis de ciment modifié par l'ajout de latex. Les essais réalisés ont permis d'évaluer les effets de différents paramètres, notamment la teneur en latex, la température de durcissement et le rapport E/C, sur les performances mécaniques et physiques des bétons.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la teneur en latex (de 15 % à 35 %), combinée à une température de durcissement élevée (60 °C) et à un rapport E/C réduit (0,5), contribue significativement à l'amélioration de la résistance en compression, à l'augmentation de la masse volumique et à la réduction de l'absorption d'eau. Ces conditions favorisent la réticulation du latex et améliorent la compacité des granulats, renforçant ainsi la durabilité des bétons.

En conclusion, le traitement des GBR avec un coulis de ciment modifié du latex, dans des conditions optimisées, représente une approche efficace pour valoriser les granulats recyclés dans la production de bétons performants, contribuant ainsi à une gestion durable des matériaux de construction.



Conclusions générale

Conclusion générale

Ce mémoire s'est inscrit dans une démarche expérimentale visant à améliorer les propriétés des granulats de béton recyclé (GBR), en particulier ceux de la fraction 15/25 mm, par un traitement de surface innovant : l'enrobage au coulis de ciment modifié par du latex. Cette approche s'inscrit pleinement dans une logique de valorisation des matériaux recyclés, en réponse aux exigences croissantes de durabilité et de réduction de l'impact environnemental du secteur de la construction.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité de ce traitement dans la réduction de l'absorption d'eau, l'amélioration de la densité apparente, ainsi que l'augmentation significative de la résistance mécanique des bétons produits. L'étude a également montré que les performances des GBR traités sont fortement influencées par trois facteurs essentiels : le rapport eau/ciment du coulis, la teneur en latex, et le mode de cure (à l'air libre ou à 60°C).

L'optimisation de ces paramètres à l'aide d'un plan d'expériences factoriel a permis d'identifier une combinaison optimale, assurant un compromis satisfaisant entre performances mécaniques et durabilité. Ce travail confirme ainsi que les granulats recyclés, lorsqu'ils sont correctement traités, peuvent constituer une alternative viable aux granulats naturels dans les bétons structurels.

En conclusion, cette étude contribue à la promotion de solutions constructives plus durables en intégrant des matériaux recyclés tout en garantissant la qualité des bétons. Elle ouvre la voie à des recherches futures portant sur d'autres techniques de traitement de surface, l'emploi d'adjuvants complémentaires ou encore l'étude du comportement à long terme des bétons recyclés en conditions réelles d'exploitation.

Référence

bibliographique

Références bibliographiques

- [1] Bouaka, W. (2021). *Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique des bétons*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [2] Debieb, F. (2018). *Valorisation des granulats recyclés dans le béton : aspects environnementaux et techniques*. Thèse de doctorat, Université de Blida.
- [3] Boudina, T. (2020). *Étude de l'influence de la granulométrie et de la nature des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons*. Thèse de doctorat, Université de Biskra.
- [4] Santamaria Diaz, N. K. (2018). *Valorisation des granulats recyclés dans le béton pour les pavages et les trottoirs*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke.
- [5] Allal, M., Zeghichi, L., & Siline, M. (2024). 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*, 94, 109852.
- [6] SERIFOU, M. (2014). *Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la*. Université Sciences et Technologies - Bordeaux .
- [7] R. MAILLOT, "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001).
- [8] Berredjem Layachi. (2009). *Le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et comportements physique et mécaniques des bétons a base de ces recycles*. (Mémoire de magister). Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [9] DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS FRANCE, "La Technologie du Béton", Guf\Formation\Béton\Technobeton V05_01U, 140 p
- [10] J. BARON, et R. SAUTREY, "Le béton hydraulique", *Presse de l'école nationale des ponts et chaussées*, Paris, 560 p., (1982).

- [11] V. PHOUMMAVONG, "*Cours en ligne matériaux de construction*", Université Nationale du Laos, <http://www.la.refer.org/materiaux/>
- [12] A. M. NEVILLE, "*Propriétés des bétons*", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p., (2000).
- [13] G. ARQUIE & C. TOURENQ, "*Granulats*", Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 717 p., (1990).
- [14] J. ALEXANDRE & J. SEBILEAU, "*Laitier de haut fourneau*", Centre Technique et de Promotion des Laitiers, Paris édition, 340 p., (1988).
- [15] Le LERM, "*Déchets de chantiers de bâtiment*", enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME, (1999).
- [16]: ADEME, "*Guide des déchets de chantiers de bâtiment*", Paris, (1998).
- [17]: H. DJELAL & V. NOUVEL, "*Gestion des déchets de démolition et environnement*", XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy, 8 p., (2008).
- [18] Molin C., Larsson K., Arvidsson, H., Quality of reused crushed concrete strength, contamination and crushing technique, RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.
- [19] Québaud M., Caractérisation des granulats recyclés-Etude de la composition et du comportement de béton incluant ces granulats, Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.
- [20] Cléo Laneyrie, Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés, thèse de doctorat, université de Cergy Pontoise, décembre 2014.
- [21] Le T. Influence de l'humidité des granulats de béton recyclé sur le comportement à l'état frais et durcissant des mortiers: Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Douai-Université de Lille 1, France; **2015**.
- [22] de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018.

Ouvrages Scientifiques, OSI4, 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

[23] S. Rémond¹, J.M. Mechling², E. Garcia-Diaz³, R. Lavaud⁴, R. Trauchessec², B. Cazaciu⁵. 2018. Caractérisation des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

[24] S. Rémond¹, J.M. Mechling², E. Garcia-Diaz³, R. Lavaud⁴, R. Trauchessec², B.Cazaciu⁵. 2018. Caractérisation des granulats de béton recyclé. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.). Le béton recyclé. Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018. Ouvrages Scientifiques, OSI4. 792 pages, ISBN 978-2-85782-747-4.

[25] Tam V. W. Y., Gao X. F. et Tam C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research, volume 35, numéro 6, p. 1195-1203.

[26] Malesev M., Radonjanin V. et Marinkovic S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. Sustainability, volume 2, numéro 5, p. 1204-25.

[27] Ferreira L. and al., "Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties", Magazine of concrete research, Vol 63 issue 8, p. 617-627, 2011.

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

[29] Etxeberria. M., Vázquez. E., Mari. A., et Barra. M., «Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete», Cement and Concrete Research, Vol 37, N°5, (2007), p 735-742.

[30] Katz, A., «Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate», Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), Vol 16, N°6, (2004), p 597- 603.

[31] Tam V.W.Y., Wang K., and Tam C.M., «Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis», Journal of Hazardous Materials, Vol 152, N°2, (2008), p 703-714.

[32] Gonzalez-Fonteboa B., Martínez-Abella F., 2008, 'Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume', *Materials and mechanical properties Building Environment*, vol. 43, pp. 429-437.

[33] Manuel G., Agrela F.B., Barbudo A., Ayuso J., Antonio Ramírez., 2014, 'Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates', *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 231-238.

[34] Richardson A., Coventry K., Bacon J., 2011, 'Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete', *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 272-277.

[35] Buyle-Bodin F., Blanpain O., Goncalves G., «Complete recycling of concrete – socio-economic and environmental analysis of the different industrial ways of producing natural and recycled aggregates on the territory of North-Pas de Calais region», (LCA) conference, Lille, France, (2012).

[36] Berredjem. L., Arabi. N., « les matériaux de démolition une source de granulats pour béton : formulation et caractérisation d'un béton à base de ces recycles », SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 12-14, (2009), 255-262.

[37] Nourredine ARABI., Layachi Berredjem., « Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons », *Déchets - Revue Francophone d'Écologie Industrielle*, N°60, (2011), p 25-30.

[38] Kebaili, Oussama., Michel Mouret., Nourredine Arabi., and Franck Cassagnabere., «Adverse Effect of the Mass Substitution of Natural Aggregates by Air-Dried Recycled Concrete Aggregates on the SelfCompacting Ability of Concrete: Evidence and Analysis through an Example», *Journal of Cleaner Production*, Vol 8, January (2015), p 752-761.

[39] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F., Eiras-Lopez J., Seara-Paz S., «Effect of recycledcoarse aggregate on damage of recycled concrete», *Mater Struct*, Vol 44, N°10, (2011), p 1759-1770.

[40] Ait Mohamed Amer Adam, « valorisation des matériaux de démolition dans la construction », thèse doctorat, université Hassiba Ben Bouali à Chalef, février 2017.

[41] Behera, M.; Bhattacharyya, S.K.; Minocha, A.K.; Deoliya, R.; Maiti, S.; (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Constr. Build. Mater.*; 68: 501-516.

[42] Sucic, A.; Lotfy, A.; (2016). Effect of new paste volume on performance of structural concrete using coarse and granular recycled concrete aggregate of controlled quality. *Constr. Build. Mater.*; 108: 119-128.

[43] Kou S., Poon C., «Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources», *Mag Concr Res*, Vol 60, N°1, (2008), p 57-64.

[44] Nourredine ARABI., Layachi Berredjem., « Valorisation des déchets de démolition comme granulats pour bétons », *Déchets - Revue Francophone d'Écologie Industrielle*, N°60, (2011), p 25-30.

[45] Butler L., West J.S., Tighe S.L., «Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength», *Construction and Building Materials*, Vol 47, (2013), p 1292-1301.

[46] Sánchez de Juan.M., et Alaejos Gutierrez.P., «Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate», *RILEM, Actes du colloque Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 9-11 Novembre 2004, Barcelone, Espagne.

[47] Neville, A.M.; (2000). *Les propriétés du béton*, Paris, Edition Eyrolles.

[48] R.V. Silva, R. Neves, J. de Brito, R.K. Dhir. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete, *Cement & Concrete Composites*, 2015; 62:22-32.

[49] JianZhuang, X., Bin, L. et ChuanZeng, Z. On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2012 ; 55 (9) :2609-2616.

- [50] Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. et Hisada, M. Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 2011; 25(5): 2426-2431.
- [51] TOURKIA, G. (2019). *Influence de la pré-saturation des granulats recyclés sur le comportement du béton ordinaire*. Doctoral dissertation. Université de Mostaganem.
- [52] Masato T., Takafumi N., Masaki T., Manabu K., Ippei M., Hironori N., *Study of the application of low-quality recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment*, in: 2nd Asian Concr. Fed. Conf., Bali, Indonesia. (2006)
- [53] Arandigoyen M., Bicer-Simsir B., Alvarez JI., Lange DA., *Applied surface science*. Vol. 252 (2006), pp. 7562–71.
- [54] HZ Quan, Effets de la teneur en mortier collé sur la qualité des agrégats grossiers recyclés de béton, *Adv. Mater. Rés.* 194–196 (2011) 1059–1062, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.194-196.1059> .
- [55] M. Quattrone, SC Angulo, VM John, Énergie et CO2 issus de la production de granulats recyclés à haute performance, *Resour. Conserv. Recycl.* 90 (2014) 21–33, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.003>.
- [56] HKA Al-Bayati, PK Das, SL Tighe, H. Baaj, Évaluation de diverses méthodes de traitement pour améliorer les propriétés physiques et morphologiques des granulats de béton recyclé grossier, *Constr. Construire. Mater.* 112 (2016) 284–298, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176>.
- [57] E. Mulder, TPR de Jong, L. Feenstra, Construction en cycle fermé : un processus intégré pour la séparation et la réutilisation des déchets de C&D, *Waste Manag.* 27 (2007) 1408–1415, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.013>.
- [58] X.-W. Ma, Z.-X. Han, X. Li, F.-L. Meng, Traitement thermique des déchets de béton et propriétés de réhydratation de la pâte de ciment déshydratée, *J. Qingdao Technol. Univ.* 30 (2009) 93–97.

- [59] Despotovic, L'amélioration des granulats de béton recyclés - Un article de synthèse, dans : 4th Int. Conf. Contemp. Réaliser. Civ. Ing. 22 avril 2016. Subotica, Serbie., 2016 : pp. 443–454. <https://doi.org/10.14415/konferencijaGFS>.
- [60] H. Shima, H. Tateyashiki, R. Matsushashi, Y. Yoshida, Une technologie avancée de recyclage du béton et son évaluation de l'applicabilité par les entrées-sorties
- [61] J.-W. Ahn, K.-S. Vong, G.-C. Han, N.-I. Euh, H.-C. Cho, Procédé avancé de récupération d'agrégats recyclés de haute qualité à partir de déchets de béton, *Geosystem Eng.* 9 (2006) 45–48, <https://doi.org/10.1080/12269328.2006.10541254>.
- [62] Tam, V. W. Y., **Li, J.**, & **Wang, J.** (2021). Amélioration de la qualité des granulats de béton recyclés par élimination des résidus de mortier : une revue complète des approches adoptées. *Construction and Building Materials*, 288, 123066. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123066>
- [63] 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.
- [64] 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
- [65] 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
- [66] 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.
- [67] 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.

- [68] 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.
- [69] Allal, M. (2025). *Caractérisation et amélioration de la durabilité des bétons à granulats recyclés (étude expérimentale et modélisation)* [Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra]. Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie civil et hydraulique.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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
- [73] 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
- [74] 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.
- [75] J. Goupy, ' Introduction aux plans d'expériences ', 5ème Edition, Dunod, 2005.
- [76] F. Jérôme, ' Les plans d'expériences pour le réglage des commandes à base de logique floue ', thèse de doctorat, Ecole nationale supérieur d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique et des télécommunications, 26 Septembre 2006.

[77] Lafarge Algérie. (2024). Fiche technique – Ciment Portland CEM I 42.5 N – SR3.
Document technique consulté sur le site de Lafarge ou fourni par le distributeur.