



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 de construction

Réf. :

Présenté et soutenu par :

Hamza Brahimi

Le : mercredi 25 juin 2025

Etude expérimentale de la durabilité du béton à base de granulas recyclés

Jury :

Encadreur : Bensmaile Messaouda

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à ceux qui m'ont soutenu(e), encouragé(e) et accompagné(e) tout au long de la réalisation de ce travail, que ce soit par leurs conseils, leur aide ou leur bienveillance.

Mes remerciements les plus sincères vont à ma directrice de mémoire, Madame Bensmaïle Messaouda, pour son accompagnement rigoureux, sa patience, et la richesse de ses orientations. Sa disponibilité et son professionnalisme ont été d'une grande importance dans l'aboutissement de ce projet. J'adresse également ma profonde gratitude à Madame Chadli Mounira pour l'aide précieuse qu'elle m'a apportée tout au long de mon travail.

Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce mémoire, et pour leurs remarques et suggestions constructives.

Toute ma reconnaissance va également aux enseignants du département de génie civil de l'Université de Biskra, pour leur engagement constant à transmettre le savoir et leur accompagnement tout au long de notre formation.

Je remercie chaleureusement mes camarades de la promotion 2025, avec qui j'ai partagé cette belle aventure universitaire faite d'efforts, d'apprentissages et de réussites.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont aidé(e) de près ou de loin, je vous adresse mes remerciements les plus profonds.

Dédicace

À ma chère mère : Bouchra

À toi, maman, source d'amour inconditionnel et de tendresse infinie. Tu es mon refuge dans les moments difficiles, ma force silencieuse. Que Dieu te protège et te garde en bonne santé pour de longues années.

À mon père : Mohamed

Merci papa pour tes sacrifices, ton courage et ta sagesse. Tu es un pilier dans ma vie, un modèle d'intégrité et de persévérance. Que Dieu te bénisse et t'accorde une longue vie pleine de paix,

À mes frères et sœurs : Abderrahmane, Nedjoud et Meriem

Vous êtes ma famille, mon équilibre, mes repères. Merci pour votre amour, votre soutien constant et votre présence rassurante à chaque étape.

À mes amis : Bilal, Alla, Djamel, Islam, Merouane, Lamine, Amouni, Abdo, Hamid et Redouane

Votre amitié est un trésor précieux. Merci pour les moments partagés, les fous rires, les discussions profondes, et surtout, pour être toujours là.

À ma chère amie : Inès

Un merci tout particulier pour ton écoute, ta bienveillance et ton encouragement sincère. Ton amitié m'a énormément aidé tout au long de ce parcours.

Résumé

Dans un contexte où le développement durable et la préservation des ressources naturelles deviennent des priorités, l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication du béton représente une alternative prometteuse. Elle permet de réduire l'exploitation des ressources naturelles tout en valorisant les déchets issus de la démolition. Cette étude expérimentale vise à évaluer l'effet du remplacement partiel ou total des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés du béton, notamment sa durabilité en milieu agressif.

Des essais d'absorption d'eau par immersion et par capillarité ont été réalisés. Les résultats montrent que les bétons contenant des granulats recyclés non saturés présentent les taux d'absorption les plus élevés (9,06 % par immersion et $1,38 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{0.5}$ par capillarité), ce qui reflète une porosité accrue. En comparaison, le béton de référence à base de granulats naturels affiche les taux les plus faibles (4,7 % et 0,56 respectivement). Il a également été démontré que la saturation préalable des granulats recyclés réduit efficacement l'absorption, améliorant ainsi la résistance du béton aux milieux agressifs.

Concernant la résistance à la compression, toutes les formulations ont subi une diminution après immersion dans l'eau de mer pendant 45 jours, avec une perte allant de 4 % à 8 %. Cette dégradation est particulièrement marquée pour les bétons incorporant des granulats recyclés saturés, en raison de l'action des ions chlorures et sulfates sur la matrice cimentaire.

Ces résultats confirment que l'usage de granulats recyclés est envisageable dans le secteur du béton, à condition d'un contrôle rigoureux de leur état (saturation) et des proportions utilisées. Cela permet de garantir un compromis acceptable entre performance mécanique, durabilité et impact environnemental réduit.

Mots clés : Granulats recyclés, Résistance à la compression, Durabilité, Milieux agressifs.

الملخص

في ظل التوجه العالمي نحو التنمية المستدامة والحفاظ على الموارد الطبيعية، تُمثل إعادة استخدام الركام المعاد تدويره في تصنيع الخرسانة بديلاً واعداً. إذ يساهم هذا الخيار في الحد من استنزاف الموارد الطبيعية وفي تأمين النفايات الناتجة عن الهدم.

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تقييم تأثير الاستبدال الجزئي أو الكلي للركام الطبيعي بالركام المعاد تدويره على خصائص الخرسانة، لا سيما من حيث متانتها في البيئات العدوانية.

تم إجراء اختبارات لامتناس الماء بالغمر وبالخاصية الشعرية. وقد أظهرت النتائج أن الخرسانة المحتوية على ركام معاد تدويره غير مشبع سجلت أعلى نسب امتصاص (9.06% بالغمر و1.38 كغ/م²/دقيقة^{0.5} بالخاصية الشعرية)، مما يعكس مسامية مرتفعة. في المقابل، سجلت الخرسانة المرجعية بالركام الطبيعي أدنى نسب امتصاص (4.7% و0.56 كغ/م²/دقيقة^{0.5} على التوالي). كما تبين أن تشبع الركام المعاد تدويره مسبقاً يقلل من الامتناس بشكل فعال، مما يعزز مقاومة الخرسانة للبيئات العدوانية.

أما فيما يخص مقاومة الضغط، فقد شهدت جميع التركيبات انخفاضاً بعد الغمر في ماء البحر لمدة 45 يوماً، بنسبة فقدان تراوحت بين 4% و8%. وسُجل هذا التدهور بشكل أوضح في الخلطات التي تحتوي على ركام معاد تدويره غير مشبع، نتيجة تأثير أيونات الكلوريد والكبريتات على مصفوفة الإسمنت.

تؤكد هذه النتائج أن استخدام الركام المعاد تدويره في الخرسانة ممكن تقنياً، شريطة ضبط حالته (خصوصاً درجة التشبع) والتحكم في نسب استعماله، مما يسمح بتحقيق توازن مقبول بين الأداء الميكانيكي، المتانة، والتأثير البيئي المنخفض.

الكلمات المفتاحية: الركام المعاد تدويره، مقاومة الضغط، المتانة، البيئات العدوانية

Table des matières

<i>Remerciements</i>	I
المخلص	V
LISTES DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XII
Introduction générale	1
Chapitre I	3
Recherche bibliographique	3
I. Introduction :	4
I.1 Généralité sur béton :	4
I.1.1 Les granulats :	5
I.1.1.1 Définition :	5
I.1.1.2 Classe des granulats :	5
I.1.1.3 Les différents types de granulats :	5
I.1.2 Le ciment :	6
I.1.2.1 Types du ciment :	7
I.1.3 Adjuvants :	7
I.1.4 L'eau de gâchage :	8
I.2 Granulats recyclés issus des déchets de la démolition et de la construction :	8
I.2.1 Historique :	9
I.2.2 Déchets de chantier :	9
I.2.3 Classification des déchets de chantier :	10
I.2.4 Les déchets inertes :	10
I.2.5 Les déchets non dangereux non inertes :	11
I.2.6 Les déchets dangereux :	12
I.2.7 Gestion des déchets de chantier :	13
I.2.9 Traitement (recyclage) :	13
I.3 Granulat recyclé :	13
I.3.1 Utilisation Des Granulat Recyclés :	14
I.3.2 Les avantages de l'emploi des granulats recyclés :	14
I.3.3 Les inconvénients de l'emploi des granulats recyclés :	15
I.3.4 Préparation des granulats recyclés :	15
I.3.5 Traitement des granulats recyclés :	15
I.3.7 Les classes principales des granulats recyclés :	16

I.3.8 Norme relative aux granulats recyclés : NF EN 12620	16
I.3.9 Propriétés des granulats recyclés en relation avec le béton :	17
I.3.10 Granulat recyclé fin :	18
I.3.11 Caractéristiques physiques des granulats recyclés :	18
a. Ouvrabilité :	18
b. La granulométrie et le module de finesse :	18
c. Masse volumique :	19
d. Absorption :	19
e. Résistance à la traction et à la flexion :	19
f. La résistance à la compression :	20
I.4 Durabilité du béton à base du granulat recyclé :	20
I.4.1 Absorption d'eau des bétons :	21
I.4.2 Carbonatation et porosité :	21
I.4.3 Résistance aux Attaques chimiques :	23
I.4.4 Résistance aux cycles de gel et dégel :	24
I.5 Conclusion :	24
Chapitre II	25
Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales	25
II . Introduction :	25
II .1 Matériaux utilisés:	25
II .2 Caractéristique des matériaux:	25
II .2.1 Le ciment:	25
II .2.1.1 Caractéristique du ciment CPA-CEM I:	26
II .2.1.2 Caractéristique chimiques du ciment utilisé:	26
II .2.1.3 Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé :	27
II .3 Caractéristique du Gravier:	27
a. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1] :	27
1. Gravier Naturel :	28
- Préparation de l'échantillon pour l'essai :	28
2. Gravier Recyclé :	30
b. La Masse Volumique :	33
1- La Masse Volumique apparente (ρ_{app}) :	33
2- La Masse Volumique absolue ρ_{abs} :	35

II .4 Sable :	36
II .4.1 Les caractéristiques de sable :	37
a. Equivalent de sable :	37
b. Analyse granulométrique :	39
c. Module de finesse :	41
d. La masse volumique :	41
II .5 L'eau :	43
II.5.1 L'eau de mer :	43
II .6 Composition du béton:	43
II .6.1 Les méthodes de calcul de la composition du béton :	43
II .6.2 Méthode de Dreux-Gorisse :	44
II .6.3 Préparation et malaxage du béton :	46
II .6.4 Vibration :	47
II .6.5 Conservation des éprouvettes après démoulage :	48
II .6.6 Méthode de travail:	48
II .7 Les essais réalisés sur le béton:	49
II .8 Essais à l'état frais:	49
II .8.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :	49
II .9 Essais à l'état durci:	50
II .9.1 Essais non-destructifs (Essai Ultrasonique): NF EN 12504-4	50
II .9.2 La résistance à la compression (Essais destructifs):	51
II .9.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité: NF P10-502	52
II .9.4 Essai d'absorption d'eau par immersion: (ASTM C642)	53
II .10 Essai durabilité:	54
II .11 Conclusion:	54
Chapitre III	54
Résultats et discussion	54
III. Introduction :	54
III.1 Résultats et discussion:	54

III.1.1 Béton à l'état frais:	54
III.1.2 Béton à l'état durci:	55
III.1.2.1 Contrôle non-destructif (auscultation dynamique):	55
III.1.2.2 Essai d'absorption par immersion :	56
III.1.2.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité :	57
III.1.2.4 Essai durabilité:	58
III.2 Conclusion:	60
Conclusion générale	60
Listes de références	62

LISTES DES FIGURES

Chapitre I : Recherche bibliographique

Figure I.1 : Le béton (https://www.linternaute.fr/bricolage/guide-maison-et-jardin/1411621-dosage-beton-queelles-sont-les-bonnes-proportions-a-respecter/)	Error! Bookmark not defined.
Figure I 2 : Procédé de fabrication du ciment.	5
Figure I 3 : schématisation d'un granulat recyclé	8
Figure I 4 : Classification déchets de chantiers (https://tpdemain.com/module/les-dechets-des-travaux-publics/).....	11
Figure I 5 : La gestion des déchets de chantier https://chantiervert.cci.nc/index.php/guide-dechets-btp/	12
Figure I 6 : un granulat recyclé.....	13
Figure I 7 : Granulat de béton de démolition. (https://materiatheque.fr/materiaux/recyclage-beton/)	16
Figure I 8 : Vue en coupe du granulat recyclé (gauche) et du granulat naturel (droite) [Otsuki et al. 2003]..	17
Figure I 9 : absorption des granulats recyclés en fonction de temps	19
Figure I 10 : essai de compression.....	20
Figure I 11 : absorption de béton recyclé.	21
Figure I 12 : Influence du type de cure sur la profondeur de carbonatation des bétons de GBR.	21
Figure I 13 : Influence de la carbonatation sur le béton à base des granulats recyclés.....	22

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

Figure II .1 : Biskria ciment	25
Figure II .2 : Série des tamis	28
Figure II .3 : Courbe granulométrique de graviers Naturel (3/8).	29
Figure II .4 : Courbe granulométrique de Graviers Naturel (8/15).....	30
Figure II .5 : Eprouvettes de bureau d'études économiques et techniques de Batna, unité de Biskra...	30
Figure II .6 : Procédure de préparation des granulats recyclés.	30
Figure II .7 : Concassage et tamisage manuel.	31
Figure II .8 : Courbe granulométrique de graviers recyclés (3/8).	32
Figure II .9 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (8/15) M=3000 g.	33
Figure II .10 : La masse volumique apparente.....	34
Figure II .11 : La masse volumique absolue.	35

Figure II .12 : Essais de l'équivalent de sable.....	38
Figure II .13 : Essai d'analyse granulométrique de sable.....	39
Figure II .14 : La courbe granulométrique du sable.	40
Figure II .15 : Essai de la masse volumique apparente de sable.	41
Figure II .16 : Essai de la masse volumique absolue de sable.	42
Figure II .17 : L'eau.....	42
Figure II .18 : Malaxage du béton.	46
Figure II .19 : Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.	47
Figure II .20 : Essai d'affaissement du béton.....	49
Figure II .21 : Essai d'ultrason.	50
Figure II .22 : Essai de compression uni axial.	51
Figure II .23 : Essai d'absorption capillaire.	52
Figure II .24 : les échantillons exposés à l'eau de mer.	53

Chapitre III : Résultats et discussion

Figure III.1 : affaissement au cône d'abrams.....	54
Figure III.2 : Résultat des contrôles non destructifs (auscultation dynamique)	55
Figure III.3 : Absorption par immersion (%) en fonction de type du béton.....	56
Figure III.4 : L'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.	57
Figure III.5 : Influence du milieu de conservation sur la résistance à la compression	58

Liste des Tableaux

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau I.1 : La teneur des constituants du béton en poids et en volume (%).....	Error! Bookmark not defined.
Tableau I.2 : Classes granulaires principales. (NF P18-540).....	4
Tableau I.3 : Composition chimique principale d'un clinker Portland. (Dreux, 1998).....	5
Tableau I.4 : Composition minéralogique du ciment. (Zhang, 2013).....	6
Tableau I.5 : Composition des ciments courants référence.....	6
Tableau I.6 : Les productions de recyclage.....	10
Tableau I.7 : Explicatif des désignations des bétons avec granulats recyclés.....	22

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

Tableau II .1 : Caractéristiques chimiques du ciment.....	26
Tableau II .2 : Caractéristiques physiques du ciment.....	27
Tableau II .3 : Caractéristiques mécaniques du ciment.....	27
Tableau II .4 : Analyse granulométrique des granulats Naturels (3/8) M=2000 g.....	28
Tableau II .5 : Analyse Granulométrique du Gravier Naturel (8-15) M=3000g.....	29
Tableau II .6 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) M=2000g.....	31
Tableau II .7 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (8/15) M=3000 g.....	32
Tableau II .8 : La masse volumique apparente (ρ app) du gravier naturel (3/8), (8/15).....	34
Tableau II .9 : La masse volumique apparente (ρ app) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....	Error! Bookmark not defined. 4
Tableau II .10 : La masse volumique absolue (ρ abs) du gravier naturel (3/8), (8/15).....	36
Tableau II .11 : La masse volumique absolue (ρ abs) du gravier recyclé (3/8), (8/15).....	Error! Bookmark not defined. 6
Tableau II .12 : Résultats d'essais d'équivalent de sable naturel 0/5.....	Error! Bookmark not defined. 8
Tableau II .13 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable.....	Error! Bookmark not defined. 8
Tableau II .14 : Analyse granulométrique du sable naturel (0/5).....	Error! Bookmark not defined. 0

Tableau II .15 : Module de finesse du sable.....	Error! Bookmark not defined.1
Tableau II .16 : La masse volumique apparente de sable naturel.....	Error! Bookmark not defined.1
Tableau II .17 : La masse volumique absolue de sable naturel.....	Error! Bookmark not defined.2
Tableau II .18 : La composition chimique de l'eau de mer.....	Error! Bookmark not defined.3
Tableau II .19 : Les valeurs de coefficient granulaire (G).....	Error! Bookmark not defined.4
Tableau II .20 : Composition du béton.....	Error! Bookmark not defined.5
Tableau II .21 : Composition du béton.....	Error! Bookmark not defined.5

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CEM I : Ciment Portland

CEM II : ciment Portland au Calcaire

CEM III : ciment de haut fourneau

CEM IV : Ciment pouzzolanique

CEM V : Ciment composé

d : dimension inférieure du granulat

D : dimension supérieure du granulat.

K : Clinker

S : Laitier de haut fourneau

D : Fumée de silice

P : Pouzzolanes naturelles

Q : Pouzzolanes naturelles calcinées

V : Cendres volantes siliceuses

W : Cendres volantes calciques

T : Schiste calcinée

L et LL : Calcaire

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur du bâtiment a connu un développement remarquable au cours des dernières décennies, le béton étant devenu le matériau de construction le plus utilisé, en raison de la disponibilité locale de ses composants, de sa facilité de mise en œuvre, de sa résistance et de son coût abordable. Cependant, cette expansion rapide a entraîné une surexploitation des ressources naturelles, notamment les granulats extraits des carrières, avec des conséquences environnementales négatives telles que la dégradation des sols, la pollution des eaux et l'augmentation des émissions de CO₂ liées aux activités d'extraction et de transport.

Parallèlement, les opérations de démolition et de réhabilitation génèrent une quantité croissante de déchets de construction, posant un défi environnemental majeur quant à leur gestion. C'est dans ce contexte que s'inscrit la valorisation des déchets inertes, notamment par le recyclage du béton démolé en tant que substitut partiel ou total aux granulats naturels dans le béton, une solution à la fois écologique et économique.

Cependant, malgré les avantages environnementaux potentiels, plusieurs interrogations subsistent quant à l'impact du granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques du béton, notamment en ce qui concerne sa durabilité, surtout lorsqu'il est exposé à des environnements agressifs comme l'eau de mer. En effet, la porosité élevée et la forte capacité d'absorption de ces granulats peuvent compromettre les performances à long terme du matériau.

Dans ce cadre, le présent travail vise à évaluer les performances du béton contenant des granulats recyclés, à travers des essais d'absorption et de résistance à la compression, aussi bien dans des conditions normales que dans un milieu marin agressif. Une attention particulière est également accordée à l'effet de la saturation préalable des granulats recyclés, comme méthode d'amélioration de la durabilité du béton.

Problématique :

Le recyclage des déchets de construction représente aujourd'hui une pratique durable prometteuse, contribuant à la préservation des ressources naturelles et à la réduction de la pollution. Toutefois, l'intégration des granulats recyclés dans le béton soulève des préoccupations concernant leur influence sur les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau, en particulier dans des milieux agressifs tels que l'eau de mer.

D'où la problématique suivante :

Peut-on utiliser les granulats recyclés comme substitut viable aux granulats naturels dans le béton, sans compromettre ses performances mécaniques et sa durabilité, notamment en environnement marin ?

Objectif :

Cette étude vise à :

- Évaluer l'effet de la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.
- Étudier le comportement du béton dans un environnement agressif (eau de mer), en se basant sur des essais d'absorption et de résistance à la compression.
- Analyser l'efficacité de la technique de saturation préalable des granulats recyclés comme solution d'amélioration des performances du béton.
- Promouvoir les pratiques de construction durable en valorisant les déchets inertes dans le domaine du génie civil.

Structure du mémoire :

Pour atteindre les objectifs fixés, ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Chapitre 1 :** Présente un cadre théorique incluant des généralités sur le béton, les types de granulats, les approches de durabilité, ainsi qu'une revue des travaux antérieurs relatifs à l'utilisation des granulats recyclés et leur comportement en milieux agressifs.
- **Chapitre 2 :** Décrit la démarche expérimentale : les matériaux utilisés (granulats naturels, recyclés, eau...), les dosages, la confection des éprouvettes et les méthodes d'essai appliquées.
- **Chapitre 3 :** Expose les résultats expérimentaux, les analyse et les compare entre les différentes formulations, en mettant l'accent sur l'effet des paramètres étudiés (taux de substitution, saturation, environnement marin) sur les performances du béton. Ce chapitre est suivi d'une conclusion générale accompagnée de recommandations.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I. Introduction :

L'utilisation des granulats recyclés dans le béton est une solution durable visant à réduire l'empreinte environnementale de l'industrie de la construction. Dans ce chapitre, nous passerons en revue les principales recherches menées sur la durabilité du béton à base de granulats recyclés, en mettant en évidence les avancées, les défis et les performances de ces matériaux.



Figure I.1 : Le béton (<https://www.linternaute.fr/bricolage/guide-maison-et-jardin/1411621-dosage-beton-queelles-sont-les-bonnes-proportions-a-respecter/>)

I.1 Généralité sur béton :

Le béton est un matériau de construction polyvalent capable de performances remarquables dans divers ouvrages. Sa composition comprend plusieurs constituants normalisés : ciments, granulats, sable, eau, additions, et adjuvants (Baron & Ollivier, 1996) [1]. La formulation du béton est cruciale pour obtenir les propriétés désirées, notamment la consistance, la résistance et la durabilité (Baron & Ollivier, 1996) [1]. La fabrication du béton est la première étape irréversible de la construction et conditionne toutes ses propriétés futures.

Les bétons sont composés à 75% de leurs volumes de granulats, il n'est pas donc étonnant que les performances des bétons dépendent des propriétés des granulats qui les composent.

Tableau I.1 : La teneur des constituants du béton en poids et en volume (%) [2]

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (%)	5-9	-	9-18	63-85

I.1.1 Les granulats :

I.1.1.1 Définition :

Les granulats, essentiels au génie civil, peuvent être d'origine naturelle, artificielle ou recyclée. Leurs propriétés dépendent de la roche dont ils sont issus, qu'elle soit magmatique, sédimentaire ou métamorphique. La production de granulats implique l'extraction, le transport et le traitement, avec une attention particulière à la protection de l'environnement et à la qualité, leurs dimensions sont comprises entre 0mm et 125mm (Dupont et al. 2007) [3].

I.1.1.2 Classe des granulats :

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple d/D ou 0/D avec :

Tableau I.2 : Classes granulaires principales. (NF P18-540) [44]

Familles	Dimensions	Caractéristique
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 70% de passant à 0.063 mm
Sables	0/D	$1 < D \leq 6.3$ mm
Graves	0/D	$D > 6.3$ mm
Gravillons	d/D	$D \geq 1$ et $D \leq 125$ mm
Ballasts	d/D	$D \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm

I.1.1.3 Les différents types de granulats :

- a. **Les granulats naturels :** Les granulats naturels constituent des matériaux de base d'origine minéralogique, largement utilisés dans la fabrication du béton. Ils sont généralement extraits de divers types de roches, notamment des roches sédimentaires à caractère siliceux ou calcaire, des roches métamorphiques telles que les quartzites, ainsi que des roches ignées comme les basaltes et les granites (Maillot, 2001) [4].

- b. Les granulats artificiels :** Les granulats artificiels sont issus de transformations thermiques appliquées à des roches, des minerais ou à des sous-produits industriels ayant subi un traitement spécifique. Ils représentent une alternative intéressante dans divers usages, notamment dans le secteur du bâtiment, grâce à leurs propriétés techniques particulières.
- c. Les Granulats recyclés :** Les granulats recyclés sont issus du traitement des matériaux inorganiques ayant déjà été utilisés dans des ouvrages de construction. Ils représentent une alternative durable qui contribue à la préservation des ressources naturelles, tout en s'inscrivant dans une démarche écoresponsable adoptée de plus en plus dans le secteur du bâtiment (de Brito & Saikia, 2012) [5].

I.1.2 Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, obtenu par la cuisson à haute température (environ 1450°C) d'un mélange homogène d'argile et de calcaire, accompagné parfois d'autres matériaux complémentaires tels que la silice, l'alumine et l'oxyde de fer (Croyère, 1983) [6]. Ce processus produit un matériau appelé clinker, qui constitue la base de la majorité des ciments, notamment le ciment Portland, largement utilisé dans le domaine de la construction pour ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Une fois broyé et mélangé à du gypse et éventuellement à des ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...), le ciment acquiert ses caractéristiques finales qui influencent sa résistance et sa performance.

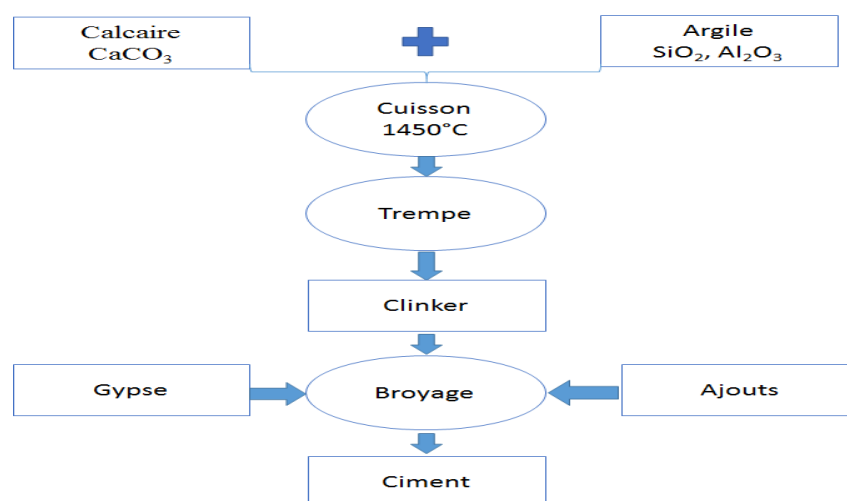


Figure I 2 : Procédé de fabrication du ciment. (Chakri, 2015) [7]

Tableau I.3 : Composition chimique principale d'un clinker Portland. (Dreux, 1998) [8]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
60 à 69 %	18 à 24 %	4 à 8 %	1 à 8 %	< 5%

Tableau I.4 : Composition minéralogique du ciment. (Zhang, 2013) [9]

Composés	Composition	Appellation abrégée	Taux
Silicate tricalcique	3CaO. SiO ₂	C ₃ S	37%-60%
Silicate bicalcique	2CaO. SiO ₂	C ₂ S	15% -37%
Aluminate tricalcique	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A	07%-15%
Aluminoferrite tétracalcique	4CaO. Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	10%-18%

I.1.2.1 Types du ciment :

On distingue cinq types de ciment répondant aux normes « CEM », conformément à la réglementation européenne EN 197-1. [45] Cette classification regroupe des ciments composés de divers constituants, dont la répartition est contrôlée afin d'assurer une composition homogène sur le plan statistique.

Tableau I.5 : Composition des ciments courants référence. [45]

Type du ciment	NB du ciment	Clinker k %	Autres constituants principaux %	Constituants secondaires %
CEM I	1	95 à 100	0	0 à 5
CEM II	19	65 à 94	6 à 35 S/D/P/Q/V/W/T/L/LL	0 à 5
CEM III	3	5 à 64	Laitier : 36 à 95	0 à 5
CEM IV	2	45 à 89	D/P/Q/V/W : 11 à 55	0 à 5
CEM V	2	20 à 64	S/P/Q/V : 28 à 80	0 à 5

I.1.3 Adjuvants :

Les adjuvants chimiques sont ajoutés au béton en petites quantités (moins de 5 % du poids du ciment), dans le but d'améliorer ses propriétés à différents stades : À l'état frais, pendant la

prise et le durcissement, ou après durcissement (NF EN 934-2).[46]

Ces adjuvants sont classés en trois catégories principales :

- Ceux qui améliorent l'ouvrabilité, tels que les plastifiants et les réducteurs d'eau.
- Ceux qui agissent sur le temps de prise et de durcissement, comme les accélérateurs et les retardateurs.
- Et ceux qui confèrent des propriétés spécifiques, comme l'entraînement d'air ou l'hydrofugation.

I.1.4 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage joue un rôle essentiel dans l'hydratation du ciment et l'adhérence des composants du béton, tout en améliorant sa maniabilité. La qualité de cette eau influence directement la résistance et la durabilité du béton, car les impuretés telles que les sels ou les matières organiques peuvent altérer ses performances à long terme. Un excès d'eau augmente la porosité et diminue la résistance mécanique. Il est donc indispensable d'utiliser une eau propre et de respecter un dosage précis, conformément aux normes telles que la NF EN 1008, [47] pour garantir la qualité du béton.

I.2 Granulats recyclés issus des déchets de la démolition et de la construction :

Les granulats recyclés (GR), issus des déchets de la démolition et de la construction, sont constitués du granulat d'origine ainsi que du mortier résiduel qui y adhère. Cette composition en deux phases – granulat naturel et mortier attaché – influence directement les propriétés des granulats recyclés et du béton fabriqué à partir de ces matériaux (Fathifazl et al. 2009) [10].

La teneur en mortier résiduel est un facteur clé permettant d'évaluer la qualité des granulats recyclés, car elle affecte leur porosité, leur absorption d'eau et leur comportement mécanique (Etxeberria et al. 2007) [11].

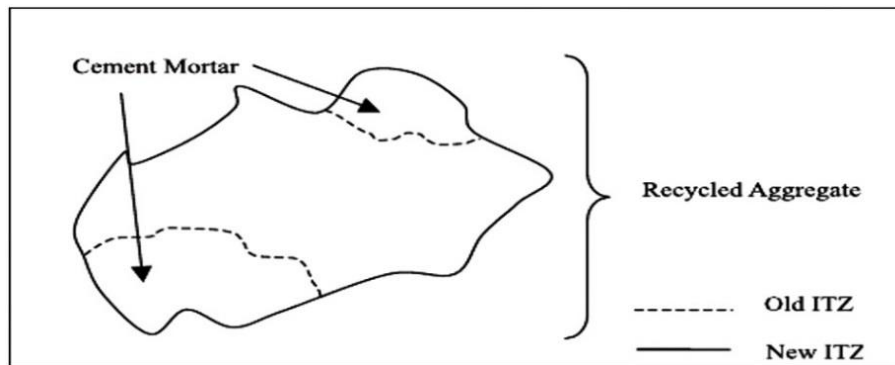


Figure I 3 : schématisation d'un granulat recyclé. [12]

I.2.1 Historique :

L'histoire de la gestion des déchets montre une évolution progressive du rapport de l'homme à son environnement et à la santé publique. À l'époque nomade, les déchets se décomposaient naturellement. Avec la sédentarisation dans l'Antiquité et la croissance des villes au Moyen Âge, les déchets deviennent un problème majeur, accentué par le manque de conscience des risques sanitaires. Malgré des tentatives royales d'assainissement, les villes restent insalubres jusqu'au règne de Louis XIV, où apparaissent les premières réformes, bien qu'elles restent superficielles.

Le XVIIIe siècle introduit l'hygiénisme, en réponse à l'augmentation des déchets, et le XIXe siècle marque un tournant avec des changements durables dans la collecte et le traitement des ordures. Par ailleurs, le recyclage existait déjà au Moyen Âge, notamment pour des matériaux comme le verre et les métaux, révélant une conscience ancienne de la réutilisation des ressources. (Leclercy, 2002) [13]

I.2.2 Déchets de chantier :

La quantité totale annuelle de déchets générée en France est estimée à environ 328,2 millions de tonnes, réparties entre plusieurs sources : les collectivités locales en produisent environ 3,8 millions de tonnes, tandis que les ménages génèrent 30,6 millions de tonnes. Les activités économiques contribuent à hauteur de 67,5 millions de tonnes. Le secteur du bâtiment est responsable de 46,0 millions de tonnes, et les travaux publics constituent la part la plus importante avec 185,3 millions de tonnes.

Lorsqu'un particulier entreprend lui-même des travaux de construction ou de rénovation, il est tenu de gérer les déchets issus de son chantier. En revanche, si les travaux sont réalisés par une entreprise, la responsabilité de la gestion des déchets incombe à cette dernière.

La législation en vigueur stipule que le producteur de déchets de chantier est légalement responsable de leur collecte, de leur stockage et de leur traitement jusqu'à leur valorisation finale. En cas de recours à un tiers pour assurer ces opérations, il est impératif de s'assurer que celui-ci respecte la réglementation applicable et détient les autorisations administratives requises, notamment lorsqu'il s'agit de déchets classés comme dangereux. (Florio et al. 2006) [14]

I.2.3 Classification des déchets de chantier :

Les déchets de chantier se divisent en trois catégories principales :

1. Déchets inertes : ne réagissent pas avec l'environnement et ne présentent pas de danger.
2. Déchets non dangereux non inertes (DIB) : biodégradables, sans substances dangereuses.
3. Déchets dangereux : contiennent des éléments nocifs nécessitant un traitement spécifique.

I.2.4 Les déchets inertes :

Les déchets inertes, qui ne subissent ni décomposition biologique ni réaction chimique ou physique au fil du temps, représentent environ 76 % des déchets produits par le secteur de la construction (ADEME), [15]. Ils comprennent principalement le béton, les tuiles, les gravats, le sable, les terres et cailloux non pollués, ainsi que le verre, matériau recyclable dans de nombreux domaines.

Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), dont la demande annuelle en matériaux granulaires atteint 440 millions de tonnes, génère parallèlement près de 247 millions de tonnes de déchets issus de la démolition, dont 90 % sont inertes. Une part importante de ces matériaux est valorisée, soit par réemploi sur site, soit par traitement dans des installations spécialisées, contribuant ainsi à couvrir jusqu'à 25 % des besoins en matières premières du secteur. Les agrégats issus du fraisage des chaussées représentent à eux seuls 90 % des granulats recyclés, dont 99 % sont réutilisés dans les infrastructures routières. Cette valorisation des

déchets inertes joue donc un rôle essentiel dans la production de matériaux secondaires et favorise une approche plus durable de la construction (Mongear, 2017) [16].

Tableau I.6 : Les productions de recyclage. [17]

Type de matériaux	Norme	Installation
Matériau de pré-criblage	NF P11-300	Toute installation avec scalpage avant concassage
Grave non calibrée		Concassage primaire sans criblage
Grave 0/D	XP P 18-540 et NF P11-300 ou NF P 98-129	Concassage primaire ou secondaire avec criblage
Sable	XP 18-540	Concassage primaire ou Second extraire avec criblage
Gravillons et Cailloux	XP 18-540	

I.2.5 Les déchets non dangereux non inertes :

Les déchets non dangereux non inertes, comme leur appellation l'indique, ne sont ni stables chimiquement comme les déchets inertes, ni dangereux pour la santé ou l'environnement. Ils ne présentent pas de risques d'explosion, ne sont pas inflammables ni corrosifs. Également appelés **déchets industriels banals (DIB)**, ils représentent environ **21 %** de l'ensemble des déchets générés sur les chantiers.

Dans un souci d'identification plus efficace, la **Fédération Française du Bâtiment (FFB)** a mis en place un système de **vingt pictogrammes** destinés à faciliter le tri et la reconnaissance de ces matériaux. [18]

Parmi les principaux types de déchets appartenant à cette catégorie, on peut citer :

- **Le bois ;**
- **Le plastique ;**
- **Les métaux ;**

- Les déchets verts ;
- Les isolants.

I.2.6 Les déchets dangereux :

La catégorie des déchets dangereux regroupe l'ensemble des matériaux qui présentent un risque pour la santé humaine ou l'environnement. Bien que leur volume soit relativement faible (environ 3 % des déchets totaux générés par le bâtiment), leur gestion nécessite une attention particulière afin de prévenir toute contamination due aux substances toxiques qu'ils contiennent. (Denoiseux, 2010) [19]

Parmi les principaux types de déchets dangereux, on retrouve :

- La terre et l'eau polluées ;
- Les emballages souillés ;
- Les huiles ;
- Les solvants ;
- Les lampes ;
- Les piles et accumulateurs ;
- L'amiante (qui nécessite des précautions particulières en raison de sa dangerosité accrue).

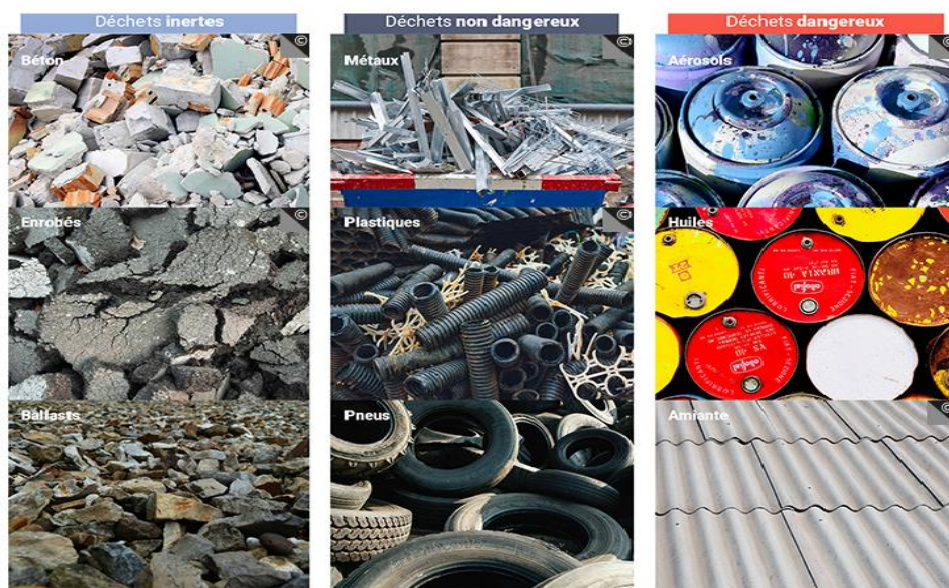


Figure I 4 : Classification déchets de chantiers (<https://tpdemain.com/module/les-dechets-des-travaux-publics/>).

I.2.7 Gestion des déchets de chantier :

La gestion et la valorisation des déchets produits sur les chantiers ne représentent pas uniquement un défi environnemental de premier ordre, mais constituent également une obligation essentielle incombant aux acteurs du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP).

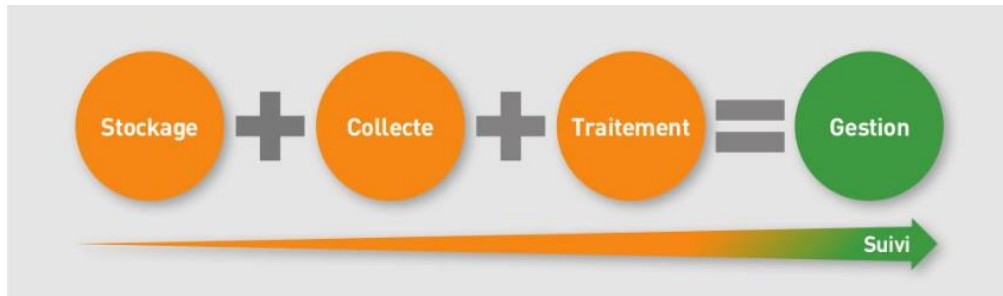


Figure I 5 : La gestion des déchets de chantier [20]

I.2.9 Traitement (recyclage) :

Le recyclage constitue un processus de traitement appliqué aux déchets, qu'ils proviennent des activités industrielles ou domestiques, et qui ont atteint la fin de leur cycle de vie. Ce procédé vise à réintégrer certains matériaux issus de ces déchets dans la fabrication de nouveaux produits. Parmi les matériaux couramment recyclables, on trouve notamment les métaux, certains plastiques, le carton, le verre, ainsi que les gravats issus du secteur du bâtiment. (Messin, 1997) [20]

I.3 Granulat recyclé :

La valorisation des déchets de démolition peut être optimisée grâce à l'adoption d'une démarche de déconstruction sélective, d'autant plus que la grande majorité des déchets issus du secteur du bâtiment estimée à 97 % sont des déchets inertes, pouvant être réutilisés pour le remblaiement ou comme couches de base dans les infrastructures routières.

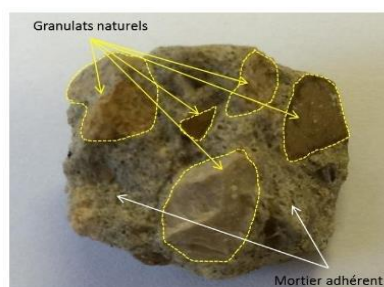


Figure I 6 : un granulat recyclé. [21]

Les granulats de béton recyclé sont issus du traitement de déchets de béton, généralement provenant de structures démolies. Ils représentent un sous-produit direct des opérations de déconstruction des bâtiments en béton. Ces granulats recyclés se composent des matériaux d'origine, incluant la pâte de ciment hydratée.

Le béton démolí subit d'abord un nettoyage visant à éliminer les impuretés et particules détachées, avant d'être concassé en fragments de dimensions réduites. Ce processus permet d'obtenir des granulats recyclés disponibles dans des tailles variantes généralement entre 20 mm et 50mm. (M. Quebaud, 1996) [21]

I.3.1 Utilisation Des Granulat Recyclés :

Les granulats recyclés sont largement utilisés dans le secteur du bâtiment, avec une consommation annuelle estimée à environ 453 millions de tonnes. (GSM Granulats, 2019) [22] Ces matériaux sont répartis selon plusieurs domaines d'application :

- Travaux routiers et infrastructures : environ 290 Mt sont utilisées pour la construction et la stabilisation des ouvrages.
- Béton prêt à l'emploi : près de 78 Mt sont intégrées dans les centrales à béton.
- Enrobés : environ 36 Mt servent à la fabrication des couches de roulement des routes.
- Béton de chantier et mortiers industriels : 29 Mt sont utilisées directement sur les chantiers.
- Produits en béton préfabriqués : 18 Mt sont destinées à la fabrication d'éléments comme les blocs ou tuyaux.
- Ballast pour les voies ferrées : 2 Mt sont employées pour le soutien des rails.

I.3.2 Les avantage de l'emploi des granulats recyclés :

Le recyclage des granulats sur les chantiers routiers ainsi que la réutilisation des matériaux in situ dans les opérations de démolition des bâtiments constituent une pratique efficace aux retombées environnementales et économiques significatives. (Kunwufine, 2015) [23] Parmi les principaux avantages figurent :

- La préservation des ressources naturelles, en réduisant la dépendance aux matériaux vierges ;

- La diminution des besoins en transport, ce qui entraîne une réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre ;
- L'accélération de la mise en œuvre des travaux, limitant ainsi les nuisances pour les riverains ;
- La réduction des volumes de déchets envoyés en décharge, contribuant ainsi à une meilleure gestion des déchets de construction.

I.3.3 Les inconvénients de l'emploi des granulats recyclés :

Malgré les avantages environnementaux associés à la réutilisation des granulats recyclés dans le béton, leur utilisation présente plusieurs inconvénients techniques qui affectent la qualité du mélange et sa durabilité (El Beze. 2008) [24], parmi lesquels :

- Taux d'absorption d'eau élevé en raison de la porosité importante.
- Résistance à la compression réduite en raison d'une faible adhérence.
- Hétérogénéité des propriétés due à la diversité des sources des granulats.
- Sensibilité accrue à la dégradation par carbonatation ou cycles gel/dégel.
- Augmentation du retrait et du fluage, ce qui augmente le risque de fissuration.

I.3.4 Préparation des granulats recyclés :

Les granulats de béton recyclé sont issus du traitement de déchets de béton, généralement provenant de structures démolies. Ils représentent un sous-produit direct des opérations de déconstruction des bâtiments en béton. Ces granulats recyclés se composent des matériaux d'origine, incluant la pâte de ciment hydratée.

Le béton démoli subit d'abord un nettoyage visant à éliminer les impuretés et particules détachées, avant d'être concassé en fragments de dimensions réduites. Ce processus permet d'obtenir des granulats recyclés disponibles dans des tailles variantes généralement entre 20 mm et 50mm.

I.3.5 Traitement des granulats recyclés :

L'augmentation continue du volume des déchets et leurs effets néfastes sur l'environnement constituent aujourd'hui l'un des défis majeurs des politiques environnementales et des efforts visant à améliorer la qualité de vie. Plusieurs spécialistes, dont M. Ruffy (1993) [25], soulignent que le maintien de nos modes de vie actuels, sans révision

profonde, expose l'environnement à un risque de dégradation sévère et irréversible lié à la mauvaise gestion des déchets.

I.3.7 Les classes principales des granulats recyclés :

Les granulats peuvent être classés, en fonction de leur nature et de leur origine, en trois catégories principales largement utilisées dans le secteur de la construction : les granulats naturels, artificiels et recyclés.

Les granulats naturels sont d'origine minérale et proviennent soit de dépôts meubles tels que les alluvions fluviales ou marines, soit de roches massives comme les roches éruptives, calcaires ou métamorphiques. Ces granulats ne subissent que des transformations mécaniques telles que le concassage, le broyage, le criblage ou le lavage.

Les granulats artificiels, également d'origine minérale, résultent de procédés industriels incluant généralement des transformations thermiques. Ils englobent notamment des sous-produits industriels ou des granulats réfractaires.

Quant aux granulats recyclés, ils sont obtenus à partir de matériaux inorganiques ayant déjà été utilisés dans la construction, comme les bétons issus de la démolition de bâtiments ou d'infrastructures routières. Ces granulats sont classés selon leur composition, leur capacité d'absorption d'eau et leur résistance mécanique, ce qui permet d'évaluer leur adéquation à divers usages dans le domaine du bâtiment. (Tourenq & Denis, 1982) [26]



Figure I 7 : Granulat de béton de démolition. [26]

I.3.8 Norme relative aux granulats recyclés : NF EN 12620 [48]

Les granulats recyclés sont issus du traitement de matériaux inorganiques ayant déjà été utilisés dans des ouvrages de construction. Lorsqu'un granulat naturel est mélangé à un granulat

recyclé, le matériau obtenu est considéré comme un granulat recyclé, sauf s'il répond aux critères spécifiques définissant les granulats dits « de pré mélange ». Il convient de noter que, selon les prescriptions en vigueur, un béton contenant moins de 1 % de granulats recyclés est classé comme un béton à base de granulats naturels.

I.3.9 Propriétés des granulats recyclés en relation avec le béton :

Les granulats constituent une composante essentielle dans la formulation du béton, et leur performance dépend directement de certaines exigences de qualité et de constance. Ces exigences sont influencées à la fois par la nature géologique de la roche source qui conditionne la résistance aux chocs, à l'usure ainsi que les propriétés physico-chimiques et par des caractéristiques physiques découlant du processus de production, telles que la forme, la taille et la propreté des grains.

De manière générale, les propriétés des granulats se répartissent en deux grandes catégories :

- Caractéristiques intrinsèques, qui sont liées à la composition minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, incluant notamment :
 - ❖ la masse volumique réelle,
 - ❖ l'absorption d'eau et la porosité,
 - ❖ la résistance au gel et à la gélivité,
 - ❖ la résistance à la fragmentation et au polissage.
- Caractéristiques de fabrication, qui dépendent des techniques d'extraction et de traitement, telles que :
 - ❖ la granulométrie,
 - ❖ la forme des particules (taux d'aplatissement),
 - ❖ la propreté des sables utilisés.

Ces propriétés varient selon la catégorie de granulats (graviers, sables, fines, fillers), et font l'objet de méthodes d'essai spécifiques et normalisées afin d'en assurer la conformité aux exigences de performance du béton.

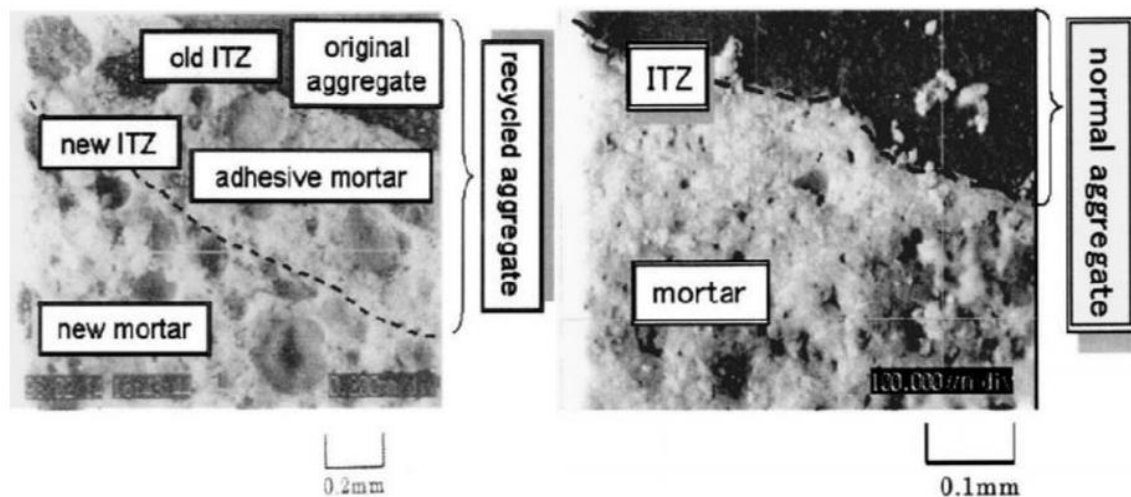


Figure I 8 : Vue en coupe du granulat recyclé (gauche) et du granulat naturel (droite) [Otsuki et al. 2003] [27].

I.3.10 Granulat recyclé fin :

Lors de l'utilisation de granulats recyclés dans la fabrication de béton neuf, il a été démontré que le remplacement partiel des granulats grossiers n'affecte pas de manière significative les propriétés du béton. Toutefois, il n'existe pas de consensus scientifique concernant l'intégration des granulats fins recyclés. Un des principaux arguments avancés par certains chercheurs contre leur utilisation est leur forte absorption d'eau, ce qui pourrait entraîner une diminution des performances du béton à l'état frais. Cependant, certaines études suggèrent que l'incorporation de granulats fins recyclés peut être acceptable, à condition que la quantité utilisée n'entraîne pas une dégradation notable de ses propriétés mécaniques ou de sa durabilité.

I.3.11 Caractéristiques physiques des granulats recyclés :

a. Ouvrabilité :

L'incorporation de granulats recyclés dans le béton affecte son ouvrabilité, en particulier en réduisant l'affaissement par rapport à un béton élaboré avec des granulats naturels, et ce, pour un même rapport eau/ciment. Cette diminution est généralement attribuée au forte capacité d'absorption et à la forme angulaire des granulats recyclés. En conséquence, une demande en eau plus élevée est souvent observée afin de maintenir une ouvrabilité équivalente. De plus, la rugosité accrue de la surface des granulats recyclés contribue également à cette exigence hydrique supplémentaire.

b. La granulométrie et le module de finesse :

En règle générale, les granulats recyclés présentent une distribution granulométrique homogène et continue. Les fines présentes dans ces granulats, principalement composées de ciment ancien, peuvent influencer diverses propriétés du béton, tant à l'état frais qu'à l'état durci. À l'état frais, ces fines affectent des caractéristiques telles que la demande en eau, la maniabilité et les délais de prise. En revanche, dans le béton durci, elles peuvent impacter la résistance et la durabilité du matériau.

c. Masse volumique :

La masse volumique d'un granulat correspond au rapport entre sa masse sèche et le volume qu'il occupe, une caractéristique essentielle influençant ses performances dans les formulations de béton. En général, la masse volumique des granulats recyclés (GR) est inférieure à celle des granulats naturels (GN) en raison de la présence de mortier résiduel, qui possède une porosité plus élevée et une densité plus faible que le granulat d'origine. (Omary et al. 2015) [28]

d. Absorption :

L'absorption d'eau des granulats est une propriété déterminante qui influence la formulation du béton. Les granulats recyclés présentent une absorption nettement plus élevée que les granulats naturels, en raison de leur porosité accrue liée à la présence de mortier résiduel. En général, l'absorption varie entre 1 % et 5 % pour les granulats naturels, contre 3 % à 12 % pour les granulats recyclés, selon leur origine et leur traitement. (Tarn et al. 2008 ; Etxeberria et al. 2007) [29] [11].

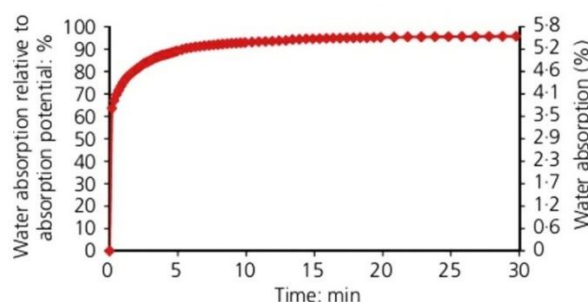


Figure I 9 : absorption des granulats recyclés en fonction de temps. (Bouarroudj, 2019) [30]

e. Résistance à la traction et à la flexion :

Les performances mécaniques en traction et en flexion du béton contenant des granulats recyclés grossiers sont généralement inférieures à celles du béton conventionnel, avec une diminution estimée à environ 10 %, pouvant atteindre jusqu'à 20 % dans certains cas

défavorables. Toutefois, lorsque ces granulats recyclés sont associés à du sable naturel, le béton obtenu présente une résistance à la traction et à la flexion comparable à celle d'un béton à base de granulats entièrement naturels.

f. La résistance à la compression :

La résistance à la compression du béton contenant des granulats recyclés (GR) présente une variabilité plus élevée que celle du béton à granulats naturels (GN), en raison des différences dans la nature et la qualité des matériaux utilisés. L'utilisation à 100 % de GR nécessite souvent un dosage plus important en ciment pour atteindre des performances similaires à celles du béton conventionnel, tant en maniabilité qu'en résistance. (D'Oliveira & Vazquez, 1996) [31]

En général, plus le taux de substitution du GN par du GR augmente, plus la résistance à la compression tend à diminuer. Des études ont montré qu'un remplacement total peut entraîner une baisse d'environ 10 % de la résistance à 28 jours. (Rahal, 2007) [32]

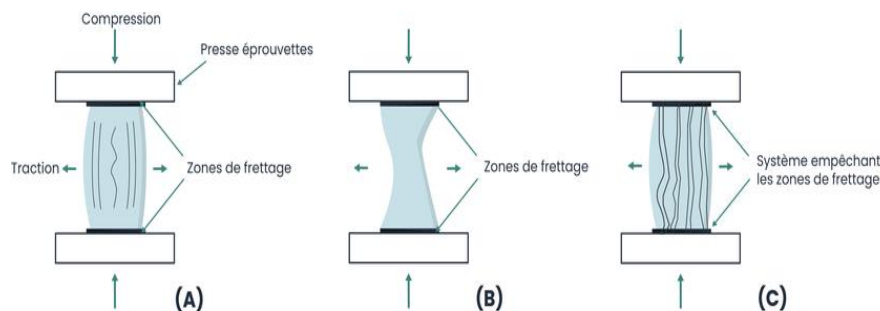


Figure I 10 : essai de compression [32]

I.4 Durabilité du béton à base du granulat recyclé :

La durabilité du béton constitue un aspect fondamental à prendre en compte lors de l'utilisation de granulats recyclés dans la formulation de nouveaux bétons, en complément de ses propriétés mécaniques et physiques. Les caractéristiques liées au transport des fluides et des gaz, telles que la perméabilité et l'absorption, jouent un rôle clé dans la vulnérabilité du matériau face à la dégradation, notamment en ce qui concerne la protection des armatures contre la corrosion.

Dans le cadre de l'approche performance, plusieurs indicateurs sont utilisés pour évaluer la résistance du béton aux conditions environnementales agressives. Parmi ceux-ci, on retrouve la porosité et la perméabilité aux gaz, en particulier à l'oxygène. Des essais spécifiques sont également mis en œuvre pour analyser sa réaction face à la carbonatation accélérée, à la

migration des ions chlorure sous champ électrique, ainsi qu'à la résistance aux cycles de gel et de dégel, avec ou sans sels de déverglaçage.

Les études montrent que les bétons incorporant des granulats recyclés présentent une plus grande sensibilité à certaines pathologies, telles que la carbonatation, la réaction alcali-silice et les dommages liés aux cycles thermiques. Cette diminution des performances est en partie attribuée à la présence de résidus de mortier adhérant aux granulats, dont la résistance est inférieure à celle des granulats naturels, ce qui favorise une perméabilité accrue et expose davantage le matériau aux agents agressifs. (M. S. JUAN & P. A, 2009) [33]

I.4.1 Absorption d'eau des bétons :

La porosité et la distribution de la taille des pores affectent directement les propriétés du béton, notamment la durabilité et la durée de vie. La porosité augmente dans le béton recyclé en raison de la présence de la couche de mortier ancien attachée aux granulats, ce qui entraîne une augmentation de l'absorption d'eau, que ce soit par immersion ou par capillarité. Cette absorption élevée est due à un plus grand nombre de pores fins dans les granulats recyclés. Par conséquent, la perméabilité augmente, ce qui affecte négativement la durabilité du béton et réduit sa capacité à résister aux facteurs environnementaux, affaiblissant ainsi ses performances mécaniques au fil du temps. (Théréne et al. 2020) [34]

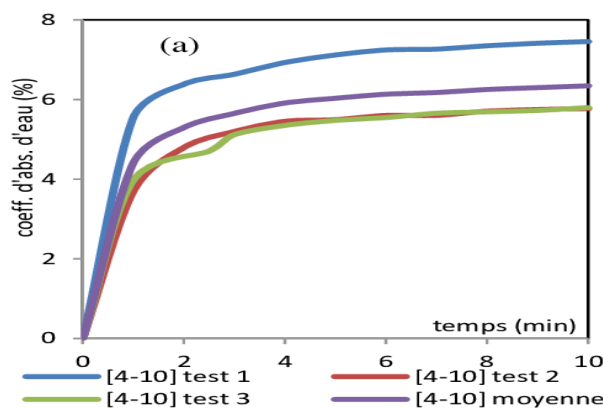


Figure I 11 : absorption de béton recyclé. (Mezreb & Toumi, 2013) [35]

I.4.2 Carbonatation et porosité :

La relation entre la carbonatation et la porosité constitue un facteur clé dans l'évaluation de la durabilité du béton, en particulier lorsqu'il intègre des granulats recyclés (GBR). Les études montrent que la porosité totale ne reflète pas nécessairement de manière fiable le comportement du béton face à la carbonatation. En effet, des bétons présentant des

taux de porosité similaires, comme le C25/30 0S0G à base de granulats naturels et le C45/55 30S30G contenant des GBR, peuvent révéler des profondeurs de carbonatation très différentes selon les conditions de cure (sèche ou humide), ce qui met en évidence les limites de la porosité en tant qu'indicateur unique de la résistance à la corrosion par carbonatation.

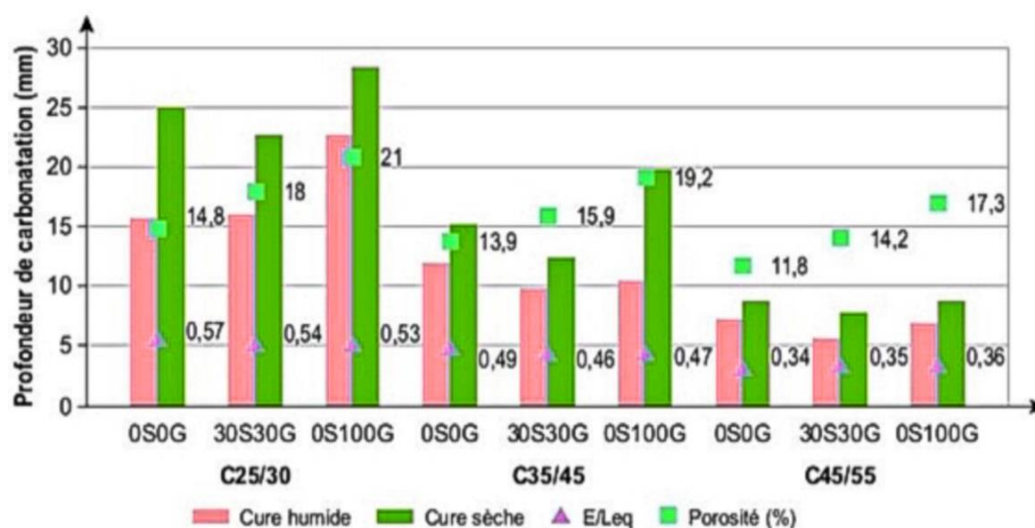


Figure I 12 : Influence du type de cure sur la profondeur de carbonatation des bétons de GBR.[17]

Tableau I.7: Explicatif des désignations des bétons avec granulats recyclés. [17]

Désignation	Résistance à la compression (MPa)	Teneur en sable recyclé (S)	Teneur en gravier recyclé (G)	Description
C25/30 0S0G	25 (cylindrique) / 30 (cubique)	0 %	0 %	Béton composé à 100 % de granulats naturels
C25/30 0S100G	25 / 30	0 %	100 %	Béton avec gravier entièrement recyclé
C25/30 30S30G	25 / 30	30 %	30 %	Béton contenant des proportions moyennes de sable et gravier recyclés
C45/55 30S30G	45 / 55	30 %	30 %	Béton à haute résistance avec matériaux recyclés partiels

La porosité accrue, due au mortier résiduel collé aux GBR, favorise l'avancement de la carbonatation, surtout lorsque le rapport eau/liant de la nouvelle formulation est élevé. Les résultats expérimentaux montrent que le béton C25/30 0S100G présente une profondeur de carbonatation nettement supérieure à celle des bétons C25/30 0S0G ou C25/30 30S30G. L'incorporation de sable issu de béton concassé accentue également la vitesse de ce phénomène. Ces observations sont corroborées par des travaux antérieurs, notamment ceux de (Katz ,2003 et de Pereira et al.2009) [36] [37].

Qui indiquent une susceptibilité légèrement plus élevée à la corrosion dans les bétons recyclés par rapport aux bétons conventionnels.



Figure I 13 : Influence de la carbonatation sur le béton à base des granulats recyclés. [37]

I.4.3 Résistance aux Attaques chimiques :

La résistance des matériaux de construction aux produits chimiques agressifs constitue un facteur essentiel pour garantir la continuité du fonctionnement et la sécurité des installations industrielles, notamment dans les environnements où sont utilisés des composés chimiques puissants tels que l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide chromique (H_2CrO_4) ou encore l'acide fluorhydrique (HF). Dans de telles conditions, la résistance des matériaux à ces agents doit être prise en compte dès la phase de conception des systèmes, en raison des conséquences potentiellement catastrophiques liées à d'éventuelles fuites.

Certaines études ont montré que l'utilisation de granulats recyclés dans le béton peut affecter négativement sa durabilité. En effet, une augmentation de la proportion de ces granulats entraîne une hausse de la perméabilité aux chlorures, à l'oxygène ainsi qu'à l'absorption d'eau. Cette dégradation des propriétés est généralement attribuée à la présence de fissures dans les granulats recyclés, causées par les procédés de traitement, facilitant ainsi la pénétration des fluides et substances chimiques. (Hadjieva-Zaharieva, 1998) [38]

Par ailleurs, d'autres travaux ont mis en évidence que le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés favorise la migration des chlorures au sein du béton, ce qui diminue sa résistance chimique. Toutefois, l'imprégnation de ces granulats avec une solution à base d'alcool polyvinylique permettrait de réduire de manière significative cette migration. (Deodonne, 2015) [23]

En ce qui concerne la résistance aux attaques sulfatiques, les résultats de recherche indiquent que le béton contenant des granulats recyclés présente une résistance comparable, voire légèrement inférieure, à celle du béton fabriqué à partir de granulats traditionnels. (Cao, H. T. et al, 1997) [39]

I.4.4 Résistance aux cycles de gel et dégel :

Les recherches ont montré que le béton contenant des granulats recyclés présente généralement une résistance inférieure aux cycles de gel et de dégel, en comparaison avec le béton conventionnel. Cette vulnérabilité est principalement attribuée à un taux plus élevé de saturation en eau, ce qui augmente le risque de dégradation.

Toutefois, des études récentes ont démontré qu'il est possible d'améliorer cette résistance en incorporant des adjuvants entraîneurs d'air dans le mélange, ce qui permet au béton recyclé d'atteindre une performance comparable à celle du béton à base de granulats naturels. (Mohamed, 2011) [40]

I.5 Conclusion :

Les granulats recyclés (GR) se distinguent par une absorption d'eau plus élevée et une masse volumique plus faible par rapport aux granulats naturels (GN). Ces différences influencent significativement leurs propriétés physiques et mécaniques, ce qui peut impacter la formulation et les performances du béton dans lequel ils sont incorporés.

Par ailleurs, le recours croissant aux technologies innovantes dans le secteur de la construction s'explique principalement par la volonté d'améliorer l'efficacité économique et d'accroître la durabilité des structures, tout en réduisant les coûts de réalisation par rapport aux méthodes de construction traditionnelles.

Chapitre II

Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

II . Introduction :

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour étudier les propriétés physiques et mécaniques des granulats naturels et recyclés utilisés dans la fabrication du béton ordinaire, visant une résistance de 25 MPa après 28 jours de cure. L'étude s'appuie sur une série d'essais en laboratoire incluant l'analyse granulométrique, la détermination de la densité et du taux d'absorption d'eau. Le dosage du béton a été conçu selon la méthode de « Dreux-Gorisse », et les propriétés du béton ont été évaluées à l'état frais (essai d'affaissement) et à l'état durci (essai de compression).

Afin d'analyser l'impact du remplacement du granulat naturel par du granulat recyclé, sept échantillons de béton ont été préparés avec différents taux de substitution (0 %, 50 %, 100 %).

II .1 Matériaux utilisés:

Dans le cadre de cette étude, des matériaux locaux ont été utilisés. Leurs propriétés physiques et mécaniques ont été analysées à travers des essais expérimentaux réalisés au laboratoire de génie civil de l'Université Mohamed Khider – Biskra.

Ces essais ont porté sur la caractérisation des matériaux de base ainsi que sur la préparation des différentes formulations de béton.

II .2 Caractéristique des matériaux:

II .2.1 Le ciment:

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment CPA de classe 42.5 provient de la cimenterie El BISKRIA : wilaya de Biskra.



Figure II .1 : Biskria ciment**II .2.1.1 Caractéristique du ciment CPA-CEM I:**

- **Description :**

Le ciment utilisé est un CPA CEM I 42.5R, un ciment Portland destiné à la production de bétons à hautes performances, offrant une résistance mécanique élevée à court terme. Il est particulièrement recommandé pour les ouvrages nécessitant des délais de décoffrage rapides, ainsi que pour les travaux de bétonnage réalisés par temps froid. Ce ciment est conforme à la norme algérienne NA 442-2013.

- **Domain D'application :**

Le ciment utilisé est adapté à l'ensemble des travaux de construction nécessitant une haute résistance à jeune âge. Il est particulièrement recommandé pour les utilisations suivantes :

- Fabrication de produits en béton nécessitant un durcissement rapide.
- Bétonnage dans des coffrages coulissants, notamment en période hivernale.
- Réalisation de bétons résistants au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Construction de tabliers de ponts.
- Mise en œuvre de béton pompé.
- Application de béton projeté.

II .2.1.2 Caractéristique chimiques du ciment utilisé:**Tableau II .1 : Caractéristiques chimiques du ciment**

Analyses chimiques (%)	Valeur
Perte au feu	6 – 8
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.5 – 2.9
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	> 3.5
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	> 0.08
Composition Potentielle du Clinker (%)	Valeur

C3S	60-65
C3A	6-10

II .2.1.3 Caractéristique physiques et mécaniques du ciment utilisé :

Tableau II .2 : Caractéristiques physiques du ciment

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale (%)	25.4 – 26
Expansion à chaud (mm)	> 1.0
Temps de prise (min)	Valeur
Début de prise	150
Fin de prise	260

Tableau II .3 : Caractéristiques mécaniques du ciment.

Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	23 – 26
28 jours (MPa)	45 - 50

II .3 Caractéristique du Gravier:

Le gravier utilisé pour la fabrication du béton provient d'une carrière, obtenu par concassage de la roche mère. Les fractions granulométriques employées sont de (3/8) mm et (8/15) mm.

a. Analyse granulométrique par tamisage [NA EN 933-1] :

L'analyse granulométrique est un test utilisé pour séparer les matériaux en différentes catégories granulaires à l'aide d'une série de tamis à mailles de taille décroissante, dont le nombre et les dimensions sont déterminés en fonction du type d'échantillon et de la précision souhaitée. Les masses des matériaux passant ou restant sur chaque tamis sont rapportées à la

masse totale de l'échantillon, et les résultats sont présentés sous forme de tableaux ou de graphiques. Ce test est principalement utilisé en génie civil pour analyser la distribution granulométrique des granulats naturels ou artificiels utilisés dans la construction.

1. Grapiers Naturel :

- Préparation de l'échantillon pour l'essai :

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme (NA EN 933-5) [49]

La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en grammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait pendant 07 minutes.



Figure II .2 : Série des tamis

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau II .4 : Analyse granulométrique des granulats Naturels (3/8) M=2000 g.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	0.69	0.69	0.00	99.97
6.3	255.56	256.25	12.81	87.19

5	644.36	900.61	45.03	54.97
3.15	865.17	1765.78	88.28	11.72
2.5	179.49	1945.27	97.263	2.737
1.25	70.27	2010.10	100.5	0
Fond	7.49	2017.59	100.2	0

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique dans la Figure II .3

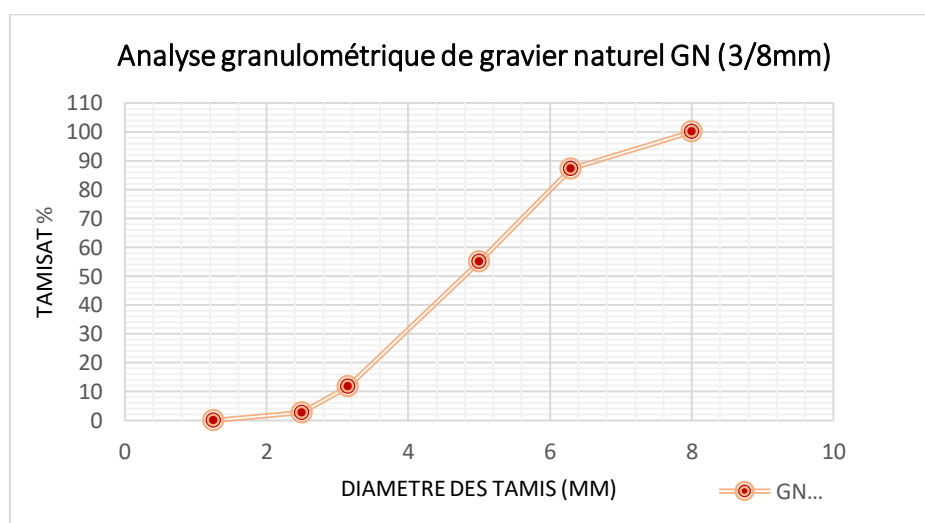


Figure II .3 : Courbe granulométrique de graviers Naturel (3/8).

Les résultats d'analyse de gravier (8/15) sont présentés sur le Tableau II .5

Tableau II .5 : Analyse Granulométrique du Gravier Naturel (8-15) M=3000g.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	68.75	68.75	2.29	97.71
12.5	478.75	547.5	18.25	81.75
10	1092.35	1639.85	54.66	45.34
8	705.2	2345.05	78.16	21.84
6.3	482.19	2827.24	94.24	5.76
5	141.07	2968.31	98.94	1.06

Fond	34.44	3002.75	100.09	0
------	-------	---------	--------	---

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique dans la Figure II .4

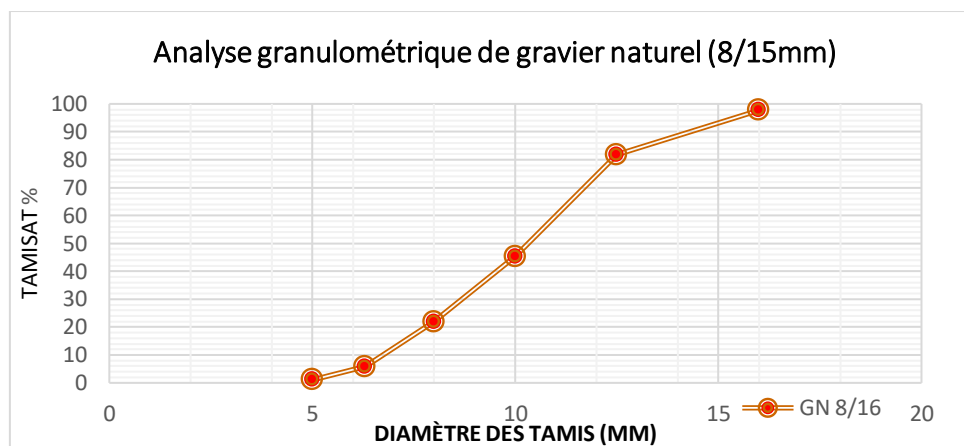


Figure II .4 : Courbe granulométrique de Gravier Naturel (8/15).

2. Gravier Recyclé :

Ce gravier est obtenu par le concassage et tamisage de béton de démolition.



Figure II .5 : Eprouvettes de bureau d'études économiques et techniques de Batna, unité de Biskra.

- Procédure de préparation des granulats recyclés :



Figure II .6 : Procédure de préparation des granulats recyclés.

La Figure II .7 montre le concassage et le tamisage manuel des graviers recyclés.

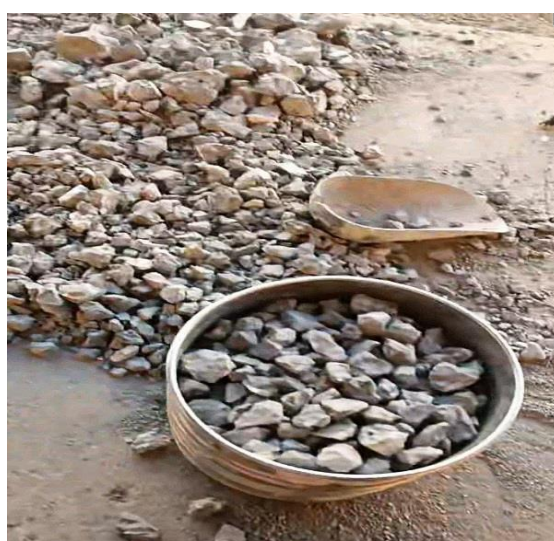


Figure II .7 : Concassage et tamisage manuel.

L'analyse granulométrique de granulat recyclé (3/8) est représentée sur le Tableau II .6

Tableau II .6 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (3/8) M=2000g

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

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique dans la Figure II .8

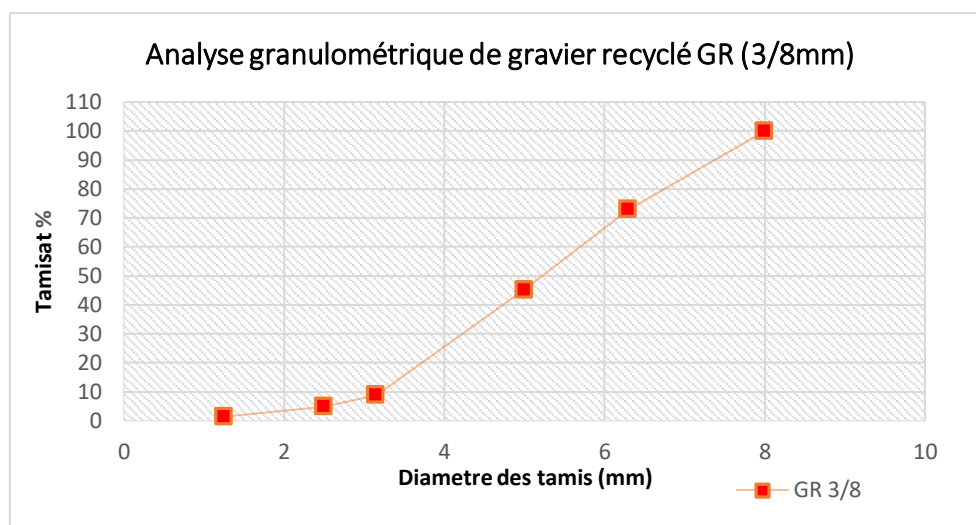


Figure II.8 : Courbe granulométrique de graviers recyclés (3/8).

Les résultats d'analyse granulométrique de gravier recyclé (8/15) ont été présentés dans le Tableau II .7.

Tableau II .7 : 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	-0.25

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique dans la Figure II .9

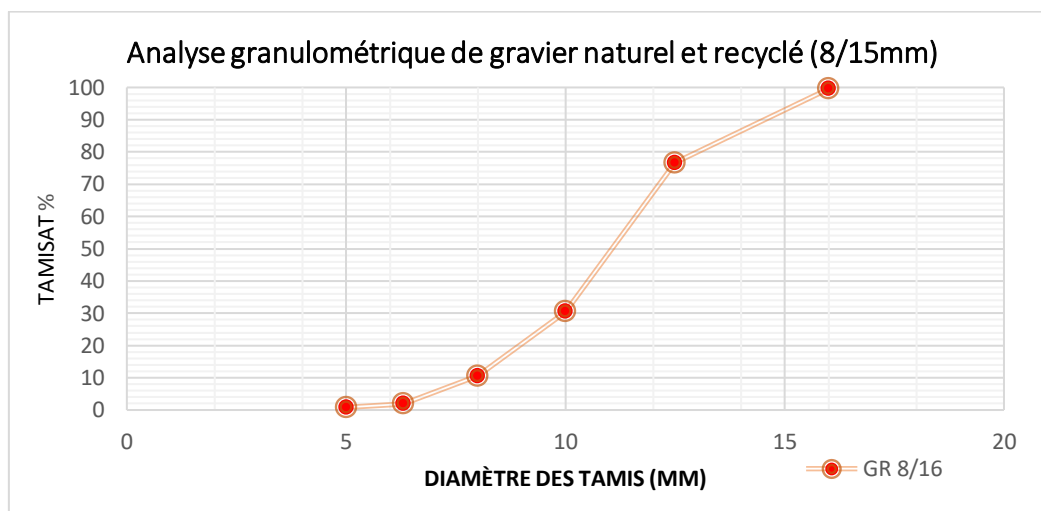


Figure II .9 : L'analyse granulométrique de graviers recyclés (8/15) M=3000 g.

b. La Masse Volumique :

La masse volumique d'un corps correspond à la quantité de masse par unité de volume. Il existe deux types de volumes : le volume apparent et le volume absolu.

1- La Masse Volumique apparente (ρ_{app}) :

C'est la masse d'un matériau rapportée à son volume apparent à l'état naturel, incluant les vides et les capillaires. Elle est exprimée en (g/cm³, kg/L ou t/m³).

L'essai a été effectué conformément à la norme NF P 18-555 [50].

❖ Principe :

Il consiste à remplir un récipient d'une capacité d'un litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau, puis à déterminer la masse du contenu.

La méthode de remplissage du récipient a une influence significative sur les résultats ; il est donc nécessaire de réaliser les essais en utilisant un matériel aussi simple que possible.

❖ Mode opératoire :

- Peser le récipient à vide et noter M1 ;
- Prendre le matériau avec les 2 mains en formant un entonnoir ;
- Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement ;
- Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône ;
- Araser à la règle ;
- Peser le contenu et noter M2.

Il résulte que : $\rho_{app} = \frac{(M2 - M1)}{V}$ (II.1)

M1 : Masse du récipient vide.

M2 : Masse du récipient et gravier.

V : Volume de récipient



Figure II .10 : La masse volumique apparente.

Les résultats obtenus sont classés dans le Tableau II .8 et Tableau II .9.

Tableau II .8 : La masse volumique apparente (ρ_{app}) du gravier naturel (3/8), (8/15).

Matériaux	M1 (g)	V (cm ³)	M2 (g)	ρ_{app} (g/cm ³)
Gravier (3/8)	300	1000	1437.4	1.43
Gravier (8/16)	3612	5000	10360	1.35

Tableau II .9 : La masse volumique apparente (ρ_{app}) du gravier recyclé (3/8), (8/15).

Matériaux	M1 (g)	V (cm ³)	M2 (g)	ρ_{app} (g/cm ³)
Gravier (3/8)	300	1000	1250	0.95
Gravier (8/16)	3612	5000	9612	1.2

2- La Masse Volumique absolue ρ_{abs} :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte des vides et des pores). Elle est exprimée en (t/m³, kg/l, g/cm³).

❖ Principe :

Le volume absolu, ou volume réel, d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume de liquide déplacé lors de l'immersion de ce corps.

Plusieurs méthodes existent pour déterminer les masses et les volumes des matériaux à analyser.

Dans notre étude, nous utiliserons la méthode de l'éprouvette graduée. L'essai a été réalisé conformément à la norme NF P 18-555 [50].

❖ Mode opératoire :

- Placer dans un cylindre en verre gradué avec un volume de V (400 ml) d'eau ;
- Pesez une masse m du corps (300 g) et insérez-la dans un tube gradué ;
- Elimination complète des bulles d'air ;
- Lire les nouvelles graduations ;

La taille absolue ou réelle est : $\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$ (II .2)

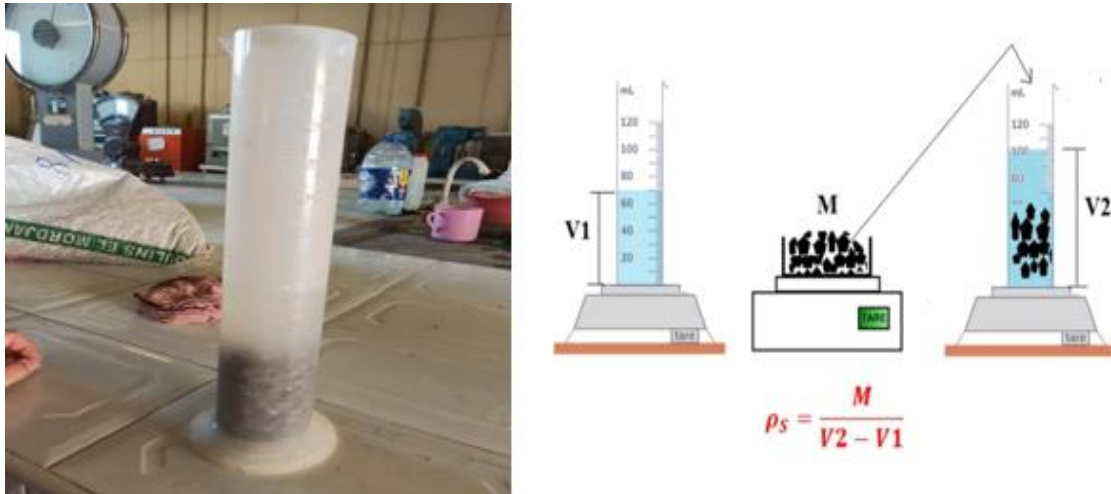


Figure II.11 : La masse volumique absolue.

Les résultats obtenus sont classés dans le Tableau II .10 et Tableau II .11.

Tableau II .10 : La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du gravier naturel (3/8), (8/15).

Matériaux	M (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)
Gravier (3/8)	300	400	515	2.6
Gravier (8/16)	300	400	510	2.72

Tableau II .11 : La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du gravier recyclé (3/8), (8/15).

Matériaux	M (g)	V1 (cm ³)	V2 (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)
Gravier (3/8)	300	400	530	2.3
Gravier (8/16)	300	400	520	2.5

II .4 Sable :

Le sable qu'on a utilisé est sable d'oued Lioua région de Biskra.

II.4.1 Les caractéristiques de sable :

a. Equivalent de sable :

Selon la norme NF P 18-598, [51] un mode opératoire est défini pour cet essai. Cet essai permet de déterminer la proportion d'impuretés argileuses présentes dans le sable, ainsi que le pourcentage de poussières nuisibles et de particules argileuses. Ces éléments altèrent la qualité du béton en provoquant des phénomènes de gonflement et de retrait.

❖ Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (d'une masse supérieure à 500 g) ;
- Prélever un échantillon de 120 g ;
- Remplir l'éprouvette graduée avec la solution de lavage jusqu'au premier repère ;
- À l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de 120 g dans l'éprouvette, puis taper fortement plusieurs fois avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air ;
- Laisser reposer pendant 10 minutes ;
- Fermer l'éprouvette avec un bouchon en caoutchouc, puis effectuer 90 cycles de va-et-vient horizontal de 20 cm en 30 secondes, à la main ou à l'aide de l'agitateur mécanique ;
- Retirer le bouchon, le rincer avec la solution de lavage au-dessus de l'éprouvette, puis rincer également les parois internes ;
- Introduire le tube laveur dans l'éprouvette et le faire rouler lentement entre le pouce et l'index tout en imprimant un léger mouvement de piquage ;
- Cette opération vise à laver le sable et à faire remonter les particules fines et argileuses ;
- Continuer l'opération jusqu'à ce que la solution atteigne le deuxième repère, puis laisser reposer pendant 20 minutes.

❖ Equivalent de sable visuel (E.S.V) :

Après 20 minutes de dépôt du sable, la hauteur h_1 est mesurée à l'aide d'une réglette, depuis le niveau supérieur du floculat jusqu'au fond de l'éprouvette.

De même, on mesure à l'aide de la réglette la hauteur h_2 , correspondant à la distance entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$\text{Esp} = \frac{h_2}{h_1} \times 100\% \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

h_1 : hauteur du sable+ flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

❖ **Equivalent de sable piston (E.S.P) :**

Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée

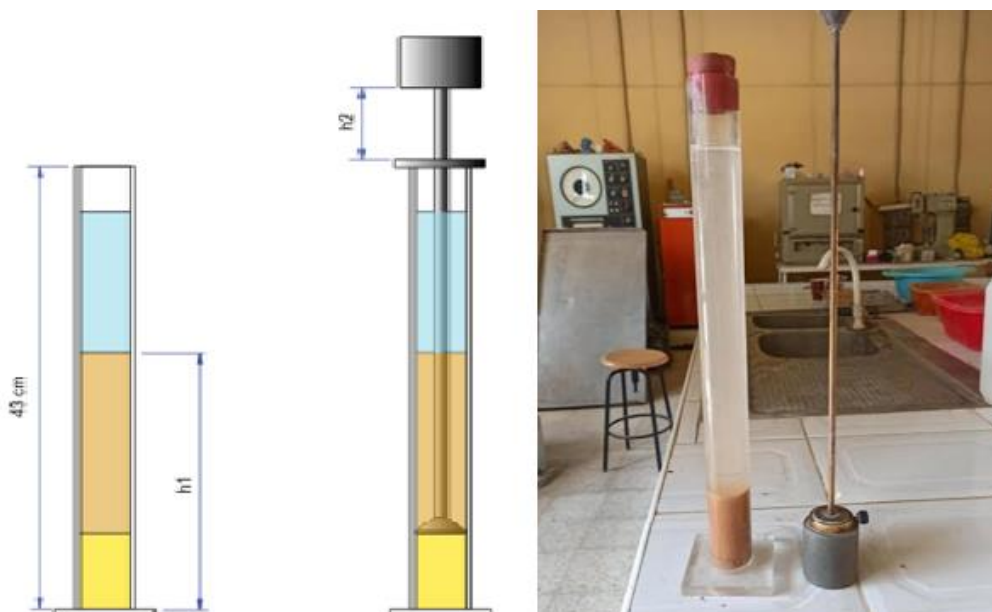


Figure II .12 : Essais de l'équivalent de sable.

Les résultats d'équivalent de sable présente dans le Tableau II .12 :

Tableau II .12 : Résultats d'essais d'équivalent de sable naturel 0/5.

Hauteur (cm)	h_1	h_2	EVS%	h'_2	ESP%
Echantillon	11.8	8.8	74.57	8.6	72.88

Tableau II .13 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable.

ESV sable	ESP	Nature et qualité de sable
ES<65	ES<60	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<80	Sable légèrement argileux de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de particulièrement le retrait.
75≤Es≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
Es≥85	ES>85	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.

« Notre sable est propre, avec une faible teneur en fines argileuses, ce qui le rend parfaitement adapté à la production de bétons de haute qualité. »

b. Analyse granulométrique :



Figure II .13 : Essai d'analyse granulométrique de sable.

Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau II .14

Tableau II .14 : 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

La courbe granulométrique de sable est représentée sur la Figure II .14

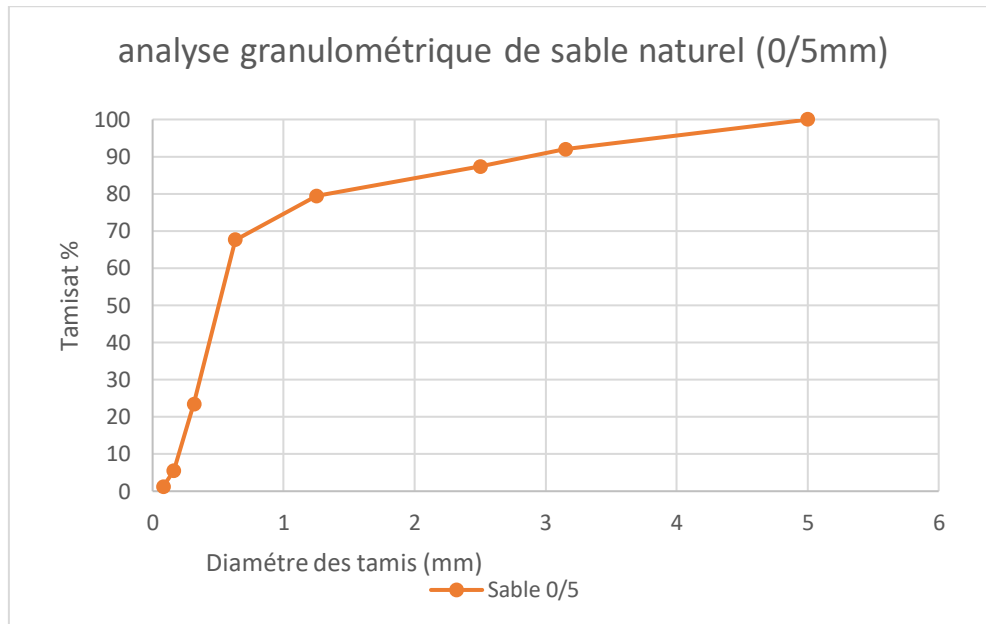


Figure II .14 : La courbe granulométrique du sable.

c. Module de finesse :

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme de refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis. L'essai réalise selon la norme NF P18-540 [44].

$$M_f = \frac{\sum Ri}{100} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\sum Ri$ (refus cumules de% des tamis [0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5])

Tableau II .15 : Module de finesse du sable.

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très Fin	1 à 1.5

$M_f = 2,36$ Donc ; Moyen

d. La masse volumique :

❖ **La masse volumique apparente [NF P 18-555] [50] :**

La masse volumique d'un matériau traduit dans une large mesure ses propriétés techniques.



Figure II .15 : Essai de la masse volumique apparente de sable.

Tableau II .16 : La masse volumique apparente de sable naturel.

Matériaux	M1 (g)	V1 (cm ³)	M2 (g)	$\rho_{app}(g/cm^3)$
Sable	300	1000	1870.55	1.57

❖ **La masse volumique absolue :**



Figure II .16 : Essai de la masse volumique absolue de sable.

Elle est déterminée à partir de l'essai réalisé à l'aide d'une éprouvette graduée.

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II .17 : La masse volumique absolue de sable naturel.

Matériaux	M (g)	V1 (cm ³)	V2 (g)	ρ_{abs} (g/cm ³)
Sable	300	400	515	2.6

II.5 L'eau :

L'eau utilisée pour le mélange provient du réseau public et à une température de $(20 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C})$. Elle est conforme aux exigences de qualité spécifiées par la norme NF P18-404 [52].

**Figure II .17 :** L'eau.

II.5.1 L'eau de mer :

Dans le cadre de la présente étude, l'analyse chimique de l'eau de mer a été effectuée au niveau du laboratoire de l'hydraulique-Université de Biskra-, d'où les résultats sont énumérés dans le tableau suivant :

Tableau II .18 : La composition chimique de l'eau de mer.

	PO₄³⁻	SO₄²⁻	NO₂⁻	NH₄⁺	Mn⁺²	Fe⁺²	PH
Composants	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	
	0,15	0,50	0,65	3	19,35	0,24	8,36

II .6 Composition du béton:

II .6.1 Les méthodes de calcul de la composition du béton :

Le calcul de la composition du béton vise à déterminer avec précision les dosages des différents constituants à savoir le ciment, les granulats (sable et gravier) ainsi que l'eau nécessaires pour produire 1 m³ de béton frais. L'objectif principal est d'obtenir un mélange homogène, aux propriétés physiques et mécaniques bien définies, répondant aux exigences de performance, notamment en termes de maniabilité, de durabilité et de résistance mécanique.

Plusieurs méthodes de formulation du béton ont été développées et sont appliquées à l'échelle internationale. Parmi les méthodes les plus reconnues, on peut citer :

- La méthode de Dreux-Gorisse ;
- La méthode de Bolomey ;
- La méthode d'Abrams ;
- La méthode des volumes absolus.

II.6.2 Méthode de Dreux-Gorisse :

La procédure expérimentale débute par une caractérisation physique des granulats, incluant la détermination de la densité, de la porosité et de la compacité. Une analyse granulométrique a également été effectuée afin d'identifier la répartition des granulats selon leurs dimensions.

Suite à l'application de la méthode de Dreux-Gorisse, une formulation du béton a été obtenue, caractérisée par un rapport eau/ciment de 0,626, avec une répartition des constituants granulaires comme suit : 32 % de sable, 6 % de gravier de type 3/8 mm et 62 % de gravier de type 8/16 mm (Dreux et Festa, 1998).

Le choix de cette méthode de formulation a été motivé par plusieurs critères, notamment :

- La simplicité et la facilité d'application de la méthode ;
- Son usage courant dans les laboratoires de la région Est de l'Algérie, tels que le C.T.C. Est, le L.T.P. Est, ainsi que d'autres laboratoires privés.

Cette méthode se base sur la Formule suivante :

$$Rb = GR_c \left(\frac{c}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{II.5})$$

Où :

Rb : Résistance à la compression du béton prévue à 28 jours, en bars ;

G : Coefficient granulaire donné par le (Tableau II .18), en fonction de la qualité et de la dimension maximale (D_{maS}) du gravier ;

Rc : Classe vraie du ciment à 28 jours, en bars.

Tableau II .19 : Les valeurs de coefficient granulaire (G).

Qualité des granulats	Dimension des granulats D (mm)		
	Fins	Moyens	Gros
	$D \leq 16$	$20 \leq D \leq 31.5$	$D \leq 40$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Il a fallu préparer des lots pour réaliser des éprouvettes de 15 cubes (10 x10 x10) cm³ pour chaque essai.

Sept formulations de béton sont produites comme indiqué dans le tableau

Tableau II .20 : Composition du béton.

Mélange du béton	Humidité	Gravier recyclé (%)	Temps d'immersion
B1	0%	0%	0 Heure
B2	0%	100%	0 Heure
B3	100%	100%	24 Heure
B4	0%	50%	0 Heure
B5	50%	50%	24 Heure
B6	50%	100%	24 Heure
B7	25%	50%	24 Heure

Tableau II .21 : Composition du béton.

	Matériau								
	Ciment (kg)	Eau (kg)	SN (0/5) (kg)	GN (3/8) (kg)	GR (3/8) (kg)	GRS (3/8) (kg)	GN (8/16) (kg)	GR (8/16) (kg)	GRS (8/16) (kg)
100%BN	350	219,28	562,71	87,906	/	/	1159,01	/	/
100%GBR	310	194,22	573,53	/	95,128	/	/	1068,5	/
100%GBRS (Saturé)	310	194,22	573,53	/	/	95,128	/	/	1068,5
50%BN+ 50%GBR	350	219,28	562,636	43,9	38,82	/	579,09	532,54	/
50%BN+ 50%GBRS (Saturé)	350	219,28	562,636	43,9	/	38,82	579,09	/	532,54
50%GBR+ 50%GBRS (Saturé)	310	194,22	573,53	/	47,54	47,54	/	534,09	534,09
50%BN+ 25%GBR+ 25%GBRS (Saturé)	350	219,28	562,636	43,9	19,409	19,409	579,09	266,363	266,363

II .6.3 Préparation et malaxage du béton :

Des moules cubiques métalliques de dimensions $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ ont été utilisés pour la confection des éprouvettes. Ces moules, fabriqués en acier, présentent des caractéristiques favorables telles que l'imperméabilité, l'inaltérabilité et des propriétés facilitant le démoulage grâce à leur surface lubrifiante.

Le malaxage du béton a été réalisé à l'aide d'un malaxeur à axe vertical associé à un système de mélange à mouvement planétaire, permettant d'assurer une homogénéité optimale du mélange.

Le béton ordinaire a été fabriqué conformément à la norme française **NF P 18-404** [52].

La méthode de fabrication adoptée pour les différents types de béton, en tenant compte du taux d'humidité du granulat recyclé, s'est déroulée selon les étapes suivantes :

- Utilisation du granulat de béton recyclé (GBR) sans traitement préalable (0 heure) dans les formulations : **B1, B2, B4** ;
- Immersion complète des granulats de GBR dans l'eau pendant 24 heures pour les formulations : **B3, B5, B6, B7** ;
- Mouillage préalable du malaxeur afin de limiter l'absorption supplémentaire d'eau de gâchage ;
- Incorporation progressive des constituants solides en commençant par les plus grossiers (graviers), suivis du sable, puis du ciment ;
- Malaxage à sec pendant une minute ;
- Ajout de l'eau, suivi d'un malaxage humide pendant trois minutes ;
- Vidange complète du malaxeur.



Figure II .18 : Malaxage du béton.

II .6.4 Vibration :

La vibration constitue la méthode de compactage la plus couramment utilisée pour le béton frais. L'efficacité de ce procédé dépend principalement de la fréquence d'oscillation, de l'amplitude des vibrations, ainsi que de la durée d'application. L'opération a été réalisée conformément à la norme **NF EN 12390-2**, [53] selon les étapes suivantes :

- Les moules cubiques et prismatiques ont été remplis en deux couches successives ;

- Chaque couche a été vibrée à l'aide d'une table vibrante pendant 10 secondes afin d'assurer un bon compactage ;
- Les éprouvettes ont ensuite été laissées à l'air libre pendant 24 heures, en protégeant leur surface supérieure à l'aide d'un film plastique pour limiter l'évaporation de l'eau ;
- Après 24 heures, les moules ont été décoffrés, les éprouvettes marquées à la peinture, puis placées en immersion dans l'eau pour poursuivre la cure.

II.6.5 Conservation des éprouvettes après démoulage :

Toutes les éprouvettes préparées dans le cadre de cette campagne expérimentale ont été soumises à un régime de cure identique, afin d'assurer l'homogénéité des résultats. La conservation a été effectuée conformément à la norme **NF P18-404**, [52] en immergeant les éprouvettes dans de l'eau maintenue à une température constante de 20 ± 2 °C pendant une durée de 28 jours.

Ce mode de cure permet d'assurer la poursuite du processus d'hydratation du ciment, tout en limitant les risques de fissuration dus à un dessèchement prématuré ou irrégulier.



Figure II .19 : Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.

II.6.6 Méthode de travail:

Après la préparation des échantillons de béton, ceux-ci sont conservés dans l'eau pendant 28 jours pour assurer leur cure initiale. Par la suite, les éprouvettes sont divisées en deux groupes :

- Un groupe reste immergé dans l'eau (milieu neutre),
- L'autre groupe est exposé à un milieu agressif constitué d'eau de mer.

Après une durée de 45 jours dans leurs milieux respectifs.

II.7 Les essais réalisés sur le béton:

- ✓ Essai d'affaissement ;
- ✓ Essai Ultrasonique ;
- ✓ **Essai de résistance à la compression ;**
- ✓ **Essai d'absorption d'eau par capillarité ;**
- ✓ **Essai d'absorption d'eau par immersion**
- ✓ Durabilité ;

II.8 Essais à l'état frais:

II.8.1 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est l'un des tests les plus couramment utilisés pour évaluer la consistance et la maniabilité du béton frais, en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Il est applicable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Cet essai est réalisé conformément à la norme **NF EN 12350-2[54]** selon les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams, préalablement humidifié et légèrement huilé, est rempli de béton frais en trois couches de volume égal ;
- Chaque couche est piquée à cinq reprises à l'aide d'une tige métallique de 16 mm de diamètre, afin d'assurer une bonne compaction ;
- Le cône est ensuite retiré verticalement de manière régulière, puis l'affaissement du béton est mesuré à l'aide d'un dispositif de lecture, avec un arrondi au centimètre près.



Figure II .20 : Essai d'affaissement du béton.

II .9 Essais à l'état durci:

II .9.1 Essais non-destructifs (Essai Ultrasonique): NF EN 12504-4 [55]

❖ Objectif et principe

Cet essai vise à évaluer la qualité du béton de manière non destructive, sans nécessiter de prélèvement par carottage. Le principe repose sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores à travers le béton. Cette vitesse augmente avec le module d'élasticité et la densité du matériau, indiquant ainsi une résistance potentiellement plus élevée. Une impulsion vibratoire est émise à l'aide d'un transducteur, traverse une distance (L) dans le béton, puis est reçue et convertie en signal électrique afin de mesurer le temps de transit (T) à l'aide d'un appareil électronique.

❖ Équipement et méthode de mise en œuvre

L'équipement comprend : un générateur d'impulsions électriques, une paire de transducteurs (émetteur et récepteur), un amplificateur, un dispositif de mesure du temps, ainsi qu'une barre de calibrage.

Pour garantir un bon couplage entre les transducteurs et la surface en béton, on utilise un matériau intermédiaire (vaseline, pâte de kaolin et glycérol, ou savon liquide). Si la surface est rugueuse, il est recommandé de la poncer, Le nombre de points de mesure dépend des dimensions de l'élément testé : un maillage de 0,5 m est utilisé pour les grandes surfaces (voiles, dalles, radiers...), tandis qu'au moins 6 points sont mesurés pour les petits éléments (poutres,

poteaux...)

Les transducteurs peuvent être disposés selon trois configurations :

- Transmission directe (faces opposées),
- Transmission semi-directe (faces adjacentes),
- Transmission indirecte ou de surface (même face).

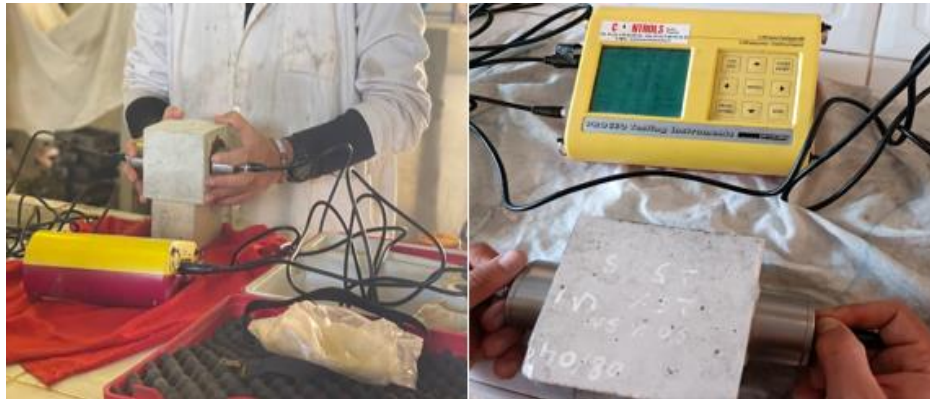


Figure II .21 : Essai d’ultrason.

❖ Résultats et interprétation

La vitesse des ondes est déterminée par la formule :

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{II.6})$$

Où :

- V : vitesse de propagation (km/s),
- L : longueur du trajet (mm),
- T : temps de propagation (μs).

Des vitesses élevées indiquent généralement un béton homogène et exempt de défauts internes. Cet essai permet d’évaluer l’uniformité du béton et de détecter les anomalies telles que les nids de gravier ou les fissures. Toutefois, il ne permet pas à lui seul d’estimer précisément la résistance à la compression, et doit être complété par d’autres essais si nécessaire.

II.9.2 La résistance à la compression (Essais destructifs):

Des essais de compression sont réalisés sur sept mélanges de béton dans deux conditions différentes : les mélanges de référence immergés uniquement dans l'eau, et les mélanges exposés à un milieu agressif représenté par l'eau de mer, après une durée de 45 jours, conformément à la norme NF EN 196-1. [56]



Figure II .22 : Essai de compression uni axial.

II .9.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité: NF P18-502

L'essai d'absorption par capillarité a été réalisé pour évaluer la capacité du béton à absorber l'eau par capillarité, conformément à la norme française **NF P18-502** [57]. Des éprouvettes cubiques en béton de dimensions **(10 × 10 × 10 cm)** ont été utilisées, et séchées dans un four à **105 ± 5°C** jusqu'à obtention d'un poids constant.

Après séchage, les surfaces latérales des éprouvettes ont été isolées à l'aide d'un matériau imperméabilisant pour garantir un transfert vertical de l'eau. Les éprouvettes ont ensuite été placées dans un récipient de manière à ce que leurs bases soient partiellement immergées d'une hauteur de **5 mm**, en maintenant un niveau d'eau constant tout au long de l'essai. Le poids des éprouvettes a été enregistré toutes les 5 minutes afin de mesurer la quantité d'eau absorbée, et le coefficient d'absorption a été calculé en fonction des données recueillies.

$$C_b = \frac{\Delta M}{A \times \sqrt{t}} \quad (II.7)$$

C_b : coefficient d'absorption ;

ΔM : Masse d'eau absorbée (différence entre la masse Sèche et la masse de l'éprouvette à l'état absorbé) en gramme ;

A : section de la base de l'éprouvette en mm² ;

t : temps d'absorption en minutes.

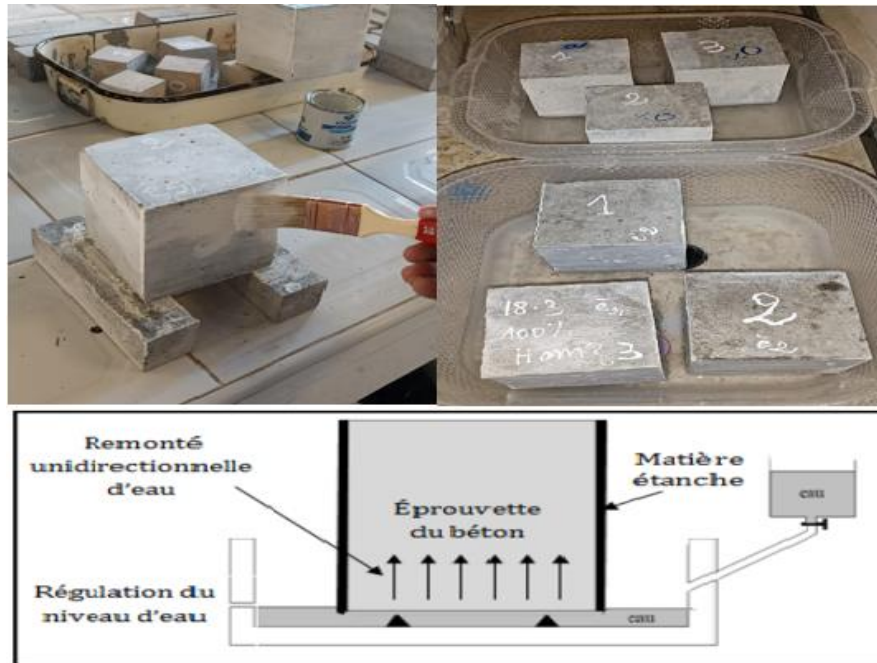


Figure II .23 : Essai d'absorption capillaire.

II .9.4 Essai d'absorption d'eau par immersion: (ASTM C642) [58]

Cet essai est réalisé dans le but d'évaluer le degré de porosité interne d'un échantillon de béton. Le principe de l'essai repose sur le séchage de cubes de béton de dimensions (10 ×10 ×10) cm dans une étuve à une température constante de 105 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante. Ensuite, les éprouvettes sont totalement immergées dans de l'eau à 20 °C pendant une durée de 24 heures, soit jusqu'à saturation complète du matériau. Cette procédure permet d'estimer le volume des vides présents dans le béton. Le coefficient d'absorption par immersion est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$A_b = \frac{M1 - M0}{M0} \times 100 \quad (II.8)$$

Où

A_b: Taux d'absorption en % ;

M0 : masse de l'éprouvette à l'état sec en kg ;

M1 : masse de l'éprouvette à l'état saturé en kg ;

II .10 Essai durabilité:

L'attaque de la pâte de ciment par les eaux agressives (l'eau de mer) a été déterminée sur des éprouvettes cubique 10 ×10 ×10 cm après 24 heures du coulage, les éprouvettes ont été démoulées puis conservées dans l'eau mer pendant 45 jours. Les essais mécaniques en compression simples ont été réalisés à 45jours.



Figure II .24 : les échantillons exposés à l'eau de mer.

II.11 Conclusion:

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières utilisées dans la fabrication des éprouvettes de béton recyclé développées dans cette étude. Il s'agit notamment des granulats recyclés et des autres constituants entrant dans la composition des mélanges. La présentation de la composition des bétons ainsi que les procédures de fabrication adoptées dans ce chapitre nous permettront d'analyser de manière plus précise les résultats expérimentaux, et de mieux comprendre l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés mécaniques et physiques du béton recyclé.

Chapitre III

Résultats et discussion

III. Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux relatifs aux propriétés du béton étudié sont présentés et analysés. Les essais réalisés comprennent la mesure de l'ouvrabilité à travers l'essai d'affaissement, ainsi que la résistance à la compression sur des éprouvettes standards et d'autres immergées dans un milieu agressif (eau de mer), afin d'évaluer l'effet de cet environnement sur les performances mécaniques du béton.

Des essais d'absorption d'eau ont également été effectués, par capillarité et par immersion totale, afin d'estimer la perméabilité du matériau.

En complément, une technique ultrasonique a été utilisée pour estimer la porosité interne et la connectivité des pores, ce qui permet de mieux comprendre le lien entre la microstructure du béton et ses propriétés de durabilité et de résistance aux environnements agressifs.

III.1 Résultats et discussion:

III.1.1 Béton à l'état frais:

L'affaissement peut prendre différentes formes :

- Un effondrement complet du béton ;
- Un affaissement par cisaillement, la partie supérieure du béton cisaille et glisse latéralement ;
- Un véritable affaissement, le béton s'abaisse simplement, en gardant plus ou moins de forme.

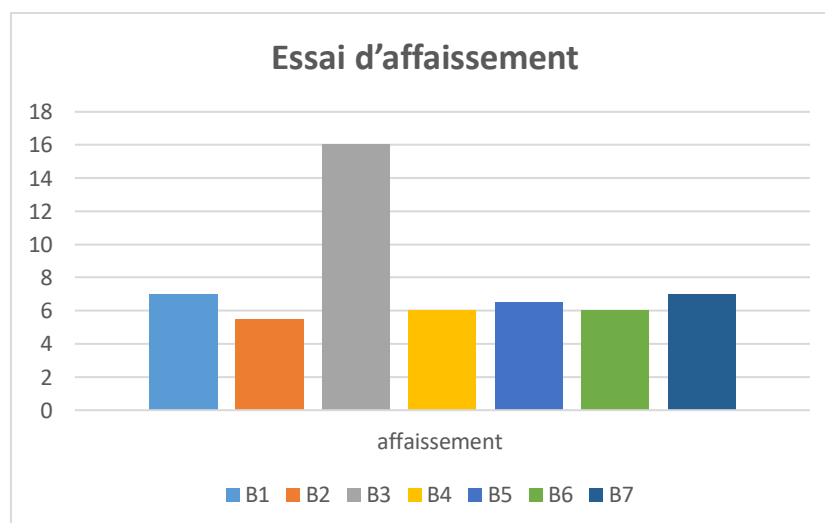
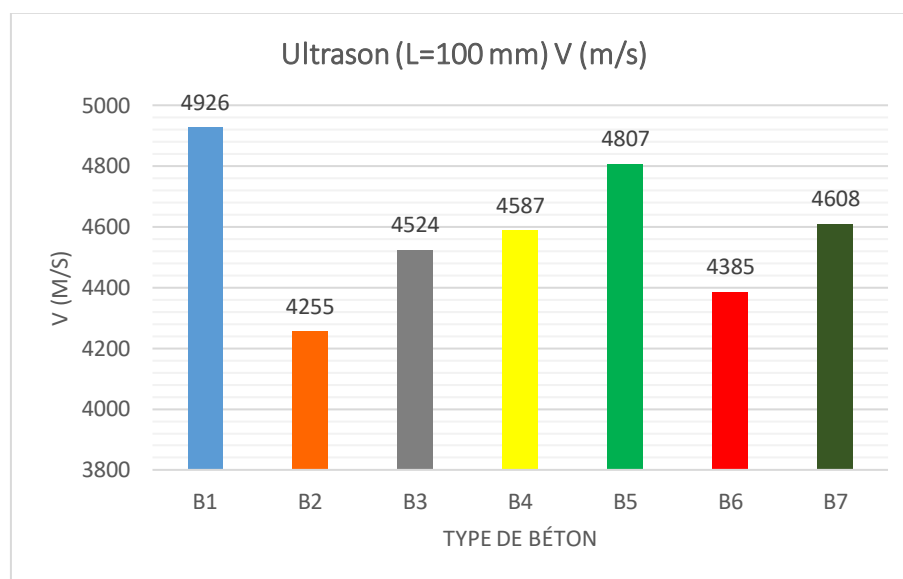


Figure III.1 : affaissement au cône d'abrams**III.1.2 Béton à l'état durci:****III.1.2.1 Contrôle non-destructif (auscultation dynamique):**

L'essai par ultrasons est une méthode non destructive utilisée pour évaluer la densité, l'homogénéité et la qualité interne du béton. Plus la vitesse de propagation des ondes est élevée, plus la structure est compacte et moins elle contient de vides ou de fissures.

**Figure III.2** : Résultat des contrôles non destructifs (auscultation dynamique)**Commentaire :**

Les résultats de l'essai par ultrasons (UPV) ont révélé des différences notables dans les propriétés physiques et structurelles des sept mélanges de béton étudiés (B1 à B7). Le mélange B1 a enregistré le temps de transit le plus court et la vitesse la plus élevée (20,3 μ s, 4926 m/s), traduisant une structure dense et homogène, probablement liée à l'utilisation exclusive de granulats naturels. À l'inverse, le mélange B2 a affiché la vitesse la plus faible et le temps le plus long (23,5 μ s, 4255 m/s), indiquant une plus grande porosité ou un manque de compacité, en lien avec l'emploi de granulats recyclés non saturés.

Les autres formulations (B3 à B7) ont présenté des résultats intermédiaires, traduisant des niveaux variables de densité et de cohésion interne selon la proportion et l'état des granulats

recyclés utilisés. Ces résultats soulignent que la nature et l'état d'humidité des granulats influencent directement la qualité du béton, et que l'intégration de matériaux recyclés peut être une solution durable à condition d'un contrôle rigoureux de la formulation et du traitement. L'essai UPV s'est confirmé comme un outil non destructif fiable pour détecter les différences fines dans la structure interne des bétons.

III.1.2.2 Essai d'absorption par immersion :

Des éprouvettes en béton de forme cubique et de dimensions $10 \times 10 \times 10$ cm ont été utilisées pour mesurer la capacité d'absorption d'eau des différentes formulations de béton, après 28 jours de cure en milieu humide.

Les résultats sont représentés graphiquement dans la figure III.3 suivantes.

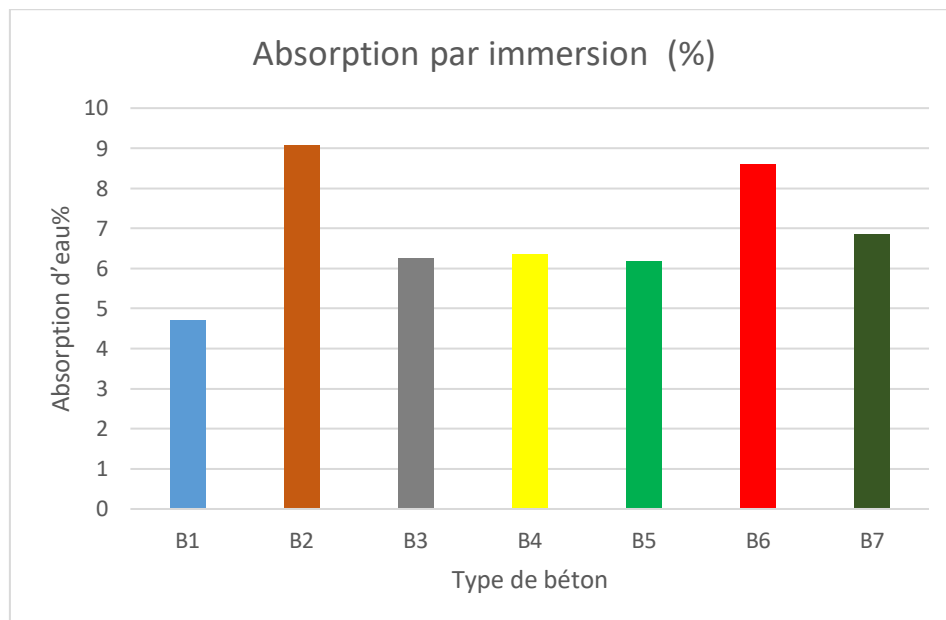


Figure III.3 : Absorption par immersion (%) en fonction de type du béton

Commentaire :

Les résultats montrent des différences significatives entre les mélanges. Le béton contenant 100 % de granulats recyclés (GBR) a enregistré la plus forte absorption avec 9,06 %, suivi du mélange 50 % GBR + 50 % GBRS (saturé) avec 8,59 %, traduisant une porosité élevée due à la nature des granulats recyclés, souvent marqués par des pores ouverts hérités de l'ancienne matrice cimentaire.

En revanche, le mélange de référence 100 % BN (granulats naturels) a présenté le plus faible taux d'absorption avec 4,7 %, témoignant d'une structure plus dense et donc d'une meilleure résistance à la pénétration de l'eau.

Il est également observé que les mélanges intégrant des granulats recyclés saturés préalablement (GBRS) présentent des taux d'absorption moindres par rapport aux granulats secs, ce qui démontre que la saturation préalable des granulats constitue une technique efficace pour limiter l'absorption globale d'eau.

Ces résultats soulignent l'importance du choix des granulats et de leur condition dans la conception des bétons. L'utilisation non contrôlée de granulats recyclés peut accroître significativement l'absorption d'eau, compromettant ainsi la durabilité du matériau, à moins d'adopter des stratégies d'optimisation telles que la saturation préalable ou l'emploi d'adjuvants spécifiques.

III.1.2.3 Essai d'absorption d'eau par capillarité :

L'essai d'absorption capillaire a pour objectif d'évaluer la capacité des différentes formulations de béton à absorber l'eau à travers les pores fins, sous l'effet de la capillarité naturelle, sans application de pression externe. Cet essai a été réalisé sur sept formulations de béton distinctes, variant selon le type de granulats utilisés (naturels, recyclés partiellement ou totalement), après 28 jours de cure en milieu humide, à l'aide d'éprouvettes cubiques de dimensions $10 \times 10 \times 10$ cm.

Les résultats de l'absorption capillaire sont présentés dans la figure III.4 suivante.

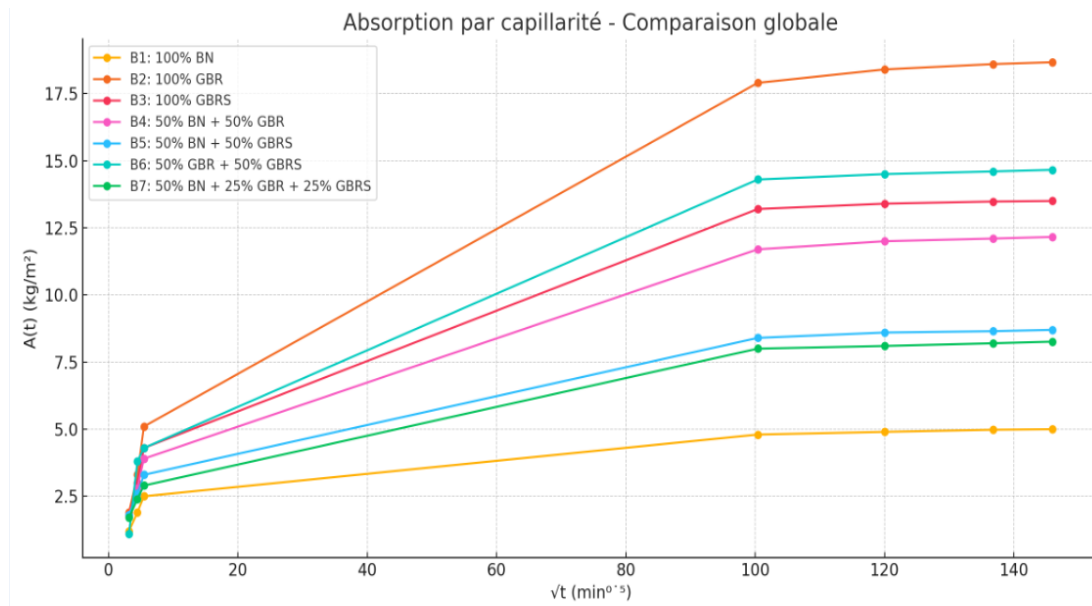


Figure III.4 : L'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.

Commentaire :

Les bétons contenant des granulats recyclés non saturés (ex. B2) présentent une absorption d'eau par capillarité plus élevée que ceux à base de granulats naturels ou recyclés saturés (ex. B1 et B7).

Cela s'explique par la forte porosité du granulat recyclé et la présence de pâte cimentaire résiduelle qui favorise la pénétration de l'eau.

L'étude de (Wirquin et al. 2000) [36] confirme cette tendance, en indiquant que l'augmentation du volume des pores dans les granulats recyclés augmente significativement l'absorption d'eau, ce qui nuit à la durabilité du béton en milieux agressifs.

Ces résultats soulignent l'importance du choix du granulat et de son état d'humidité dans la formulation des bétons. La saturation préalable des granulats recyclés constitue une solution efficace pour limiter l'absorption initiale et améliorer les performances du béton.

III.1.2.4 Essai durabilité:

Les septes formulations ont été exposé à un milieu agressif (eau de mer) et ce pour un éventuel suivi de leurs durabilités et ce pendant 45 j à travers la résistance à la compression que développe que formulation.

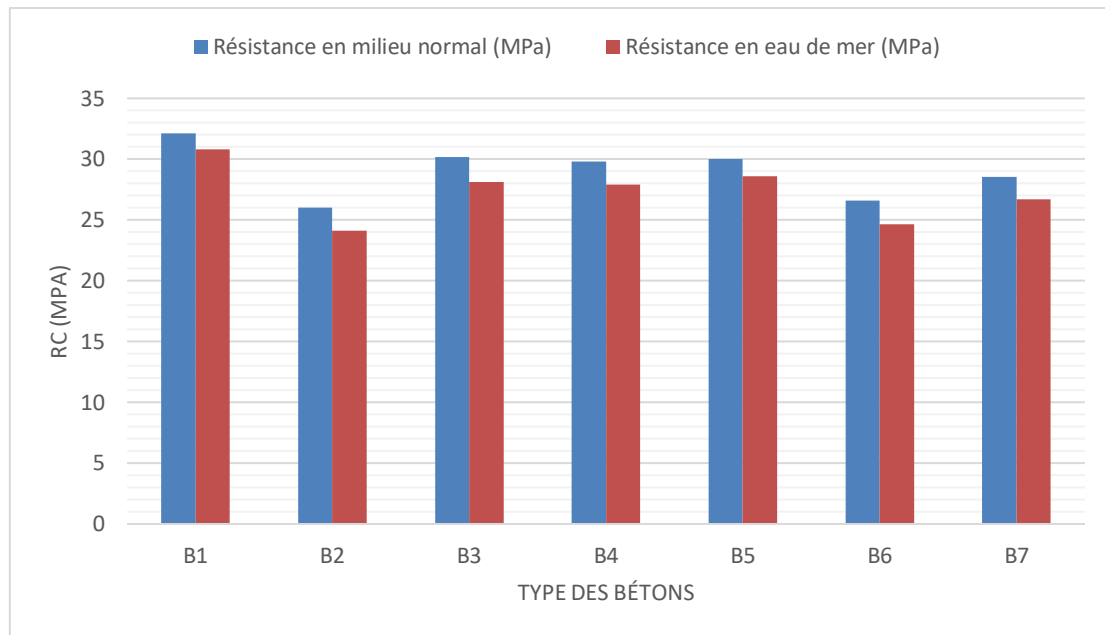


Figure III.5 : Influence du milieu de conservation sur la résistance à la compression

Commentaire :

Le diagramme en barres met en évidence une diminution globale de la résistance à la compression pour toutes les formulations de béton après exposition à un environnement agressif (eau de mer), par rapport à celles conservées dans un milieu normal. Cette baisse varie entre 4 % et 8 % selon les mélanges, ce qui confirme l'impact dégradant des milieux marins sur les performances mécaniques du béton.

Cette perte de résistance est attribuée principalement à la présence d'ions agressifs comme les chlorures et sulfates dans l'eau de mer. Ces ions réagissent avec la pâte cimentaire, entraînant la décomposition progressive des produits hydratés, en particulier les C-S-H (Calcium Silicate Hydrate), qui sont les principaux contributeurs à la résistance du béton. Les chlorures favorisent aussi la corrosion des armatures en acier, tandis que les sulfates peuvent générer des composés expansifs tels que l'ettringite, provoquant des fissures internes et une fragilisation de la matrice.

En comparant les performances entre les différents mélanges, il apparaît que les formules contenant des granulats recyclés saturés (notamment B3, B5 et B6) affichent une perte de performance plus marquée que celles constituées majoritairement de granulats naturels (B1). Cela met en lumière le rôle déterminant du type de granulat utilisé dans la durabilité du béton.

soumis à des environnements agressifs. Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures (Mesâi Ahmed & Maafa Elyes 2018 ; Ben Moussa Hichem 2018). [37] [38]

III.2 Conclusion:

Les essais réalisés dans ce chapitre ont montré que le béton contenant des granulats recyclés non saturés présente des taux d'absorption d'eau élevés, aussi bien lors de l'essai par immersion que par capillarité, en raison de leur forte porosité. En revanche, la saturation préalable des granulats s'est révélée efficace pour réduire cette absorption.

Concernant la résistance à la compression, toutes les formulations ont montré une baisse de performance après exposition à l'eau de mer, avec une meilleure tenue observée pour les bétons à base de granulats naturels (comme B1), tandis que les mélanges recyclés (B2, B3) ont présenté une résistance plus faible.

Ces résultats soulignent l'importance du type de granulat et de son état d'humidité dans le comportement du béton, notamment en milieu agressif, et confirment que l'utilisation de granulats recyclés est envisageable, à condition de respecter certaines exigences techniques pour assurer la durabilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde en raison de sa résistance, de sa durabilité et de sa facilité de mise en œuvre. Cependant, sa production à grande échelle implique une consommation massive de granulats naturels, ce qui exerce une pression importante sur les ressources naturelles et contribue à la dégradation de l'environnement. Parallèlement, les activités de démolition génèrent d'énormes quantités de déchets inertes, principalement du béton, souvent abandonnés sans traitement adéquat.

Pour faire face à ces défis, le recyclage des granulats issus du béton de démolition apparaît comme une alternative prometteuse, capable de concilier performances techniques et enjeux environnementaux. Dans cette optique, notre travail s'est inscrit dans une démarche de valorisation des déchets de construction, à travers l'étude expérimentale de l'effet de la substitution partielle ou totale des granulats naturels par des granulats recyclés sur les propriétés du béton, en conditions normales et après exposition à un milieu agressif : l'eau de mer.

Pour atteindre cet objectif, notre étude a été structurée en trois chapitres :

- **Le chapitre 1** a présenté un état de l'art sur le béton, les granulats recyclés, ainsi que les impacts de leur utilisation sur les propriétés du béton dans des milieux agressifs.
- **Le chapitre 2** a détaillé la méthodologie expérimentale, les matériaux utilisés, les formulations préparées, et les essais menés (absorption par immersion et capillarité, résistance à la compression).
- **Le chapitre 3** a exposé les résultats expérimentaux et leur interprétation.

Les résultats obtenus ont montré que :

- Le béton à base de granulats recyclés présente une porosité et une capacité d'absorption plus élevées que celui à base de granulats naturels, ce qui peut compromettre sa durabilité, notamment en environnement marin.
- La saturation préalable des granulats recyclés constitue une solution efficace pour réduire l'absorption d'eau et améliorer la résistance à la pénétration des ions agressifs.
- La résistance à la compression diminue après exposition à l'eau de mer, avec une perte plus marquée dans les formulations contenant des granulats recyclés, en particulier non traités.

- La substitution optimale des granulats naturels par des granulats recyclés reste limitée afin de préserver un bon compromis entre durabilité et performance mécanique.

L'ajout des granulats recyclés, lorsqu'il est bien contrôlé (notamment par la saturation), peut ainsi contribuer à la fabrication d'un béton plus respectueux de l'environnement. Toutefois, au-delà d'un certain seuil de substitution, les performances mécaniques et la durabilité peuvent être affectées de manière significative. Par conséquent, le recours à cette approche doit s'accompagner de précautions techniques appropriées.

Listes de références

- [1]. J. Baron, J. Ollivier 1996-LES BETONS - BASES ET DONNEES POUR LEUR FORMULATION
- [2]. L. J. Vicat, Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues à pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.
- [3]. P. Dupont, G. Aussedat, Y. Descantes, J. Guédon Les superstructures du bâtiment· 2007 Granulats. Origines et caractéristiques
- [4]. Maillot R. "Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p., (2001).
- [5]. De Brito, J., & Saikia, N. (2012). *Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste*. Springer Science & Business Media.
- [6]. Ghislain Croyère ; Droit et organisation générale de la construction· 1983. Étanchéité par revêtement de surface Caractéristiques et matériaux
- [7]. Chakri, S. (2015). *Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique* [Figure 2, Procédé de fabrication du ciment, Doctoral dissertation, Université de Blida].
- [8]. Dreux G. Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8 ème édition, Edition Eyrolles, paris, 1998.
- [9]. Zhang Q Ye G, Koenders E. " Étude de la structure de la pâte de ciment Portland chauffée à l'aide de diverses techniques" Construction and Building Materials 38 (2013) : 1040-
- [10]. Fathifazl, G., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Abbas, A., Fournier, B., & Foo, S. (2009). "Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams." ACI Structural Journal.
- [11]. Etxeberria, M., Marí, A. R., & Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and structures*, 40, 529-541.
- [12]. Boulay, V. (2014). *Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment* (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke).
- [13]. Leclercy, D. (2002). Le compost, une filière de valorisation des déchets organiques à développer.

- [14]. Florio, F., Terrible, C., & Vincent, V.V. (2006). Déchets du Bâtiment et des Travaux Publics. *Travaux publics et infrastructures*.
- [15]. (2018). Gestion des déchets de chantier des artisans. *Techniques Sciences Méthodes*.
- [16]. Mongeard, L. (2017). De la démolition à la production de graves recyclées : analyse des logiques de proximité d'une filière dans l'agglomération lyonnaise. *Flux*, 64-79.
- [17]. Rezeg, S. (2022). *Étude sur la valorisation des matériaux recyclés dans le secteur du BTP* [Mémoire de Master, Université de Biskra].
- [18]. Scribe, C. (2019). Bilan 2016 de la production de déchets en France.
- [19]. Denoiseux, D. (2010). L'exportation de déchets dangereux vers l'Afrique : le cas du Probo Koala.
- [20]. Messin, G. (1997). Recyclage des déchets ferreux. *Élaboration et recyclage des métaux*.
- [21]. Quebaud, M. (1996). Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats.
- [22]. GSM Granulats. "Granulats Recyclés." Offre GSM - Produits & Services.
- [23]. Deodonne, K. (2015). Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental.
- [24]. El Beze, L. (2008). *Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumeux : identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 3).
- [25]. Ruffy, M. (1993). Rapport sur la gestion, le traitement, le recyclage et la commercialisation des déchets en Europe (Doc. 6912). Assemblée parlementaire du Conseil de l'Europe.
- [26]. Tourenq, C., & Denis, A. (1982). LES ESSAIS DE GRANULATS.
- [27]. Otsuki N, Miyazato S-I, Yodsudjai W. "Influence des agrégats recyclés sur la zone de transition interfaciale, la résistance, la pénétration des chlorures et la carbonatation du béton." *Journal des matériaux en génie civil* 15.5 (2003): 443-451.

- [28]. Omary, S., Y. Ghorbel, and G. Wardeh. (2015). "Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties." *Construction and Building Materials*, 108, 163–174.
- [29]. Tarn, V. W. Y., Gao, X. F., Tarn, C. M. et Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 3, p. 364-9.
- [30]. Bouarroudj, M. E. K. (2019). *Utilisation de matériaux naturels modèles pour la formulation de mortier contenant des sables et des fines de granulats recyclés* [Thèse de doctorat, Université de Nantes].
- [31]. De Oliveira, M. B. et Vazquez, E. (1996). Influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. *Waste Management*, volume 16, numéro 1-3, p. 113-117.
- [32]. Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, volume 42, numéro 1, p. 407-415.
- [33]. De Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*, 23(2), 872-877.
- [34]. Florian Théréne, E. Keita, Jennifer Nael-Redolfi, P. Boustingorry, L. Bonafous, N. Roussel Cement and Concrete Research-(2020). Water absorption of recycled aggregates : Measurements, influence of temperature and practical consequences
- [35]. Mezreb, K., & Toumi, A. (2013). Étude expérimentale du comportement des bétons à base de granulats recyclés. *Revue des Sciences et de la Technologie*, (23), 55–62.
- [36]. Katz A. Propriétés du béton fabriqué avec des granulats recyclés à partir de béton ancien partiellement hydraté. *Recherche sur le ciment et le béton*, 2003, vol. 33, n° 5, p. 703-711.
- [37]. Pereira C G, Castro-Gomes J, Oliveira L P. "Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete", *Construction and building materials*, (2009), Vol. 23 No. 2, pp. 602-08.
- [38]. Hadjieva-Zaharieva, R. (1998). Durabilité des bétons à base de granulats recyclés.

- [39]. Cao, H. T., Bucea, L., Ray, A., & Yozghatlian, S. (1997). The effect of cement composition and pH of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 161-171.
- [40]. Sofiane, M. A. (2011). INFLUENCE DE LA VALORISATION DES MICROFIBRES VEGETALES SUR LA FORMULATION ET LA RESISTANCE AUX CYCLES DE GEL-DEGEL DE BAP (Doctoral dissertation, université de Cergy-Pontoise).
- [41]. Wirquin, E., Hadjieva-Zaharieva, R., & Buyle-Bodin, F. (2000). Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité—Application aux bétons de granulats recyclés. *Materials and Structures*, 33(7), 403–408. <https://doi.org/10.1007/BF02479650>
- [42]. Mesâi, A., & Maafa, I. (2018). *Étude théorique de l'effet des sels issus des eaux ascendantes sur les structures en béton armé dans la région d'Oued Souf*. Université d'El Oued, Algérie. Récupéré de <https://dspace.univ-eloued.dz/items/70892233-6a5c-4c75-8acf-4a92a3b6108a>
- [43]. Ben Moussa, H. (2018). *Étude de l'effet d'un milieu agressif sur les propriétés du béton dans la région d'Oued Souf* (Mémoire de Master). Université d'El Oued, Algérie. Récupéré de <https://dspace.univ-eloued.dz/items/9f4cd452-48c8-4246-8423-ac3346b0f2a31050>.
- [44]. **NF P18-540**. Normalisation Française P 18-540, Granulats- Définitions, conformité, spécifications, indice de classement, 1997.
- [45]. **NF EN 197-1**. Norme Européenne Norme Française NF EN 197-1, Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, AFNOR, 2001.
- [46]. **NF EN 934-2**. Norme Européenne Norme Française NF EN 934-2, Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Partie 2 : Adjuvants pour béton – Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, 2002.
- [47]. **NF EN 1008**. Norme Européenne Norme Française NF EN 1008, Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, AFNOR, 2003.
- [48]. **NF EN 12620** AFNOR. (2008). - *Granulats pour béton*. Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris.

- [49]. **NF EN 933-5**. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 5 : détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons, 1989.
- [50]. **NF P18-555**. Granulats. Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, 1990.
- [51]. **NF-18-598**. Afnor, « Granulats- Equivalent de sable », 1990.
- [52]. **NF P18-404**. Béton-essai d'information-convenance et de contrôl-confection et conservation des éprouvettes. AFNOR, 04p December 1981.
- [53]. **NF EN 12390-2**. Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, AFNOR, 2019.
- [54]. **NF EN 12350-2**. Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement, AFNOR, 2019.
- [55]. **AFNOR. (2004). NF EN 12504-4** : Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : Détermination par ultrasons de la vitesse de propagation (Norme française). Association Française de Normalisation.
- [56]. **NF EN 196-1**. Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances, AFNOR, 2016.
- [57]. **NF P 18-502**, AFNOR, “Water Absorption by capillary”, AFNOR, Paris, 1989.
- [58]. **ASTM C 642-97**, “Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete”

