

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-Oued Faculté de sciences et technologie
Département d'Hydraulique et Génie Civil



Mémoire fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en génie civil

Spécialité : Génie civil

Option : Matériaux en génie civil

Thème

L'effet du traitement chimique du sable recyclé sur la durabilité du béton de sable

Soutenue le 08/06/2023

Dirigé par : Dr. Djedid Tarek

Devant le jury composé de :

Dr. Logbi abdelaziz

Dr. Mani Mohamed

Réalisé par :

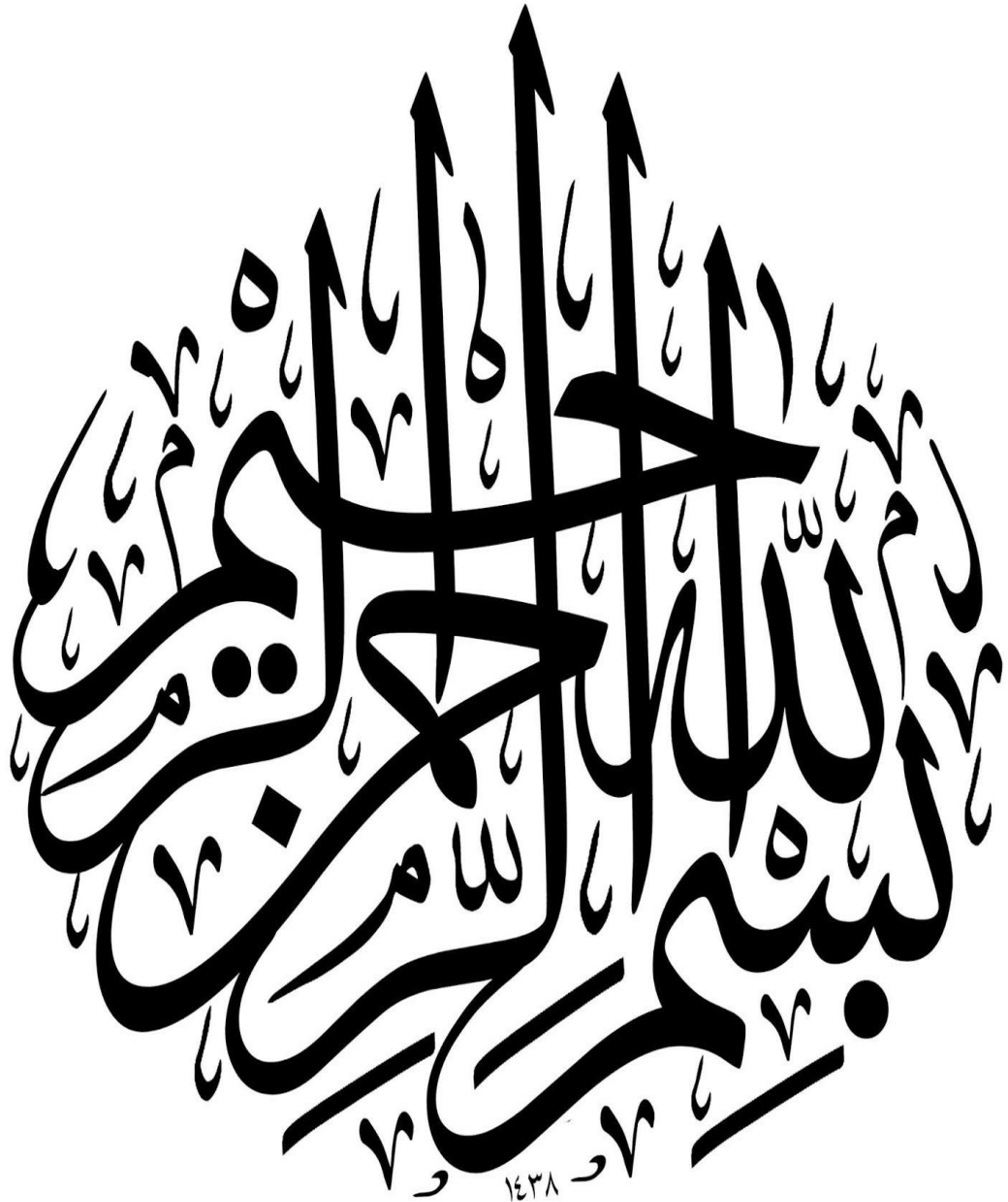
Cherrada Abderrazek

Aroua Djamel

Grira Dris

Keddari Rachid

Année académique 2022-2023



Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon dieu tout qui nous à donner toute

La volonté et la patience pour réaliser ce travail.

L'expression de nos chaleureuse et sincère reconnaissance à **Dr. Djedid Tarek** pour avoir suivie notre travail, pour son soutien et son aide.

Nos remerciement s'adresse également à tous les professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges

Pour leurs aides jusqu'à l'aboutissement de cet travail:

Mr. Ayati Salah Gérant de laboratoire géotechnique S.A.R.L I.A.C.T

Mr. Ghanem Khaled et Ouellabi Saidi; Gérants de laboratoire géotechnique **Nizolab**.

Mr. Sedira AbdelHamid et leurs équipes; Gérant de laboratoire géotechnique.

Merci à tous pour votre contribution à la réalisation de ce travail

Resume

Le secteur de la construction ne cesse de croître, la demande en ressources naturelles ne cesse d'augmenter et la quantité de déchet de construction et de démolition en fait de même. Dans les normes actuelles, la substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de béton pour la fabrication de nouveaux bétons est limitée au vu de propriétés moins bonnes que les granulats naturels.

Les granulats recyclés "GR" de béton sont constitués de granulats naturels et de pâte de ciment durcie. Cette pâte de ciment possède généralement une porosité plus grande que les granulats naturels et a donc un impact majeur sur les propriétés des granulats recyclés. Il est nécessaire d'améliorer alors les propriétés de la pâte de ciment durci ou de réussir à séparer la pâte de ciment des granulats naturels composant les granulats recyclés.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact ou l'effet de la traitement chimique des granulats recyclés de béton et également l'impact de leur utilisation dans de nouveaux mortiers avec la substitution d'un sable de dune.

Dans un premier temps, le travail s'est concentré sur l'effet de traitement chimique des granulats recyclés en fonction et de la granulométrie (l'origine du béton n'est pas pris en compte). Cette partie du travail a montré que l'utilisation de bicarbonate de sodium (ou hydrogénocarbonate de sodium) avec ciment CRS selon le cinétique proposé comme suit : 2% NaHCO_3 + 4% CRS, 4% NaHCO_3 + 4% CRS, et 6% NaHCO_3 + 4% CRS réduit l'absorption d'eau. Ensuite, différents mortiers ont été fabriqués à base de sable recyclé (0.63/4). Ce second axe du travail a permis de montrer que l'utilisation de sable recyclé traité substitué avec sable de dune a un impact positif sur la résistance en compression et sur la porosité des mortiers par rapport à l'utilisation de sable recyclé non-traité d'un part et le sable recyclé lavé avec l'eau d'autre part.

Mots clés: granulats recyclés de béton, mortier, béton, recyclage

Abstract

The construction industry continues to grow, the demand for natural resources continues to increase and so does the amount of construction and demolition waste. In current standards, the substitution of natural aggregates by recycled concrete aggregates for the manufacture of new concrete is limited in view of their poorer properties than natural aggregates.

Recycled concrete aggregates "RCA" consist of natural aggregates and hardened cement paste. This cement paste generally has a greater porosity than natural aggregates and therefore has a major impact on the properties of recycled aggregates. It is then necessary to improve the properties of the hardened cement paste or to succeed in separating the cement paste from the natural aggregates making up the recycled aggregates.

The objective of this work is to study the impact or the effect of the chemical treatment of recycled concrete aggregates and also the impact of their use in new mortars with the substitution of a dune sand.

Initially, the work focused on the effect of the chemical treatment of recycled aggregates depending on the grain size (the origin of the concrete is not taken into account). This part of the work has shown that the use of sodium bicarbonate (or sodium hydrogencarbonate) with CRS cement according to the kinetics proposed as follows: 2% NaHCO_3 +4% CRS, 4% NaHCO_3 +4% CRS, and 6% NaHCO_3 +4 %CRS reduces water absorption. Then, different mortars were made from recycled sands (0.63/4). This second line of work has shown that the use of treated recycled sand substituted with dune sand has a positive impact on the compressive strength and on the porosity of mortars compared to the use of untreated recycled sand. on the one hand and recycled sand washed with water on the other hand.

Keywords: recycled concrete aggregates, mortar, concrete, recycling

تستمر صناعة البناء في النمو، ويزداد الطلب على الموارد الطبيعية وكذلك كمية نفايات البناء والهدم. في المعايير الحالية، يكون استبدال الركام الطبيعي بمجموعات الخرسانة المعاد تدويرها لتصنيع الخرسانة الجديدة محدودًا نظرًا لخصائصها الأكثر فقرًا من الركام الطبيعي.

تتكون ركام الخرسانة المعاد تدويره من مجاميع طبيعية وعجينة أسمنتية صلبة. يتميز معجون الأسمنت هذا عمومًا بمسامية أكبر من الركام الطبيعي وبالتالي يكون له تأثير كبير على خصائص الركام المعاد تدويره. من الضروري بعد ذلك تحسين خصائص معجون الأسمنت المتصلب أو النجاح في فصل عجينة الأسمنت عن الركام الطبيعي الذي يتكون من الركام المعاد تدويره.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير أو تأثير المعالجة الكيميائية للركام الخرساني المعاد تدويره وكذلك تأثير استخدامها في الملاط الجديد مع استبدال رمل الكثبان الرملية.

في البداية، ركز العمل على تأثير المعالجة الكيميائية للركام المعاد تدويره اعتمادًا على حجم الحبيبات (لا يؤخذ منشأ الخرسانة في الاعتبار). أظهر هذا الجزء من العمل أن استخدام بيكربونات الصوديوم (أو هيدروجين كربونات الصوديوم) مع أسمنت CRS وفقًا لـ 2٪ يقلل من $\text{NahCo}_3 + 4$ CRS، $\text{NahCo}_3 + 4$ CRS، و $\text{NahCo}_3 + 4$ CRS، 6٪، النحو التالي: للحركية المقترحة من امتصاص الماء. ثم تم صنع عينات مختلفة من الخرسانة المعاد تدويرها (0.63 / 4). أظهر المحور الثاني من العمل أن استخدام الرمل المعاد تدويره المعاد تدويره مع رمل الكثبان له تأثير إيجابي على مقاومة الانضغاط ومسامية الملاط مقارنة باستخدام الرمل المعاد تدويره غير المعالج. والمغسول بالماء من ناحية أخرى.

الكلمات المفتاحية: ركام الخرسانة المعاد تدويره، الملاط، الخرسانة، إعادة التدوير

Tableau des matières

Tableau des matières

Matières	Page
Remerciements	-
Resume	-
Tableau des matières	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Acronymes	
Introduction générale	2
Chapitre1	
Etats de l'art	
1.1. Introduction	5
1.2. Déchets de construction et de démolition	5
1.3. Processus de recyclage	8
1.4. Classification des granulats recyclés et utilisation	10
1.5. Fonctionnement de la gestion des déchets en Algérie	12
1.6. Acteurs de la gestion de service de déchets	12
1.6. 1.Secteur public	12
1.6.2. Secteur privé	17
1.6.3. Secteur informel	18
1.7. Déchets inertes	18
1.8. Granulats recyclés de béton	19
1.8.1. Définition et Composition	19
1.8.2. Propriétés des granulats de béton recyclé	21
1.8.2.1. Granulométrie	21
1.8.2.2. Masse volumique	23
1.8.2.3. Absorption d'eau	24
1.10. Techniques d'amélioration de la qualité des granulats recyclés	26
1.10.1 Méthodes mécaniques	26
1.10.2 Méthode chimique	27
1.10.3. Méthodes thermiques	27
1.10.4. Traitement par vibrations ultra-sonores	28
1.10.5. Traitement par micro-ondes	29

1.10.6. Traitement par jet hydraulique	30
1.10.7. Electro-fragmentation	30
1.10.8. Carbonatation forcée	31
1.12. Impact des granulats recyclés sur les propriétés des bétons/mortier	33
1.12.1. Ouvrabilité	33
1.12.2. Résistances mécaniques	34
1.12.3. Module de Young	36
1.12.4. Absorption capillaire	36
1.13. Conclusion	37
Chapitre 2	
Matériaux d'étude et méthodes expérimentales	
2.1. Introduction	39
2.2. Ciment	39
2.3. Bicarbonate de sodium	40
2.4. Eau de gâchage	40
2.5. Sable alluvionnaire: "SA"	43
2.6. Sable dunaire: "SD"	46
2.7. Granulats recyclés	54
2.7.1 Traitement chimique des granulats recyclés	65
2.7.2. La série non traités par le NaHCO ₃	66
2.7.3. La série traités par les boues ciment- NaHCO ₃	67
2.8. Procédure de fabrication des éprouvettes	68
2.9. Programme d'expérimentation	70
2.9.1. L'étalement NF EN12350-52	70
2.9.2. Teneur en air: (NA EN 12350-7)	71
2.9.3. Détermination de la masse volumique à l'état frais	71
2.9.4. Porosité: NF P18-459	71
2.10. Essai d'auscultation dynamique: EN12504-4	73
2.10.1. La perte de masse	74
2.10.2. Résistance à la flexion 3 points	75
2.10.3. Résistance à la compression	75
2.11. Résultats et interprétations des essais sur mortiers soumis des températures élevées.	77

Chapitre 03 Analyse et discussion des résultats	
3.1 Introduction	78
3.2. Béton à l'état frais	78
3.2.1. La masse volumique	79
3.2.2. Air occlus	80
3.3. Béton à l'état durci:	80
3.3.1. La porosité	80
3.3.2. Essai d'auscultation dynamique: EN12504-4	80
3.3.3. La résistance à la compression et la flexion	81
3.3.3.1. L'âge 14 jours	81
3.3.3.2. L'âge 28 jours	82
3.3.4. La perte de masse	83
3.4. Conclusion	84
Conclusions et perspectives	86
Bibliographie	88
Annexe	90

Liste des figures

	Page
Chapitre 1	
Etats de l'art	
Figure 1.1 – Déchets produits par les activités économiques et les ménages (2016)	5
Figure 1.2 – Economies linéaire et circulaire	5
Figure 1.3 – Composition habituelle des déchets de démolition	7
Figure 1.4 – Composition des déchets de construction et de démolition en fonction des pays	7
Figure 1.5 – Processus de recyclage d'une installation de dernière génération	10
Figure 1.6 – Granulats recyclés de béton	10
Figure 1.7 – Granulats recyclés de maçonnerie	11
Figure 1.8 – Granulats recyclés d'hydrocarbonés	11
Figure 1.9 – Granulats recyclés de débris mixtes	11
Figure 1.10 – Constitution d'un granulats recyclé de béton	20
Figure 1.11 – Pourcentage de pâte de ciment en fonction de la taille moyenne des granulats recyclés de béton	22
Figure 1.12 – Courbes granulométriques des granulats recyclés de béton de l'étude de zhao et al.	23
Figure 1.13 – Masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve en fonction de la teneur en pâte de ciment	24
Figure 1.14 – Absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire	25
Figure 1.15 – Absorption d'eau en fonction de la teneur en pâte de ciment	26
Figure 1.16 – Principe du traitement par vibrations ultra-sonores	29
Figure 1.17 – Interaction entre l'eau sous pression et le matériau traité	30
Figure 1.18 – Dissolution du CO ₂	32
Chapitre 2	
Matériaux d'étude et méthodes expérimentales	
Figure 2.1: Flacon de 1 kg de NaHCO ₃	40
Figure 2.2: Schéma de mesure d'équivalent de sable.	42
Figure 2.3: Essai l'équivalent de Sable Djamaa	44

Figure 2.4: L'analyse granulométrique de sable de DJAMAA	45
Figure 2.5: Photo satellite de la situation du sable de dune 01	46
Figure 2.6: L'analyse granulométrique de sable de dune 01	48
Figure 2.7: L'analyse granulométrique de sable de dune 02	48
Figure 2.8: Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable de dune	50
Figure 2.9: Analyse du sable de dune	50
Figure 2.10: Image MEB+drx du sable de dune	51
Figure 2.11: Analyse du sable de dune	52
Figure 2.12: Image MEB+drx du sable de dune	53
Figure 2.13 Analyse du sable de dune	52
Figure 2. 14: Le concassage manuel	54
Figure 2.15: La courbe granulométrique de sable recyclé 2/4	55
Figure 2.16: La courbe granulométrique d'un mélange 42 % SR 2/4+58% S. D	57
Figure 2.17: La courbe granulométrique du sable de dune	59
Figure 2.18: Les courbes granulométriques du SR 0.63/4 40%+ SD 60%	62
Figure 2.19: Le concassage par broyeur	63
Figure 2.20: Le broyage par un compacteur cylindrique	64
Figure 2.21. Les différentes fractions du sable recyclé 0.63/4(2.5,1.25 et 0.63 mm)	64
Figure 2.22; Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable recyclé avant le traitement chimique	64
Figure 2.23: Image MEB 10,20,50 um du sable recyclé avant le traitement	65
Figure 2.24: Le trempage du sable recyclé 0.63/4(2.5,1.25 et 0.63 mm)	66
Figure 2.25: Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable recyclé après le traitement chimique	68
Figure 2.26: Image MEB 5,20,50 um du sable recyclé traité	68
Figure 2.27: Le pesage des matériaux	69
Figure 2.28: Le malaxage à sec des matériaux	69
Figure 2.29: Le malaxage des matériaux	69
Figure 2.30: Remplissage à moitié	70
Figure 2.31: Remplissage total	70
Figure 2.32: Les éprouvettes coulés	70
Figure 2.33: Pesage du récipient cylindrique (environ 1 L) avec le béton	71
Figure 2.34: Pesage hydrostatique des éprouvettes	72

Figure 2.35: Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm ³	73
Figure 2.36: Déroulement de l'essai de flexion trois points pour éprouvettes prismatiques de mortiers 40 x 40 x160 mm.	75
Figure2.37: Epreuve après écrasement	75
Figure2.38: Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme.	76
Figure:2.39: Rupture d'un demi-prisme.	76
Figure:2.40: La texture des éprouvettes après le traitement thermique.	76
Chapitre 03	
Analyse et discussion des résultats	
Figure 3.1: Variation de masse volumique selon le type de formulation	80
Figure 3.2: La porosité pour les séries utilisés à l'âge 28j	81
Figure 3.3: La vitesse ultrasnque avant et après le traitement thermique	82
Figure 3.4: La résistance mécanique à l'age 14 jours	82
Figure 3.5. La résistance à la flexion à 28j	83
Figure 3.6: La résistance à la compression après le traitement thermique	84
Figure 3.7: la perte de masse des compression	84

Liste des tableaux

	Page
Chapitre1	
Etats de l'art	
Tableau1.1 – Avantages et inconvénients des différents types de concasseurs	09
Tableau1.2 – Propriétés des granulats recyclés et des granulats naturels	25
Chapitre 2	
Matériaux d'étude et méthodes expérimentales	
Tableau 2.1: Compositions chimiques, minéralogiques et physiques du ciment utilisé.	39
Tableau 2.2: Analyse minéralogiques du ciment	39
Tableau 2.3. Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés	43
Tableau 2.4: Analyse chimique du sable de (Djamaa)	43
Tableau 2.5: Résultats récapitulatif des propriétés physiques s. de DJAMAA	44
Tableau 2.6: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de DJAMAA	45
Tableau 2.7: Résultats récapitulatif des propriétés physiques s. de dune 01	47
Tableau 2.8: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune 01	47
Tableau 2.9: Résultats récapitulatif des propriétés physiques s. de dune 02	48
Tableau 2.10: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune 02	48
Tableau 2.11: MEB+drx du sable de dune	50
Tableau 2.12 MEB+drx du sable de dune	51
Tableau 2.13: MEB+drx du sable de dune	52
Tableau 2.14: MEB+drx du sable de dune	53
Tableau 2.15: Résultats de l'analyse granulométrique de sable recyclé 2/4 Prise d'essai 980.8 g	54
Tableau 2.16: Résultats récapitulatif des propriétés physiques S.R 2/4	55
Tableau 2.17: Résultats de l'analyse granulométrique de SR 2/4 58%+ SD 42%	56
Tableau 2.18: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune Sable de dune	57
Tableau 2.19: sable de dune	58

Tableau 2.20: Résultats récapitulatif des propriétés physiques SR 4/0.63	59
Tableau 2.21: Résultats de l'analyse granulométrique de sable recyclé modifié	60
Tableau 2.21: Résultats de l'analyse granulométrique de SR 0.63/4 40%+ SD 60%	61
Tableau 2.22: MEB+drx du sable de recyclé	64
Tableau 2.23: Concentration du ciment CRS- NaHCO ₃	66
Tableau 2.24: Composition des bétons de sable utilisés	67
Tableau 2.25: MEB+drx du sable de recyclé	68
Chapitre 03 Analyse et discussion des résultats	
Tableau 3.1: Résultats de la masse volumique des bétons de sable à l'état frais	79
Tableau 3.2: Les masses volumiques du mortier à l'état frais	80
Tableau 3.3: Les résultats de l'air occlus	81

Acronymes

GRB	Granulats recyclés de bétons
GR	Granulats recyclés
GN	Granulats naturels
BTP	Bâtiments et travaux publics
ACV	Analyse de cycle de vie
SA	Sable alluvionnaire
SR	Sable recyclé
S	Sable
Gr	Gravillons
gr	Graviers
RCA	Recycled concrete aggregates
ACV	Analyse de cycle de vie
d10	Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 10%
d30	Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 30%
d60	Diamètre du tamis qui correspond à un tamisât de 60%
C_u	Coefficient d'uniformité
C_c	Coefficient de courbure
Dmax	Dimension maximale du granulat
D	Diamètre du plus gros grain
d	Diamètre du plus petit grain
E/C	Eau sur le ciment
DI	Déchets inertes.

Introduction générale

Introduction générale

Le monde de la construction est un monde auquel nous ne pouvons pas échapper. Les pays émergeant se développent et ne cessent de construire pour répondre à leur explosion démographique, leur besoin de se montrer à l'échelle mondiale et/ou leur soif de grandeur. Nous pouvons citer la Chine au niveau de l'augmentation de sa population qui a plus que doublé en l'espace d'une soixantaine d'années et qui, dès lors, a besoin de nombreux nouveaux logements. Nous pouvons également citer la ville de Dubaï qui a vu un nombre colossal d'édifices de grandes hauteurs se construire ces dernières années afin de montrer la richesse du pays. Plus, proche de chez nous, depuis ces derniers années et compte tenu de l'évolution démographique que connaît notre pays, les autorités ont cherché à mettre en œuvre des programmes de développement sur le terrain.

Le domaine de la construction est présent partout et comporte certains points noirs tels que l'importante quantité de déchets ainsi que la demande en ressources premières qui sont des ressources limitées.

En raison de la nouveauté du thème, un nombre important d'études approfondies sont encore de recherche afin d'obtenir des propriétés qualitatives du sable recyclé. Nous voulions à travers cet humble étude relever le défi et voir ce que nous pouvons accomplir malgré des conditions décentes.

Une solution à ces problèmes pourrait être de recycler les déchets de construction et de démolition, comme par exemple le béton en granulats, afin de réduire la quantité de granulats naturels GR utilisée.

L'objet de ce travail de fin d'étude est de percevoir l'effet de traitement chimique des granulats recyclés sur la durabilité du béton de sable. Si les résultats sont concluants, l'utilisation de granulats recyclés traités serait une solution aux différents points négatifs relevés précédemment.

Objectifs et plan du travail

Ce mémoire poursuit un objectif principal, c'est d'étudier l'effet du traitement chimique des granulats recyclés sur la durabilité du béton généralement. Pour lequel il est possible de l'utiliser sous forme de sable recyclé dans la fabrication de nouveaux mortiers ce qui permettra dans le futur, si les résultats de ce travail sont concluants, de diminuer l'utilisation de ressources premières ainsi que la quantité de déchets.

Ce travail est divisé en trois grandes parties:

Un état de l'art sur le recyclage des déchets de construction et de démolition ainsi que sur différentes techniques d'amélioration des granulats recyclés et plus précisément le traitement chimique;

Une étude sur le trempage de granulats de sables recyclés de béton dans différentes concentrations de NaHCO_3 plus ciment CRS avec la substitution d'un sable de dune.

Une conclusion reprenant les résultats principaux et donnant des axes de travail pour des études futurs.

La partie concernant les recherches expérimentales contient un descriptif des différents tests effectués, les résultats et une discussion de ces derniers.

Chapitre1:

Etats de l'art

1.1. Introduction

Ce chapitre présente les granulats recyclés ainsi que certaines propriétés avec un aperçu de recherches précédentes. Ensuite, différentes techniques d'améliorations des granulats recyclés sont listées et exposées. Pour finir, certaines propriétés des bétons et mortiers sont expliquées et des résultats de précédentes recherches sur les mortiers à base de granulats de béton recyclé sont présentés.

1.2. Déchets de construction et de démolition

Contexte

En 2016, l'Union Européenne a produit 2533 millions de tonnes de déchets au total. Ce chiffre est à la hausse continuellement depuis le début des relevés en 2004 [1]. Parmi ce volume de déchet, plus d'un tiers provient du secteur de la construction ce qui représente plus ou moins 845 millions de tonnes de déchet par an. En ramenant ce chiffre au nombre d'habitant dans l'Union Européenne en 2016 à savoir 510 millions de personnes [2], cela signifie que chaque habitant produirait environ 1.65 tonne de déchet de construction par an. Ce volume de déchet ne risque pas de diminuer au fil du temps puisque de nombreuses anciennes constructions arrivent au bout de leur cycle de vie.

Il y a deux sources de déchet dans ce domaine : les déchets provenant de surplus, de chutes de matériaux lors de la phase de construction et les déchets provenant de la démolition d'anciens ouvrages.

De plus, comme le montre la figure 1.1, le domaine de la construction est loin devant les autres domaines au niveau de la quantité de déchet produit

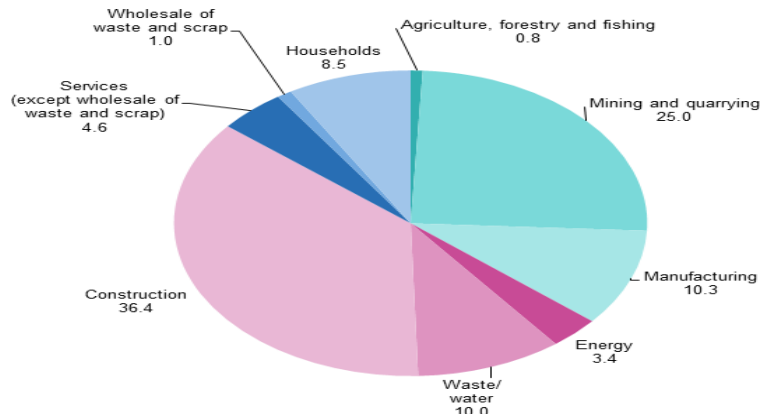


Figure 1.1 – déchets produits par les activités économiques et les ménages (l'Union Européenne; Eurostat statistics Explained le: 30 Avril 2019) [1]

D'après la directive européenne 2008/98/EC, les pays membres doivent prendre des mesures afin que, d'ici 2020, 70 % des déchets de construction non-dangereux soient recyclés ou réutilisés .

Pour ce faire, il est nécessaire de changer l'économie du marché qui est pour l'instant linéaire, une économie dans laquelle un produit en fin de vie est un déchet, en une

économie circulaire qui est une économie dans laquelle un déchet est réutilisé comme matière première dans la m[^]eme filiale ou dans un autre domaine afin de donner une seconde vie aux déchets. La figure 1.2 illustre ces deux principes.

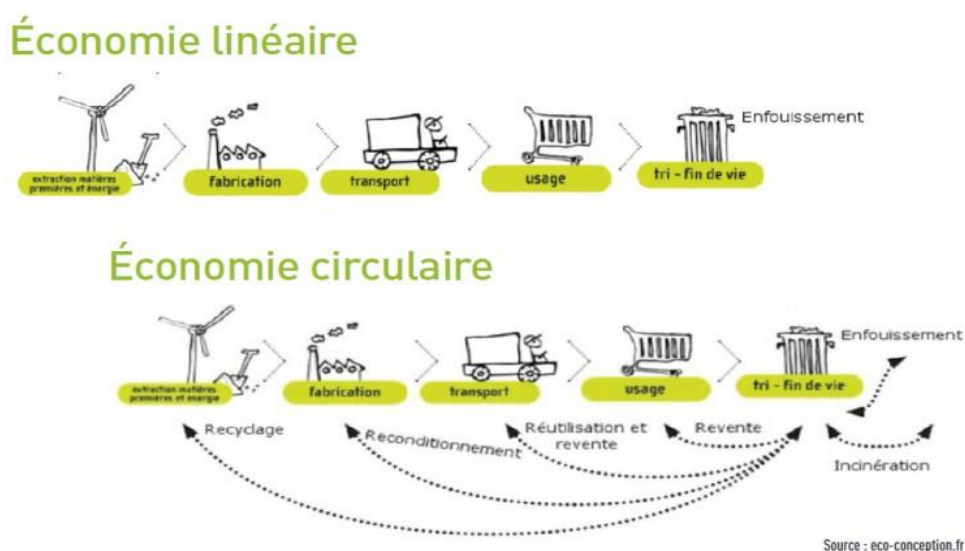


Figure 1.2 – Economies linéaire et circulaire

En plus de diminuer la quantité de déchet, l'économie circulaire permet également de limiter la consommation des ressources premières puisque les déchets sont réutilisés en tant que matière première. Dans le cadre de la construction, ce principe s'illustre par la transformation de certains déchets en remblais ou en granulats.

La figure 1.3 montre la répartition usuelle des déchets de démolition en fonction de la nature des matériaux. [3]

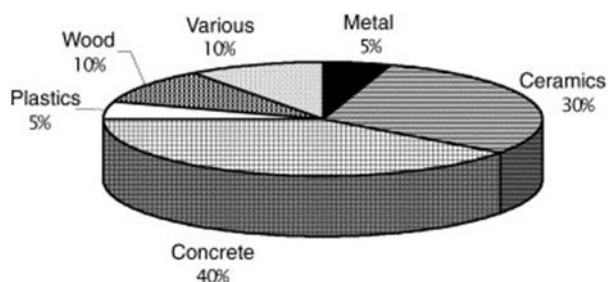


Figure 1.3 – Composition habituelle des déchets de démolition [31]

Cette composition est cependant très variable en fonction des pays comme le montre la FIGURE 1.4.

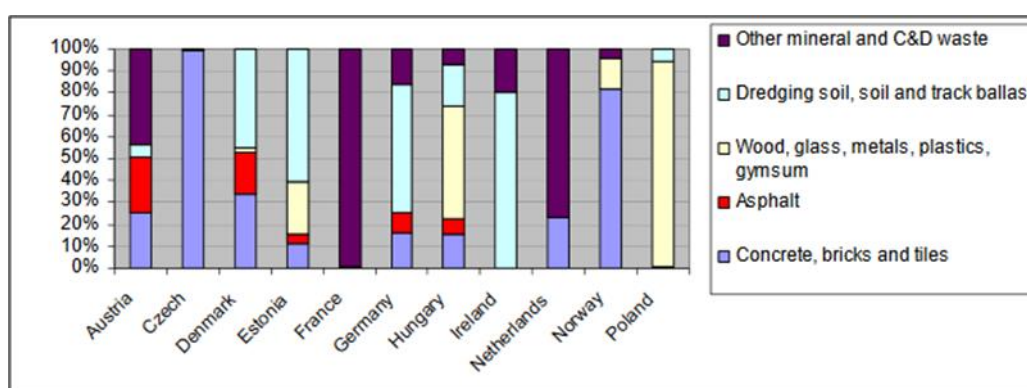


Figure 1.4 – Composition des déchets de construction et de démolition en fonction des pays [32]

Dés lors, pour atteindre un taux de recyclage de 70% des déchets de construction et de démolition dans l'Union Européenne, de nombreux pays ont anticipé et recyclent déjà une partie de leurs déchets de construction et de démolition.

En 2009, le taux de recyclage était de l'ordre de 50% pour la moitié des pays membres de l'Union Européenne [4]. Cependant, le recyclage lié au dragage, au sol et aux ballasts représentent la majorité des efforts actuels. Les autres déchets ne sont toujours que trop peu traités et offrent une solution potentielle pour atteindre l'objectif fixé par la directive européenne.

Les déchets sont, en général, classés en trois catégories: déchets dangereux, déchets non-dangereux et déchets inertes [5]. Les déchets dangereux sont ceux qui sont nocifs pour l'environnement ou pour l'homme en raison de leur composition et/ou de leurs caractéristiques. Dans cette catégorie, se trouvent l'amiante, les peintures ou les solvants par exemple. Les déchets inertes sont des déchets ne se modifiant ou ne se décomposant

pas dans le temps, ne réagissant pas avec l'environnement et ne représentant aucun risque pour l'être humain. Dans cette catégorie, se trouvent le béton, les briques ou le carrelage par exemple. La dernière catégorie des déchets non-dangereux est formée des déchets ne rentrant pas dans les deux premières catégories comme par exemple le plastique, le bois ou encore le métal.

1.3. Processus de recyclage

Les informations concernant cette section se basent sur le document écrit par Delvoie

S. Dans le cadre de la conférence SeRaMCO de 2018 et sont spécifiques aux déchets inertes.

La production de granulats à base de déchet de construction et de démolition est généralement réalisée sur des installations qui sont soit mobiles soit stationnaire [6]. Il faut noter que les installations mobiles sont moins performantes puisque la masse de l'installation est limitée afin de la rendre transportable comparée à une installation fixe.

Il y a deux étapes principales dans le processus de recyclage des déchets de construction et de démolition dans le but d'obtenir des granulats: le broyage et le criblage. Le broyage consiste à réduire la taille des déchets. Le but de cette étape est de réduire les déchets en granulats avec une taille moyenne voulue. Pour ce faire, trois types de broyeurs sont couramment utilisés: les broyeurs à percussion, à mâchoires et à cône. Les avantages et les inconvénients des trois types de concasseur sont repris dans le tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau1.1 – Avantages et inconvénients des différents types de concasseurs [7]

Type de concasseur	Avantages	Inconvénients
Percussion	• Grand facteur de réduction (relation entre la taille des particules entrantes et sortantes) • Produit des granulats avec une bonne géométrie et une bonne résistance	• Produit plus de particules fines • Produit un intervalle de tailles de particules plus étendu
Mâchoires	• Permet de traiter de grands morceaux de béton armé • Produit des granulats dans une gamme de taille plus étroite	• Produit des granulats avec une mauvaise géométrie et une mauvaise résistance
Cône	• Produit moins de particules fines • Produit des granulats dans une gamme de taille plus étroite • Bon compromis entre le facteur de réduction et la production de particules fines	• Produit des granulats avec une mauvaise géométrie et une mauvaise résistance

L'étape de criblage permet d'enlever les matériaux indésirables des granulats obtenus par le concassage comme par exemple le plastique, le bois ou encore le métal. Dans un installation de recyclage, les déchets de construction et de démolition sont tout d'abord triés en fonction de leur composition, de leur origine et de leur taille. Ensuite, ces déchets sont tamisés afin d'enlever les particules fines c'est-à-dire d'un diamètre inférieur à 40 mm

déjà présentes. Après ces deux premières étapes, les déchets sont broyés et nettoyés des résidus ferreux au moyen d'aimant et, à la main pour les autres matériaux non-voulus. Pour ce faire, les granulats passent sur un convoyeur à basse vitesse pour permettre le tri manuel. Dans les installations de dernière génération, les composants légers et les fines sont séparés des granulats plus lourds au moyen d'un flux d'air ou au moyen d'un système de sédimentation. Dans de plus rare cas, les éléments non-ferreux sont séparés du reste des granulats au moyen d'un courant de Foucault.

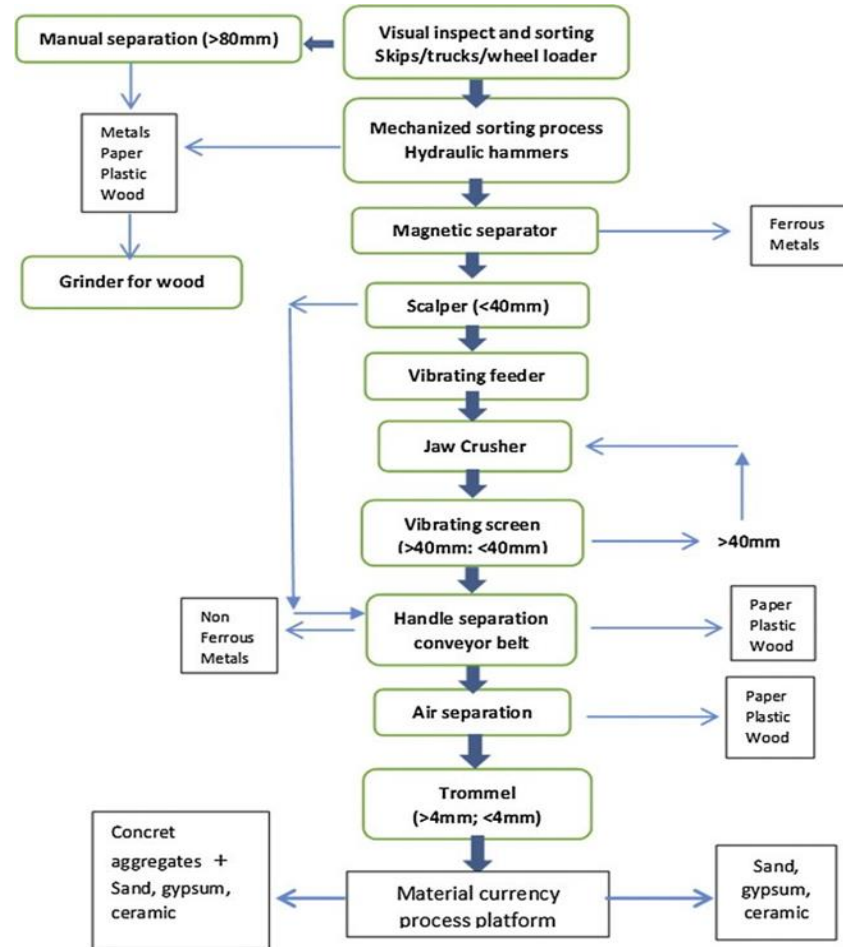


Figure 1.5 – processus de recyclage d’une installation de dernière génération [8]

1.4. Classification des granulats recyclés et utilisation

Les granulats recyclés sont généralement divisés en 4 catégories [9,10];

Granulats de débris de béton qui proviennent de la démolition d’infrastructure du génie civil et de bâtiments en béton et en béton armé



Figure 1.6 –Granulats recyclés de béton [9]

Granulats de débris de maçonnerie qui proviennent de la démolition de bâtiments en brique;



Figure 1.7 – Granulats recyclés de maçonnerie [9]

Granulats d'hydrocarbonés qui proviennent de la démolition des voiries en béton bitumineux et;



Figure 1.8 – Granulats recyclés d'hydrocarbonés [9]

Granulats de débris mixtes qui proviennent de déchets de construction et de démolition non-triés.

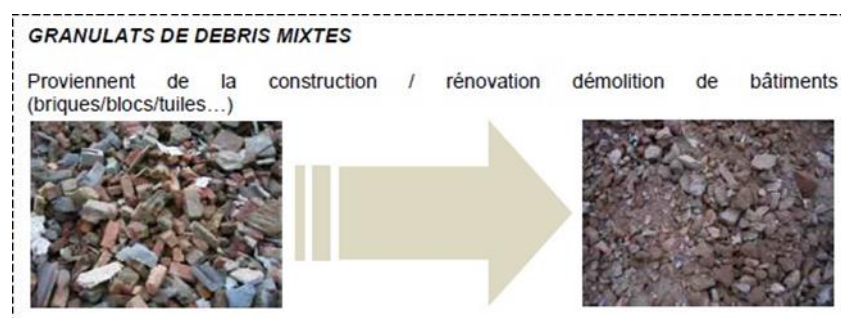


Figure 1.9 – Granulats recyclés de débris mixtes [9]

La suite de ce travail se focalise sur les granulats recyclés de béton.

La norme européenne EN 12620 :2013 régit les caractéristiques minimales que doivent atteindre les granulats et les sables utilisés dans la fabrication de béton [9]. Les valeurs seuils des caractéristiques sont fixées en fonction de l'origine des granulats et des sables, et sont établies dans chaque pays membre.

La substitution des granulats naturels par des granulats recyclés est limitée à 50% pour la fabrication des bétons pour lesquels les armatures n'ont aucun risque d'attaque ni de corrosion c'est-à-dire un béton de classe X0 [10]. Pour les autres classes de béton, le taux de substitution est inférieur. Concernant les éléments de béton préfabriqué, la norme EN 13369 :2018 fixe la quantité de granulats recyclés pouvant remplacer des granulats naturels [9]. Le taux de substitution maximal est fixé également à 50% lorsque l'origine des granulats n'est pas connue. Par contre, le taux de substitution maximal peut atteindre 100% si les granulats proviennent de l'entreprise de préfabrication sous réserve de la vérification des caractéristiques des granulats.

1.5. Fonctionnement de la gestion des déchets en Algérie

Afin d'assurer le bon fonctionnement du service des déchets, plusieurs acteurs interviennent dans les différents segments du service, soit au niveau national, régional ou même local. Cependant, le mode de gestion variera d'un pays à un autre, d'une gestion directe au marché public en passant par la délégation et la concession. Nous développerons ces deux points sur le cas algérien juste ci-après.

1.6. Acteurs de la gestion de service de déchets

La gestion des déchets municipaux est organisée d'une façon générale dans les pays en voie de développement en trois secteurs: le secteur public qui a une responsabilité de contrôle et de mise en application des dispositions de certains services urbains y compris la gestion des déchets solides, le secteur privé formel engagé dans la gestion des déchets notamment, la collecte et le recyclage, et le secteur privé informel engagé dans la réutilisation de certains types de déchets.

1.6. 1.Secteur public

- **Au niveau national**

Actuellement, le Ministère de l'Aménagement du territoire de l'Environnement (MATE) est le premier responsable de la politique nationale de l'environnement. Il a été créé

à la fin des années 1980 avec une dénomination variable dans le temps. Dans les années 1970, la tâche environnementale a été rattachée au Ministère de l'hydraulique puis au Secrétariat d'État aux forêts. Cependant, au cours de la dernière décennie, les directions ministérielles ont été systématiquement transformées (séparées ou fusionnées) à plusieurs reprises dans différents ministères et toutes ont transmis leurs pouvoirs, notamment ceux liés à la gestion des déchets, au Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE). S'agissant de déchets, la direction générale de l'environnement et du développement durable est chargée de:

- Mettre en œuvre une politique moderne de développement durable;
- Déterminer les objectifs en matière de gestion des déchets;
- Élaborer et mettre en place un plan national de gestion intégrée des déchets;
- Délivrer des autorisations des installations des déchets spéciaux;
- Fixer les normes à respecter en cohérence avec la réglementation nationale.

La politique de déchets vise un ensemble d'actions et de mesures notamment:

- Une réduction de la quantité de déchets;
- Une gestion économique et environnementale saine des déchets;
- Permettre une gestion globale et intégrée du secteur des déchets solides;
- Éviter les incompatibilités dans la définition des attributions notamment en séparant le contrôle de l'opérationnel;
- Rechercher une répartition optimale entre les secteurs public et privé visant l'efficacité maximale et en préservant l'équilibre social du secteur;
- Décentraliser l'autorité et la responsabilité vers le plus bas niveau susceptible de les assumer.

La loi relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets prévoit la création de trois organes nationaux intermédiaires:

L'agence nationale des déchets (AND) créée par le décret exécutif n°02-175 du

20mai 2002 et placée sous la tutelle du MATE. Elle permet de disposer d'un instrument adéquat pour apporter de l'aide aux collectivités locales en matière de mise en œuvre de la politique nationale des déchets. L'AND a un statut d'EPIC qui lui confère deux principaux caractères: le premier est commercial en matière d'études et de recherche dans ses rapports avec les tiers tandis que le second lui confère le rôle d'un service public avec l'administration en lui confiant essentiellement l'assistance aux collectivités locales dans la gestion des déchets. Il lui permet également de promouvoir les activités liées à la gestion intégrée des déchets, notamment, les activités de tri, de collecte, de traitement, de valorisation et d'élimination des déchets, d'un côté; et de l'autre, elle contribue à la réalisation d'études, de recherches et de projets de démonstration, en diffusant l'information scientifique et technique et en aidant à la mise en œuvre de programmes de sensibilisation et d'information. Dans ce cadre, l'AND a mené plus de 17 projets de recherche portant sur les déchets en 2004. En plus, de ces missions, elle doit aider à la création de micro-entreprises spécialisées, par des mesures financières et fiscales.

En outre, l'AND est chargée de la mise en place du Système Public de Reprise et de Valorisation des Déchets d'Emballages « Eco-Jem » qui est une structure publique destinée à recevoir des contributions des industriels pour les redistribuer aux acteurs de la collecte, du tri et du recyclage des emballages. L'agence a élaboré des contrats types entre l'AND et les générateurs des déchets d'emballages d'une part, et d'autre part, entre l'AND et les collectivités locales. Ce mécanisme est équivalent au système Eco-Emballage en France. Toutefois, l'AND a développé des outils méthodologiques, génériques et spécifiques applicables à la situation actuelle de la gestion des déchets en Algérie. Elle vise l'assistance et la participation aux études d'optimisation de la collecte ordinaire, de mise en place de la collecte sélective, de création et de gestion des centres d'enfouissement technique (CET). Comme elle élabore des guides de sensibilisation et de communication destinés à différentes cibles (grand public, écoles, institutions, etc.).

L'observatoire national de l'environnement et du développement durable (ONEDD) est créé le 3 avril 2002. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière. L'observatoire est régi par les règles applicables à l'administration dans ses rapports avec l'État, et il est réputé commerçant dans ses relations avec les tiers. L'ONEDD est compétent en matière de collecte, de traitement, de production et de diffusion de l'information environnementale.

Le conservatoire national des formations à l'environnement (CNFE) a été créé en août 2002. Il bénéficie du statut d'EPIC et assure deux missions principales: la formation des différents intervenants publics ou privés dans le domaine de l'environnement, et l'éducation à l'environnement pour le grand public, notamment dans le milieu scolaire. Pour l'année scolaire 2002-2003, plus de 150 établissements ont été retenus dans un premier temps et ont bénéficié d'une campagne de sensibilisation (METAP, 2004)

- **Au niveau régional**

Au niveau régional, le service public local de gestion des déchets est sous la responsabilité des Inspections Régionales de l'Environnement et des Directions de l'Environnement des Wilayas.

Les Inspections Régionales de l'Environnement sont l'un des organes décentralisés de l'État. Elles ont été créées par le décret n° 88-227 du 5 novembre 1988 portant attributions, organisation et fonctionnement des corps d'inspecteurs chargés de la protection de l'environnement. Ces inspections ont pour mission de veiller au respect de la législation et de la réglementation dans le domaine de la protection de l'environnement, de constater et de rechercher les infractions en la matière. Au niveau des wilayas, l'État a créé des services décentralisés chargés de l'environnement.

Les Directions de l'Environnement de Wilaya (DEW), créées par le décret exécutif n°96-60 du 27 janvier 1996, sont venues succéder aux inspections de l'environnement de wilaya. Les directions de wilaya ont trois grands axes d'activité: la coordination, le contrôle et l'information. La coordination nécessite de mettre en liaison les organes de l'État, des wilayas et des communes afin d'établir un programme de protection de l'environnement sur l'ensemble du territoire de la wilaya et de prendre des mesures visant à prévenir toutes les formes de dégradation de l'environnement (pollutions, nuisances, érosion des sols, etc.). Le contrôle en matière de la délivrance des permis, des autorisations et des visas dans le domaine de l'environnement prévus par la législation. En plus, elles complètent ce contrôle par des mesures qui peuvent améliorer le cadre et la qualité de la vie des populations, des propositions en matière de législation et réglementation environnementale. Le troisième axe est celui de l'information qui permet aux directions de l'environnement de promouvoir des actions d'information, d'éducation et de sensibilisation en matière d'environnement.

En plus de ces missions, les DEW s'occupent des installations classées, elles veillent au respect des prescriptions spécifique (production, stockage, traitement) et contrôlent les procédures d'auto-surveillance des établissements producteurs, transporteurs, éliminateurs de déchets dangereux, ainsi que leurs déclarations annuelles. Autrement dit, la DEW dispose d'un pouvoir de police: des inspections, des mises en demeure, des procès-verbaux, des fermetures administratives sont prévus en cas d'infraction.

D'autre part, les représentants de l'État dans les wilayas jouent également un rôle très important par le contrôle de déchets: les walis sont compétents en matière d'approbation des schémas directeurs de la gestion des déchets urbains des communes relevant de leurs territoires. En plus, ils autorisent les délibérations des assemblées populaires communales (APC) concernant le montant de la TEOM applicable sur les usagers du service d'enlèvement et de traitement des déchets. Le wali est responsable des autorisations relatives aux installations de traitement des déchets ménagers et assimilés.

- **Au niveau local**

Le niveau local dans cette étude fait référence à deux structures compétentes en matière de service local des déchets: les communes et les groupements de communes ou l'intercommunalité. La réglementation en vigueur rend les communes et les groupements de communes responsables de l'ensemble des déchets produits sur leur territoire. L'article 07 du code communal prévoit que la commune a la charge de préservation de l'hygiène et de la salubrité publique notamment en matière d'évacuation et de traitement des eaux usées et des déchets solides urbains. Afin qu'elles assument pleinement cette responsabilité, elles doivent organiser sur leur territoire un service public qui permet de satisfaire les besoins collectifs des habitants en matière de collecte, de transport et de traitement des déchets. La réglementation impose également au secteur des déchets un contrôle important par la puissance publique. Les communes sont tenues d'élaborer et de mettre en œuvre des plans communaux de gestion des déchets municipaux comme des instruments de planification et de gestion, en plus, elles veillent au respect de la teneur des études relatives à ces plans de gestion. Elles imposent les conditions de présentation des déchets à la collecte, elles fixent les normes de ramassage et l'évacuation des déchets, et elles établissent les cahiers des charges qui précisent les obligations auxquelles doivent être soumises les entreprises chargées du ramassage. L'APC fixe le montant de la TEOM prévue par la loi de finances de 2002. Les APC ont la

compétence de la délivrance des autorisations de toute installation de traitement des déchets inertes.

La seconde structure au niveau local est le regroupement des communes qui est mis en place dans le cas où les communes ne disposent pas des moyens suffisants pour assurer la gestion des déchets. Celles-ci peuvent se regrouper ou s'associer pour une partie ou la totalité de la gestion des déchets ménagers. L'ensemble de l'organisation est centré autour des communes qui gèrent directement les décharges. Le décret n° 84- 378 du 15 décembre 1984 stipule que « L'Assemblée populaire communale organise, dans les conditions définies (...), sur son territoire, soit directement, soit en association par l'intermédiaire d'organismes intercommunaux et/ou appropriés, un service de collecte et d'élimination des déchets solides urbains, à l'exclusion de certains déchets.»

L'article 215 du nouveau code de la commune adopté en 2010 prévoit que deux ou plusieurs communes limitrophes peuvent s'associer pour aménager ou développer en commun leurs territoires et/ou gérer ou assurer des services publics de proximité conformément aux lois et règlements. L'intercommunalité permet aux communes de mutualiser leurs moyens et de créer des services et établissements publics communs.

1.6.2. Secteur privé

La participation du secteur privé dans la gestion des déchets solides en Algérie est très limitée. Afin de promouvoir cette participation, la loi de 2001 prévoit l'ouverture du service public de gestion des déchets urbains à l'investissement privé et à la concession (cf. 2.2.4. Délégation de service public). Étant donné l'insuffisance de leurs moyens en matière d'équipements appropriés, quelques communes ont été amenées à déléguer la collecte des déchets de certains de leurs quartiers. Deux communes de la wilaya d'Alger [Bordj El Kiffan et Kouba] ont procédé à la concession d'une partie de la collecte des déchets ménagers et assimilés (DMA) à des opérateurs privés. Il en est de même pour la commune de Tizi Ouzou. Dans le domaine du recyclage et de la récupération des déchets, quelques opérateurs privés agissent actuellement, et des petites entreprises ont été créées dans le cadre de l'ANSEJ (Agence nationale de soutien à l'emploi des jeunes) (plus de 50 entreprises en 2005), de l'ANGEM (Agence nationale de gestion du microcrédit créée en 2004) et de l'ADS (Agence de Développement Social) Par ailleurs, des entreprises participent dans la réutilisation des déchets triés dans le processus de production comme matière première. En 2008, plus de 873

récupérateurs agréés et répartis sur l'ensemble du territoire national ont été recensés (Sweepnet, 2010).

1.6.3. Secteur informel

Troisième secteur intervenant dans la récupération des déchets en Algérie est le secteur informel qui constitue une importante activité économique. Il est relativement structuré dans deux dimensions: la première verticale allant de la récupération dans les poubelles et décharges jusqu'à l'industrie de recyclage, et la seconde horizontale basée sur des filières par type de déchet récupéré (papier, plastique, métaux). Ce secteur permet de:

- valoriser un grand nombre de déchets,
- réduire les coûts de transport et de collecte pour les collectivités,
- donner un revenu à de nombreuses personnes,
- augmenter la capacité des décharges,
- assurer la matière première pour certaines entreprises.

1.7. Déchets inertes

Les déchets inertes ce sont notamment, les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge. Ces déchets proviennent de l'exploitation des mines, des carrières, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, et ils ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et à l'environnement. Et elle prévoit que la gestion de ce type de déchets relève de la gestion communale.

En absence d'un service fiable de la collecte des déchets inertes et l'inexistence des décharges destinées à ce type de déchets ou des CET de classe II le recensement de la quantité produite est impossible à l'heure actuelle. Les principales sources de ces déchets sont notamment les chantiers de bâtiment, de travaux publics et de particuliers qui réhabilitent leurs maisons. Ils sont composés essentiellement de gravats, décombres, déblais et autres rebuts de démolition et de chantiers (bois, acier, plâtres...). Face à cette situation des dépotoirs sauvages sont apparus dans tous les communes et parfois même au sein des quartiers et des villages. Une estimation a été effectuée par le Centre National d'Étude et de Recherche Intégrée en Bâtiment (CNERIB) sur les déchets inertes de quatre wilayas de la

région de centre⁰¹, il l'estime entre 300 mille à 500 mille t/an dont 12% d'acier et 40% de béton. En 2003, suite au séisme qui a touché la wilaya de Boumerdès plus de 2,5 M de tonnes de déchets inertes ont été enregistrées (MATE, 2005). À l'image des autres villes algériennes, la wilaya de Constantine compte plus de 64,8 t /an des déchets inertes (DEWC, 2009). Cependant, la valorisation est basée uniquement sur la réutilisation de ce type de déchets dans le remblayage. Le PROGDEM a pour objectif de créer des CET de classe II réservés aux déchets inertes. En France, les entreprises de la construction ont généré 254 M de tonnes de déchets en 2008, soit 73,6% du total des déchets produits par les activités économiques (CGDD, 2010).²⁶

Généralement la production annuelle des déchets inertes en Algérie représentaient environ 11 millions de tonnes en 2016 (SNGID 2035). Avec une estimation cette production pour l'année 2020 à plus de 13 millions de tonnes. Cette quantité sera évaluée à 27 millions de tonnes en 2035.

On a constaté qu'il y a un nombre insuffisant de centre de décharge, par conséquent les autorités locales encouragent les générateurs à déverser leurs déchets dans les zones de gravats afin d'éviter la création de plusieurs décharges sauvages qui pourraient dégrader le paysage et freiner le développement urbain.

En 2020, 30 centres de décharge des DI ont été récents. 27 centres sont opérationnels alors que 2 sont achevés non opérationnels et 1 fermé. [39]

⁰¹ En 2012, 54 projets de réalisation de CET de déchets inertes sont inscrits parmi lesquels 5 CET sont achevés (Blida, Djelfa, Skikda, Tiaret et M'sila) et 3 sont en phase d'exploitation en l'occurrence celui de Bouabbaz (Wilaya de Skikda), Djelfa, et Mouilha (wilaya de M'sila 25.Alger, Blida, Boumerdès, Tipaza.).

1.8. Granulats recyclés de béton

1.8.1. Définition et Composition

Les granulats recyclés de béton sont généralement divisés en deux parties en fonction de leur dimension. Les granulats plus grands que 5 mm sont dits grossiers et les granulats plus petits que 5 mm sont dits fins.

Les granulats recyclés de béton sont composés de deux matériaux:

- Granulats naturels.
- Pâte de ciment.

La figure 2.10 montre les deux constituants d'un granulat recyclé de béton. Les granulats naturels sont numérotés "1" et la pâte de ciment "2". En général, les granulats naturels ont une plus faible porosité que la pâte de ciment. Dès lors, les caractéristiques des granulats recyclés de béton sont plus influencées par les caractéristiques de la pâte de ciment les constituant que par celles des granulats naturels. Ceci signifie que la qualité des granulats recyclés de béton dépend de la qualité et de la quantité de pâte de ciment les constituant. Leur qualité est aussi moins bonne que celle des granulats naturels puisque la pâte de ciment est considérée comme une pierre de mauvaise qualité.



Figure 1.10 – Constitution d'un granulat recyclé de béton [11]

Selon les recherches de Zhao [11], la proportion de pâte de ciment dans un granulat recyclé de béton augmente lorsque la taille du granulat diminue. Pour déterminer la teneur en

pâte de ciment, Zhao a développé une méthode basée sur la dissolution de la pâte de ciment enrobant les granulats naturels par une solution d'acide salicylique qui permet de dissoudre uniquement la pâte de ciment sans attaquer les granulats naturels.

De plus la qualité d'un granulat recyclé de béton dépend de la qualité du béton d'origine ainsi que des contaminants. Plus, la qualité de la pâte du béton est bonne, moins la pâte de ciment entourant les granulats est poreuse et a de meilleurs comportements mécaniques. La qualité du béton d'origine dépend du rapport E/C et également du type de ciment utilisé. En présence de contaminants, c'est-à-dire de matériaux d'autre nature comme, par exemple, le plâtre ou le verre mais également des chlorures ou des sulfates dans les déchets de béton, les propriétés des granulats recyclés de béton diminuent [59].

1.8.2. Propriétés des granulats de béton recyclé

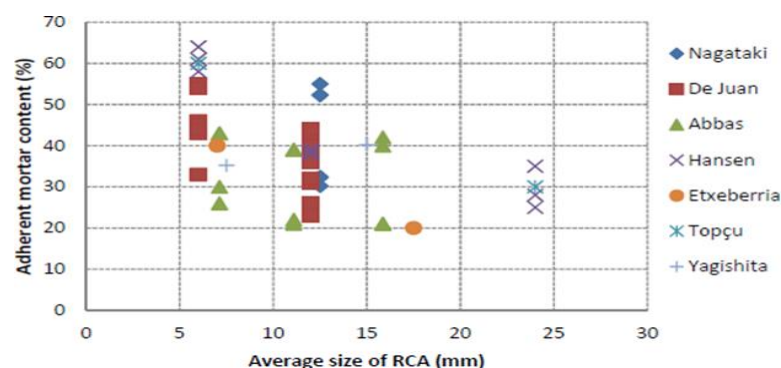
Cette section présente les principales caractéristiques des granulats recyclés de béton testées lors de cette étude et donne des résultats de précédentes études.

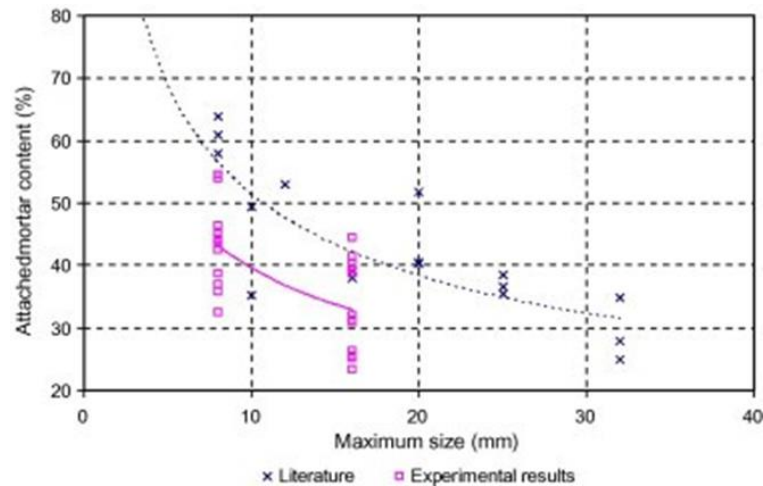
1.9. Granulométrie

La granulométrie est une propriété indiquant les dimensions des granulats se trouvant dans un calibre donné.

L'étude APERROUT [12] montre que la granulométrie dépend du moyen de concassage. Lorsque le broyage des déchets de construction et de démolition est effectué au

(a) Étude de Zhao .





(b) Étude de De Juan .

Figure 1.11 – Pourcentage de pâte de ciment en fonction de la taille moyenne des granulats recyclés de béton

moyen d'un concasseur à mâchoires, la proportion de granulats grossiers est plus importante qu'en utilisant un concasseur à percussion qui offre une granulométrie plus linéaire pour un calibre donné. De plus, la diminution de la puissance du concasseur à percussion permet de réduire la fraction fine.

Zhao et al. [13] ont montré que la quantité de granulats ayant une dimension inférieure à 1 mm est plus grande pour les granulats recyclés issus de hourdis que ceux provenant de bloc. L'allure des courbes granulométriques de ces granulats recyclés est similaire à celles obtenues dans l'étude APERROUT [12] utilisant également un concasseur à mâchoires.

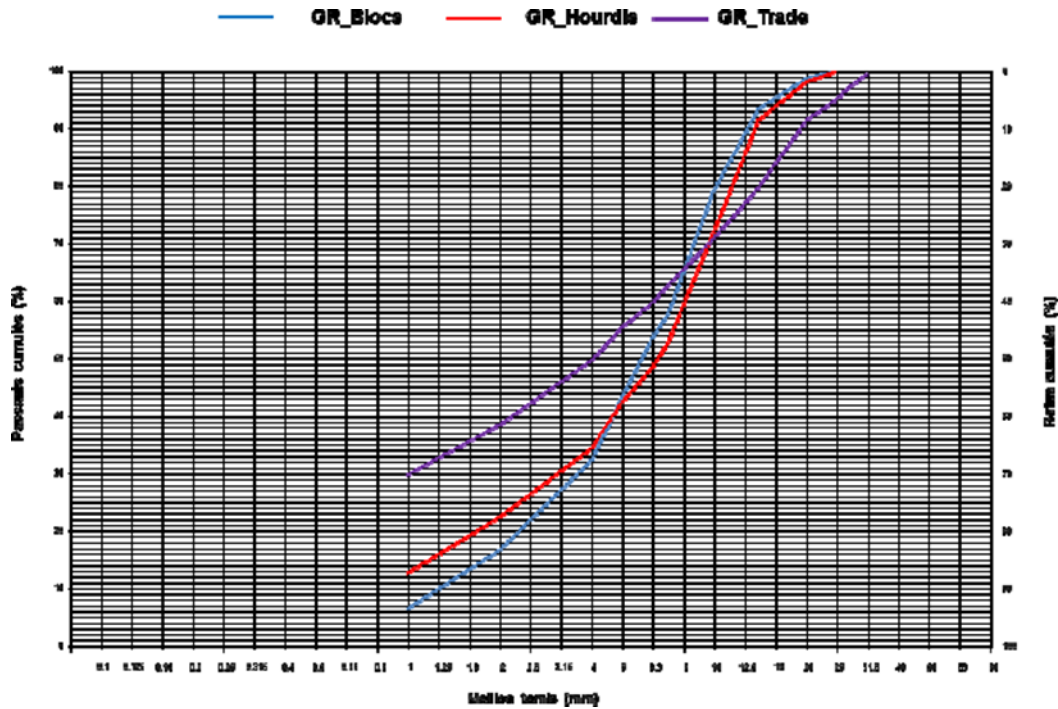


Figure 1.12 – Courbes granulométriques des granulats recyclés de béton de l'étude de zhao et al.

1.9.1. Masse volumique

La masse volumique des granulats est le rapport de la masse sur le volume des granulats. Cette propriété peut être représentée sous différentes formes: la masse volumique absolue, la masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve et la masse volumique réelle saturée à surface sèche.

La masse volumique absolue est le rapport entre la masse des granulats sur le volume des granulats sans prendre en compte le volume entre les grains et sans prendre en compte le volume des pores ouverts des granulats.

La masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve est le rapport entre la masse des granulats après séchage à l'étuve et le volume des granulats sans prendre en compte le volume entre les grains .

La masse volumique réelle saturée à surface sèche est le rapport entre la masse des granulats et la masse de l'eau présente dans les pores ouverts et le volume des granulats sans prendre en compte le volume entre les grains [14].

Les granulats recyclés de béton ont généralement une masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve plus faible que les granulats naturels puisque la pâte de ciment est plus poreuse que les granulats naturels.

De Juan et Al ont obtenu la même conclusion à savoir que la masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve diminue lorsque la teneur en pâte de ciment augmente.

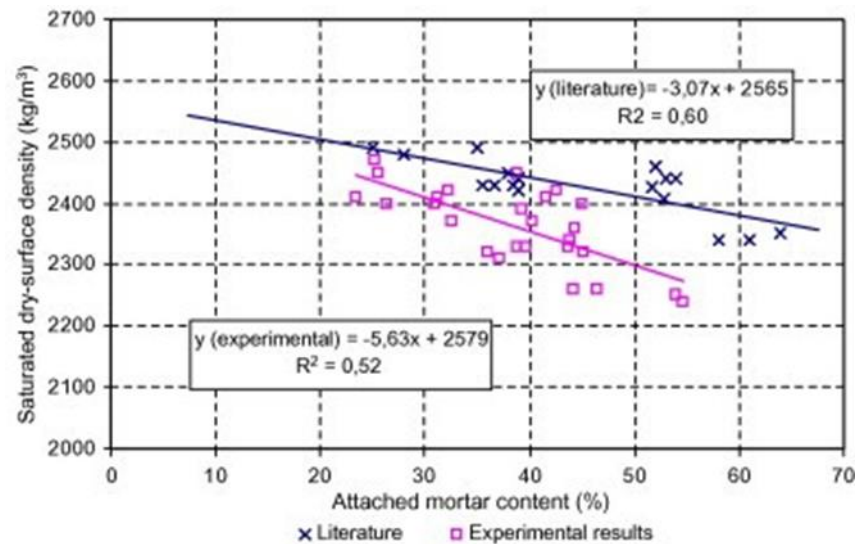


Figure 1.13 – Masse volumique réelle déterminée après séchage à l'étuve en fonction de la teneur en pâte de ciment

Donc, la masse volumique du béton conventionnel à l'état frais est connue pour être aux alentours de 2400 kg/m³. Cependant, les bétons à base de granulats recyclés avec un taux de substitution de 100% ont une masse volumique clairement inférieure qui peut être entre 2000 et 2200 Kg/m³ (Hansen, et al., 1983). Plus, le taux de substitution augmente plus la masse volumique diminue, et ce due à la faible masse volumique des granulats recyclés qui le constituent. (Omary, et al., 2016)

1.9.2. Absorption d'eau

L'absorption d'eau est la quantité d'eau qu'absorbe les granulats recyclés due à la pénétration de l'eau dans les pores ouverts. Cette absorption pour les granulats recyclés de béton dépend de l'absorption d'eau de la pâte de ciment et des granulats naturels ainsi que de la proportion entre ces deux constituants [13].

Zhao et al ont montré que l'absorption d'eau est plus élevée lorsque le calibre des granulats recyclés de béton est petit.

Également selon Zhao l'absorption d'eau des granulats recyclés est supérieure à celle des granulats naturels ce qui s'explique par la porosité de la pâte de ciment.

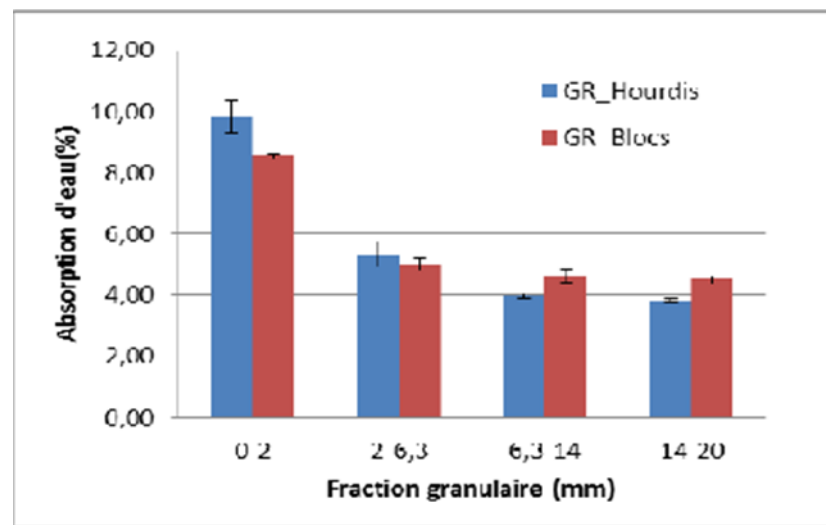


Figure 1.14 – absorption d'eau en fonction de la fraction granulaire

Gomez-Soberon et Deodonné ont montré également que l'absorption d'eau des granulats naturels est inférieure à celle des granulats recyclés de béton et aussi que plus la fraction granulaire est petite, plus l'absorption d'eau est grande. Wagih et al. [49] et Agrela et al. sont arrivés aux mêmes conclusions.

TABLEAU1.2 – Propriétés des granulats recyclés et des granulats naturels [16]

Property	RCA			NA		
	10 - 20	5 - 10	0 - 5	10 - 20	5 - 10	0 - 5
Dry specific gravity [kg/m^3]	2280	2260	2170	2570	2640	2570
Specific gravity (surface dry) [kg/m^3]	2410	2420	2350	2590	2670	2600
Water absorption [%]	5.828	6.806	8.160	0.876	1.134	1.490

De Juan et al. ont montré que l'absorption d'eau des granulats recyclés de béton augmente lorsque la teneur en pâte de ciment augmente.

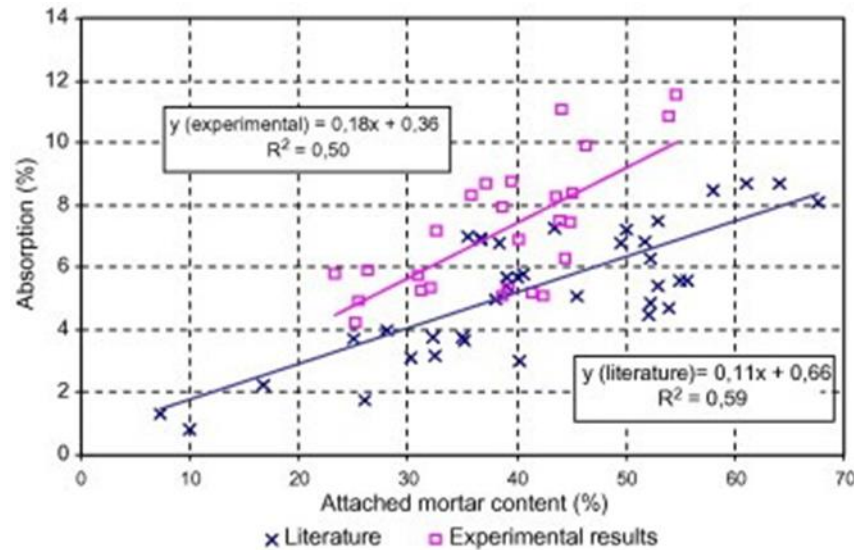


Figure 1.15– absorption d'eau en fonction de la teneur en pâte de ciment

1.10. Techniques d'amélioration de la qualité des granulats recyclés

En synthèse des travaux examinés à la section précédente, il est observé que la pâte de ciment est le point faible dans les granulats recyclés de béton. Pour améliorer les granulats recyclés de béton, il faut dès lors, réduire la quantité de pâte de ciment ou améliorer ses propriétés. Cette partie explique différentes solutions pour améliorer la qualité des granulats recyclés.

Différentes méthodes de séparation entre les granulats naturels et la pâte de ciment existent et se basent sur des principes soit mécanique, soit chimique, soit physique. Ces méthodes se fondent sur la différence de propriétés entre les granulats naturels et la pâte de ciment ou sur la zone de transition interfaciale qui présente une grande porosité [17]. Pour commencer, les méthodes de séparation entre les deux constituants des granulats recyclés de béton sont expliquées et, ensuite, une méthode améliorant les caractéristiques de la pâte de ciment.

1.10.1. Méthodes mécaniques

- **Séparation par chocs**

La méthode de séparation par chocs se base sur l'essai Los Angeles qui consiste à étudier la résistance des granulats en les fragmentant dans un cylindre contenant des boulets en acier. L'efficacité de cette méthode dépend de la quantité de granulats à traiter, du nombre de boulets utilisés, de la vitesse de rotation du cylindre et de la durée du

traitement. Pour avoir une séparation efficace, il suffit d'augmenter le temps de traitement mais cette méthode est fortement "énergivore"

- **Séparation par abrasion**

La méthode de séparation par abrasion se base sur l'essai micro-Deval qui consiste à mesurer l'abrasion des granulats en mettant le matériau dans un récipient rempli d'eau et de billes d'acier. Le récipient est, ensuite, mis en rotation pour abraser le matériau testé. Cette méthode dépend également de la durée de traitement mais est moins efficace que la séparation par chocs. Malgré cela, la séparation par abrasion a pour avantage de garder les granulats naturels non-fragmentés [17]

1.10.2 Méthode chimique

La méthode chimique (notre choix dans cette étude) se base sur la différence de résistance à naturels et de la pâte de ciment.

- **l'acide des granulats**

Le traitement consiste à plonger les granulats recyclés de béton dans une solution acide afin de dissoudre au moyen d'une réaction acide-base la pâte de ciment et de rincer les granulats obtenus après traitement pour enlever toute trace d'acide. Néanmoins, il est nécessaire de faire attention à la nature de l'acide utilisé et à la nature des granulats naturels car ces derniers, pouvant être calcaires, risquent également d'être détériorés si l'acide utilisé est puissant. Il est conseillé d'utiliser de l'acide salicylique lorsque les granulats naturels sont calcaires.

1.10.3. Méthodes thermiques

- **Haute température**

La méthode de traitement à haute température consiste à chauffer les granulats afin que trois phénomènes permettent la séparation entre la pâte de ciment et les granulats naturels. Les trois phénomènes sont les suivants:

Ecaillage par gradient thermique: La température de la surface des granulats recyclés de béton est à haute température alors que le noyau de ces derniers est à une température plus basse ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

Ecaillage par pression interne: L'eau présente dans les pores des granulats recyclés passe sous forme gazeuse grâce à l'augmentation de température. Une partie de cette vapeur d'eau ne pouvant s'échapper, montent en pression et induisent des pressions internes qui fissurent la pâte de ciment.

Perte des propriétés mécaniques de la pâte de ciment: La pâte de ciment perd ses propriétés mécaniques à haute température et se détériore ce qui libère les granulats naturels.

- **Basse température**

La méthode de traitement à basse température repose sur les actions liées au cycle gel-dégel. Les granulats recyclés de béton sont d'abord saturés puis sont exposés à plusieurs cycles gel-dégel [17]. Les cycles gel-dégel vont mettre à contribution deux phénomènes qui sont:

Ecaillage par gradient thermique : La température de la surface des granulats recyclés de béton est à basse température alors que le noyau de ces derniers est à une température plus élevée ce qui induit des contraintes au sein des granulats recyclés. Ces contraintes provoquent la fissuration des granulats recyclés de béton.

Augmentation de volume de l'eau: L'eau en présence dans les pores passe de la phase liquide à la phase solide. L'eau est le seul élément qui, en passant de sa forme à sa forme solide, augmente son volume. Le volume des pores étant fixé, l'augmentation de volume de l'eau engendre des contraintes internes qui provoquent l'éclatement de la pâte de ciment.

- **Autres méthodes**

1.11. Traitement par vibrations ultra-sonores

Le traitement par vibrations ultra-sonores se base sur la propagation des ondes sonores à haute fréquence et aux interférences se créant à l'interface de deux matériaux de natures différentes [17]. Au niveau de la zone de transition interfaciale c'est-à-dire la zone de transition entre le granulat naturel et la pâte de ciment, une partie des ondes est réfléchi et des interférences se créent. Ces interférences créent des pressions et, dès lors, des contraintes qui fissurent la pâte de ciment au niveau de la zone de transition ce qui permet d'enlever la pâte de ciment. La figure 2.17 illustre le principe de ce traitement.

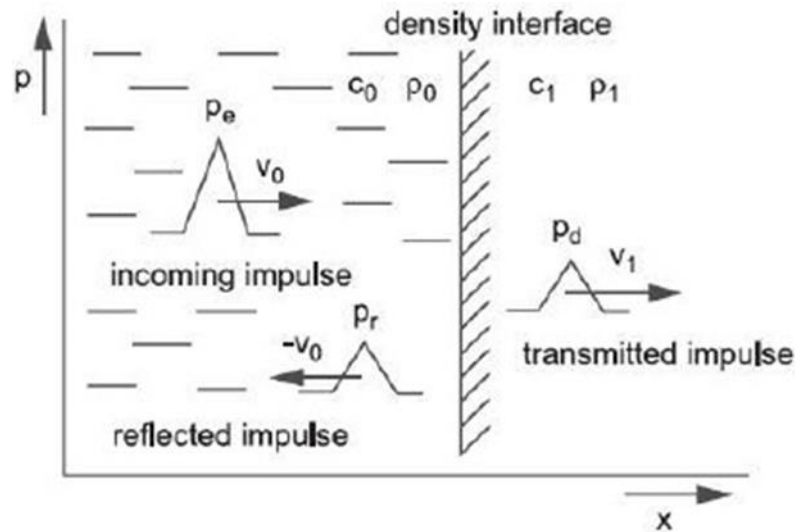


Figure 1.16 – Principe du traitement par vibrations ultra-sonores [18]

Pour optimiser cette méthode, il est conseillé d'avoir une répartition régulière des ondes autour des granulats recyclés ce qui permet d'améliorer l'efficacité du traitement et à réduire la dégradation des granulats naturels d'origine. Cette technique donne de meilleurs résultats que les méthodes de concassage au moyen de broyeur mais dépend fortement de la taille des granulats traités. Par contre, cette méthode consomme une quantité très importante d'énergie.

1.11.1. Traitement par micro-ondes

Le traitement par micro-ondes est plus à considérer comme un pré-traitement qu'un traitement en lui-même car il est à réaliser avant le concassage traditionnel. Le principe de cette méthode se base sur la différence de sensibilité aux micro-ondes de la pâte de ciment et des granulats naturels constituant les granulats recyclés de béton. Il y a alors des gradients de température qui se créent dans les granulats recyclés qui vont engendrer des contraintes et créer des micro-fissures dans la pâte de ciment. De plus, si de l'eau est présente dans les pores des granulats recyclés de béton, cette eau va chauffer et passer de sa phase liquide à sa phase gazeuse qui créera des contraintes supplémentaires puisque la vapeur d'eau a une masse volumique plus grande que l'eau liquide. L'avantage de ce traitement est qu'il dégrade moins les granulats naturels comparé au traitement à haute température classique puisque la durée du traitement est plus courte et la température est moins élevée. Il faut noter que ce traitement est plus efficace en présence de granulats grossiers que de granulats recyclés fins [19]

1.11.2. Traitement par jet hydraulique

Le traitement par jet hydraulique se base sur la technique de l'hydrodémolition qui consiste à l'utilisation d'un jet d'eau sous pression dans le but de détacher le béton des armatures d'acier du béton armé. La pression du jet d'eau varie normalement entre 200 et 3000 bars [17]. Cette méthode repose sur deux principes:

Impact: Le jet d'eau sous haute pression entre en contact avec les matériaux ce qui libère une grande quantité d'énergie sur une petite zone. Cette énergie provoque de grandes contraintes sur les matériaux qui se désagrègent.

Pression dans les pores: Lorsque le matériau traité est poreux, l'eau sous pression s'engouffre dans les pores et crée des contraintes au sein de ce dernier. Ces contraintes vont entraîner la destruction du matériau.

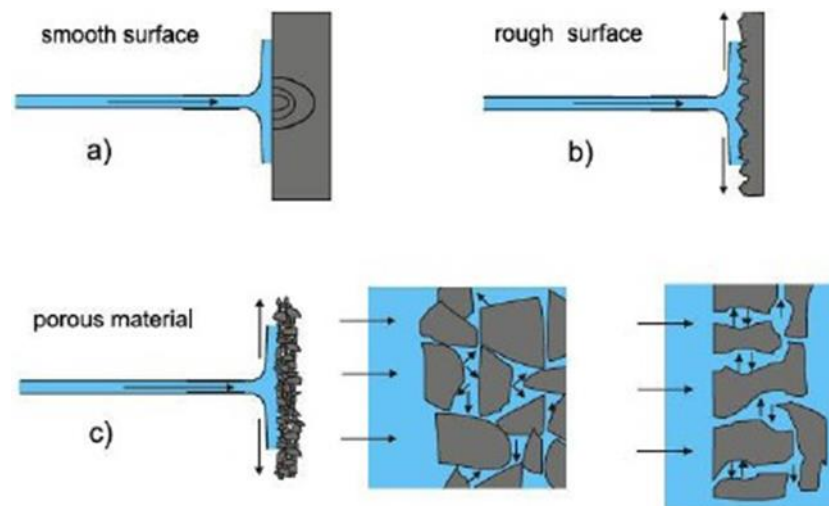


Figure 1.17 – Interaction entre l'eau sous pression et le matériau traité [20]

Ce traitement dépend de la pression utilisée ainsi que la distance entre le matériau traité et la buse. Il est nécessaire de bien régler ces paramètres afin de ne pas endommager les granulats naturels si l'énergie à dissiper est trop grande.

1.11.3. Electro-fragmentation

L'électro-fragmentation consiste à faire passer un courant électrique dans un matériau multiphasique. Le courant électrique, en passant à travers le matériau, polarise les différents constituants. La polarisation dépend de la nature des constituants. Un déséquilibre entre les charges positives et négatives se crée à l'interface entre les granulats naturels et la pâte de

ciment et provoque la création locale de plasma. Cette création de plasma est accompagnée d'une dilatation thermique qui provoque une onde de choc radial et libèrent les granulats naturels de la pâte de ciment [21]

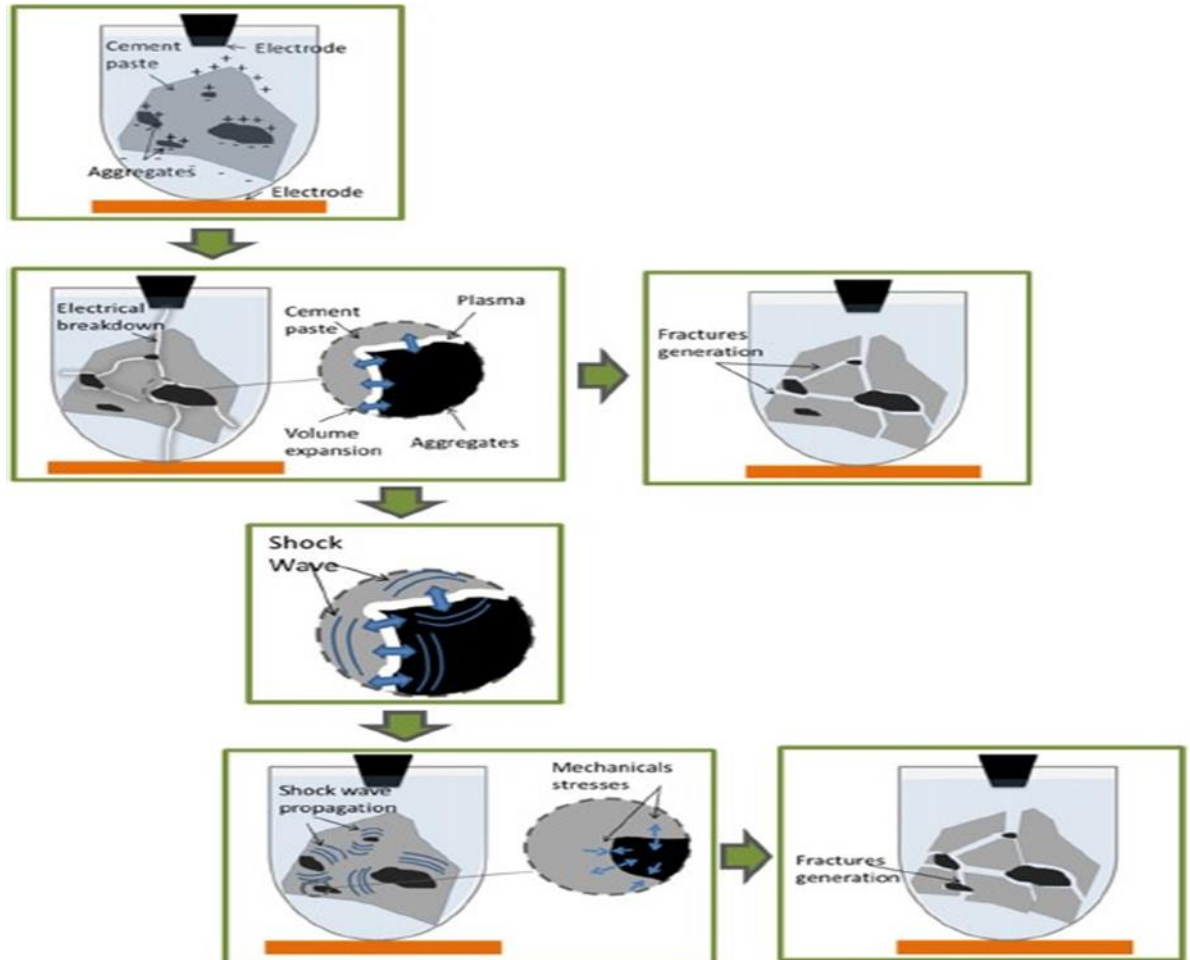


Figure 1.18 – Principe de l'électro-fragmentation

1.11.4. Carbonatation forcée

La carbonatation forcée est une technique qui permet d'améliorer les propriétés de la pâte de ciment constituant les granulats recyclés de béton. Elle se base sur une réaction naturelle se produisant entre la matrice cimentaire du béton et le CO_2 présent dans l'air. La concentration en CO_2 dans l'atmosphère varie généralement entre 0.03% et 1%. La limite basse est d'application dans les milieux ruraux et la limite haute peut être atteinte dans des villes fortement polluées. L'augmentation des rejets en CO_2 ne fait qu'augmenter les valeurs de concentration vers la hausse [22].

Les différentes étapes de la réaction chimique entre le CO_2 et la pâte de ciment du béton sont résumés comme suit:

Le CO₂ présent dans l'air va se dissoudre dans l'eau présente dans le béton pour former de l'acide carbonique.

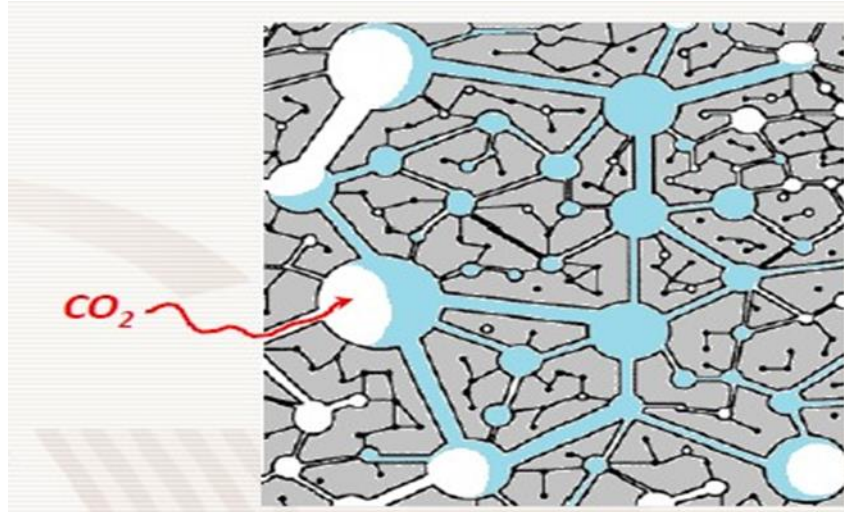
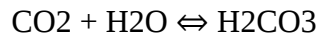
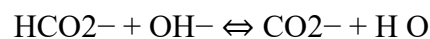
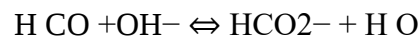


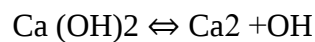
Figure 1.18 – Dissolution du CO₂ [23]

L'acide carbonique H₂CO₃ est instable dans un milieu alcalin comme le béton dont le pH est de l'ordre de 13 et se dissocie sous deux formes.



La dissolution du CO₂ a pour conséquence de diminuer le pH du béton.

A cause de la diminution du pH, la portlandite Ca(OH)₂ se dissout afin de rétablir l'équilibre acide-base.

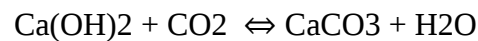


Les cations Ca²⁺ réagissent ensuite avec les anions CO₃²⁻ pour former du carbonate de calcium CaCO₃.

En plus de la réaction de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)₂, le CO₂ réagit avec les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et les aluminates de calcium hydratés (C-A-H) selon les réactions suivantes.

Ces derniers phénomènes chimiques ont, par contre, une cinétique plus lente que la réaction avec la portlandite.

De manière simplifiée, la réaction de carbonatation peut s'écrire



1.12. Impact des granulats recyclés sur les propriétés des bétons/mortier

1.12.1. Ouvrabilité

Zhao [11] a montré que le taux d'humidité des granulats recyclés au moment de la fabrication des mortiers a un impact sur l'ouvrabilité. Les résultats au test d'étalement des mortiers préparés avec des granulats secs montrent toujours un plus grand étalement

que ceux préparés avec des granulats saturés pour un même rapport E/C. Il a émis l'hypothèse que l'absorption des granulats secs dans le mortier est plus faible et/ou ce fait de manière plus lente que l'absorption d'eau déterminée à l'aide des procédures standards. Cela peut s'expliquer par le fait qu'une partie des pores des granulats secs soit bouchée par des particules de ciment mais également par le fait que les grains de ciment augmentent la viscosité de l'eau et empêche l'absorption de l'eau par les granulats.

Wagih et al. [15] ont montré que l'ouvrabilité des bétons à base granulats recyclés de béton est inférieure que l'ouvrabilité des bétons ordinaires si on ne prend pas en compte l'absorption d'eau des granulats recyclés de béton qui est nettement supérieure que celle des granulats naturels utilisés généralement dans la fabrication des bétons et mortiers.

Batayneh et al. [24] ont expliqué que la diminution d'ouvrabilité des bétons à base de granulats recyclés par rapport au béton classique est liée à la forme plus anguleuse des granulats recyclés de béton et de leur absorption d'eau qui est plus grande que celle des granulats naturels.

Zhang et al. [25] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton diminue l'ouvrabilité des mortiers mais dans une mesure moins grande pour les granulats carbonatés puisque la carbonatation diminue l'absorption d'eau de la pâte de ciment composant les granulats recyclés de béton.

Lors de son étude, Deodonne [20] est arrivé à la même conclusion à savoir que l'utilisation de granulats recyclés de béton a un impact négatif sur l'ouvrabilité même en prenant en compte l'absorption d'eau élevée des granulats recyclés dans la fabrication des bétons.

Tahar et al. [27] déduisent également de leur étude que l'utilisation de granulats recyclés de béton dans la fabrication de mortiers diminue l'ouvrabilité de ces derniers.

Dans ce contexte on va parler sur Influence de la géométrie: morphologie et distribution granulaire;

Les granulats recyclés obtenus par concassage ont une rugosité/texteure et une angularité importante qui entraînent une augmentation de la demande en eau des granulats (absorption des grains et compacité du squelette) (Laboratoire central des ponts et chaussées (France), 2001); (Buyle-Bodin,F and Hadjieva-Zaharieva, 2002);(Evangelista and Brito, 2009). L'utilisation de granulats recyclés, dont les dimensions sont supérieures à 4 mm et d'origines diverses, a révélé que l'augmentation de l'angularité et/ou de l'allongement du granulat conduit à la réduction de l'ouvrabilité des bétons sans qu'aucune corrélation entre texture de la surface des granulats et ouvrabilité des bétons n'ait pu être établie (Hafid, 2012). La forme allongée et angulaire contribue à augmenter la surface de contact avec l'eau, plus de pâte est donc nécessaire pour les lubrifier. Cependant, pour conserver les résistances mécaniques et l'ouvrabilité il est possible de maintenir le rapport eau/ciment par l'utilisation d'adjuvants plastifiants/superplastifiants.

1.12.2. Résistances mécaniques

Zhao [11] a montré que la résistance en compression des mortiers diminue au plus le taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé de béton augmente. Cette diminution est linéaire en fonction du taux de substitution du sable naturel par du sable recyclé. Il a également montré que les fractions fines de granulats recyclés ont un impact plus néfaste sur la résistance que les fractions plus grossières car elles ont une plus grande teneur en pâte de ciment.

Gomez-Soberon [16] a montré que lorsque le taux de substitution en volume entre les granulats naturels et les granulats recyclés de béton augmente, les résistances en compression et en traction diminuent. Par contre, lorsque le taux de substitution est inférieur à 30%, la résistance en compression est plus ou moins identique au béton de référence ne

contenant pas de granulats recyclés. Les différents bétons à base de granulats recyclés ont une évolution au cours du temps identique au béton de référence sans granulat recyclé.

Agrela et al. [1] ont également observé que lorsque le taux de substitution augmente, les caractéristiques mécaniques des bétons à base de granulats recyclés diminuent. Par contre, ils remarquent que la qualité des granulats recyclés utilisés pour la fabrication des bétons est importante car les propriétés mécaniques sont meilleures lorsque les granulats recyclés proviennent d'un béton de bonne qualité. Ils ont observé que la perte de résistance en traction et en flexion est plus faible que la perte de résistance en compression. Lorsque le béton est jeune, le béton sans granulat recyclé a une meilleure résistance en traction mais à long terme les résistances entre les bétons conventionnels et les bétons à base de granulats recyclés sont du même ordre de grandeur. Pour la flexion, une perte de résistance de 10% est obtenue pour les bétons à base de granulats recyclés.

Ils ont également montré que l'utilisation de sable recyclé de bonne qualité ne diminue pas la résistance en compression des bétons jusqu'à une substitution de 30%.

Tabsh et al. [28] ont montré également une perte de résistance en compression lors de l'utilisation de granulats recyclés de béton sauf lorsque le béton d'origine des granulats recyclés a de bonnes qualités mécaniques. la même conclusion a été trouvée concernant la résistance en traction.

Wagih et al. [15] ont obtenu la même conclusion par rapport à la diminution de la résistance en compression lors de l'utilisation de granulats recyclés de béton. Ils ont conclu de la même manière concernant la résistance en traction.

Deodonne [17], Kenai [28] et Tahar et al. [27] ont trouvé les mêmes résultats concernant la résistance en compression. Bouarroudj et al. [29] ont conclu de la même manière par rapport à la résistance en compression des mortiers fabriqués à base de granulats recyclés de béton et ont également montré que l'utilisation de granulats recyclés secs lors de la fabrication des mortiers a un impact moins négatif que l'utilisation de granulats recyclés saturés sur la résistance en compression.

1.12.3. Module de Young

Selon Agrela et al. [30], le module de Young diminue de 20% pour les bétons à base de 100% de granulats recyclés de béton et peut s'expliquer par la grande quantité de pâte

de ciment ayant un plus faible module de Young attaché aux granulats naturels formant les granulats recyclés.

Wagih et al. [15] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton dans la fabrication de nouveau béton diminue le module de Young.

Xuan et al. [51] ont montré que l'utilisation de granulats recyclés de béton carbonatés ou non-carbonatés à la place de granulats naturels diminue le module de Young des bétons.

1.12.4. Absorption capillaire

Gómez-Soberón [16] a montré que l'absorption d'eau augmente lorsque le taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés de béton augmente. Kenai a observé la même chose.

Zhang et al ont montré que les mortiers à base de sable recyclé de béton ont une absorption d'eau plus grande que les mortiers à base de sable naturel. Cependant, le traitement chimique permet de limiter cette augmentation d'absorption d'eau.

1.13. L'effet de la température élevée sur les caractéristiques des matériaux cimentaires

Lorsque le matériau cimentaire est soumis à des températures élevées comme lors d'un incendie, plusieurs transformations chimiques et physiques ont lieu engendrant une dégradation de ses propriétés mécaniques.

Les principaux mécanismes sont:

*Une augmentation de la pression de vapeur d'eau dans les pores.

*Un comportement non identique de la pâte de ciment et des granulats dû à des coefficients thermiques d'expansion différents et une transformation des hydrates de la pâte de ciment.

La pâte de ciment subit différentes transformations avec l'élévation de la température: L'étrangéité se déshydrate complètement entre 130 et 170°C. Les gels de CSH commencent à subir une première transformation à partir de 80 °C. Une partie de la décomposition des CSH contribue à une augmentation de la calcite (CaCO_3) et de la larnite (C_2S). La décomposition de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) intervient entre 450 et 550 °C en se transformant en de la chaux

vive (CaO) et de l'eau [31]. Après refroidissement, la réhydratation de la chaux entraîne une augmentation de volume d'environ 40 % pouvant entraîner un éclatement du béton.

Pour les granulats siliceux, à 573°C, le quartz se transforme en quartz., transformation s'accompagnant d'un gonflement des granulats. A partir de 700°C, le carbonate de calcium présent notamment dans les granulats calcaires se décompose en chaux vive en libérant duCO₂.

1.13. Conclusion

Le traitement du béton recyclé est l'une des technologies modernes dans le domaine de la construction. Cette technologie est utilisée pour améliorer les propriétés du béton et améliorer sa résistance, sa dureté et sa durabilité. Cela se fait en ajoutant des matériaux spéciaux au mélange de béton précipité, tels que de la fibre de verre, des fibres rigides ou des polymères spéciaux.

Ces matériaux améliorent les propriétés mécaniques du béton, telles que sa résistance à la rupture et sa capacité à supporter de fortes charges et des chocs. Il aide également à réduire les fissures, la dilatation et le retrait du béton, augmente sa durée de vie et réduit l'entretien ultérieur.

Il convient de noter que le traitement du béton recyclé nécessite des connaissances et une expérience spécialisées dans l'installation et l'application de ces matériaux, et nécessite également un équipement spécial pour manipuler le béton recyclé. Par conséquent, il est conseillé de coopérer avec des spécialistes dans ce domaine pour obtenir d'excellents résultats et un travail de haute qualité.

Chapitre 2

Matériaux d'étude et méthodes expérimentales

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions dans la première partie, les caractéristiques des différents matériaux utilisés à savoir: la masse volumique, la granulométrie, la propreté ainsi que d'autres propriétés physiques. Dans la deuxième partie, nous allons donner les modes opératoires des différents essais réalisés dans la partie expérimentale. Le but c'est de poursuivre les recherches complexes et approfondies et qui répondent aux exigences.

2.2. Ciment

Dans cette étude, on a utilisé un seul type de ciment pour confectionner les éprouvettes des mortiers. Ce ciment est un ciment Portland résistant aux sulfates de type CEM I 42.5 N-SR5. La masse volumique apparente du ciment est de 3.00 kg/m³, la surface spécifique est de 4400 cm²/g et la résistance moyenne en compression à 28 jours est de 42.5 MPa. Ce ciment provient de groupe GICA "S.C.T" et sa fiche technique se retrouve à l'ANNEXE A

L'analyse chimique et minéralogique ainsi que les caractéristiques physiques du ciment a été effectuée au laboratoire de contrôle de la cimenterie de Tebessa et dont les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.1.

Tableau 2.1: Compositions chimiques, minéralogiques et physiques du ciment utilisé.

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Chlorures	PAF	Insoluble
64.36	20.99	4.30	4.18	2.34	0.23	0.65	1.14	0.002	1.95	/

Tableau 2.2: Analyse minéralogiques du ciment

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	60.88 (*)	14.58 (*)	4.32	12.71

(*) Les compositions C₃S et C₂S ne sont pas affichés sur la fiche technique du ciment, nous avons le calculé par la formule de bogue comme suit :

$$\begin{aligned}
 C_3S &= 4.07 (CaO) - 7.6 (SiO_2) - 6.72 (Al_2O_3) - 1.43 (Fe_2O_3) - 2.85 (So_3) \\
 &= 4.07 (64.36\%) - 7.6 (20.99\%) - 6.72 (4.30\%) - 1.43 (4.18\%) - 2.85 (2.34\%) = \underline{\underline{60.88 \%}}
 \end{aligned}$$

$$C_2S = 2.87 (\text{SiO}_2) - 0.75 (3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) = 2.87 (20.99\%) - 0.75 (60.88\%) = \underline{\underline{14.58 \%}}$$

2.3. Le bicarbonate de sodium

Est un composé inorganique ionique blanc, qui se présente sous forme de poudre. Décrit par la formule brute NaHCO_3 , et sa fiche technique se retrouve à l'ANNEXE A



Figure 2.1. Flacon de 1 kg de NaHCO_3

2.4. Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau poTableaudu robinet qui est fourni par le réseau public (Hassani AbdelKerim) sans passer par l'analyse chimique et on a admis qu'elle est propre à la consommation et qu'elle renferme toutes les prescriptions de décret exécutif n011-125 du 22/03/2011relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

- Les caractéristiques physiques sont comme suit:
- Les masses volumiques:
- La masse volumique apparente: [NA.255-5/1990]

Cet essai est régi par la norme NFP 18-554 [13], elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

$$M_{vapp} = M/V$$

Où:

γ : Masse volumique apparente

M: Masse du matériau;

V: Volume total du matériau.

La masse volumique absolue: [NA.255/1990

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301, elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

$$\gamma_s = M_s / V_s$$

Où:

γ_s : Masse volumique absolue.

M_s : Masse du matériau .

V_s : Volume total du matériau solide.

- **Analyse granulométrique: NF P18 560**

La distribution granulaire des matériaux d'études a été déterminée sur les différents lots, selon la norme NF EN 933-1(Afnor, Norme NF EN 933-1, 1997), par tamisage par voie sèche sans lavage.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentage pondéraux respectifs des différentes familles de grain constituant l'échantillon.

- **Module de finesse**

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton de sable tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF) .Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 0.16; 0.315; 0.63; 1.25 ; 2.5 et 5.

Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à béton.

$$M_f = \sum \%RC(0.16+0.315+0.63+1.25+2.5+5) / (100)$$

2.2et 2.8: on est en présence d'un sable préférentiel.

2.8et 3.3: le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniabiles

- **Equivalent de sable:**

Cet essai, référé par la norme NF P18 598 [15], est utilisé pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des mortiers. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants (Figure II.3:)

La hauteur h1: sable propre + éléments fins.

La hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est:

$$ES = h2/h1 \times 100$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine: équivalent de sable visuel ESV et équivalent de sable au piston ESP.

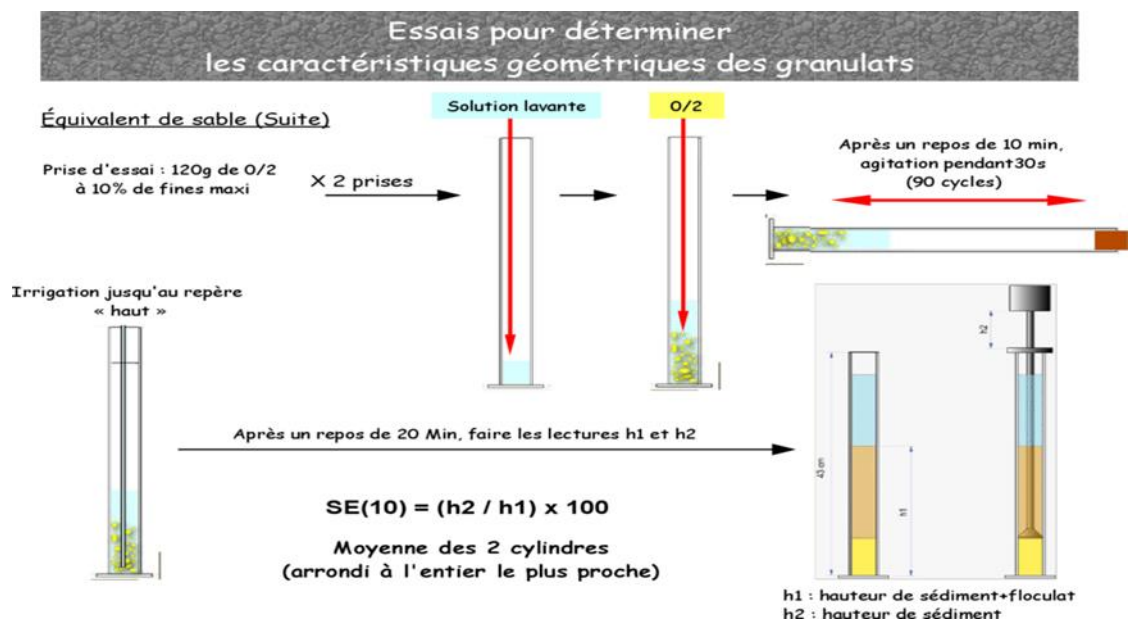


Figure 2.2. Schémas de mesure d'équivalent de sable.

Selon la norme NFP18 598, les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons sont indiquées sur le Tableau II.2:

Tableau 2.3. Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés

N°	Equivalent de sable (%)	Observations
1	ESV <65 ESP <60	Sable argileux ; risque de retrait ou de gonflement de béton.
2	65 < ESV <75 60 < ESP <70	Sable légèrement argileux ; de propreté admissible.
3	75 < ESV <85 70 < ESP <80	Sable propre, convenant au béton à haute qualité.
4	ESV >85 ESP >80	Sable très propre ; absence de plasticité de béton.

2.5. Sable alluvionnaire: "SA"

La composition chimique du sable de dune d'EL Oued est établie en mars 2017, à la cimenterie de Hammam Dhala (LAFARGE), le sable de Djamaa est un sable à haute teneur en silice. Elle est donnée au Tableau ci-dessous:

Tableau 2.4: Analyse chimique du sable de (Djamaa)

<i>Constituants</i>								
<i>Elément</i>	Silice	Alumine	Oxyde de ferrique	Chaux	Oxyde de magnésium	Sulfate	Potassium	Sodium
<i>Symbole</i>	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	So ₃	K ₂ O	Na ₂ O
<i>Teneur en (%)</i>	92.96	2.21	2.039	0.79	0.02	0.15	1.16	0.34



Figure 2.6. Sable Djamaa

Tableau 2.5: Résultats récapitulatif des propriétés physiques s. de DJAMAA

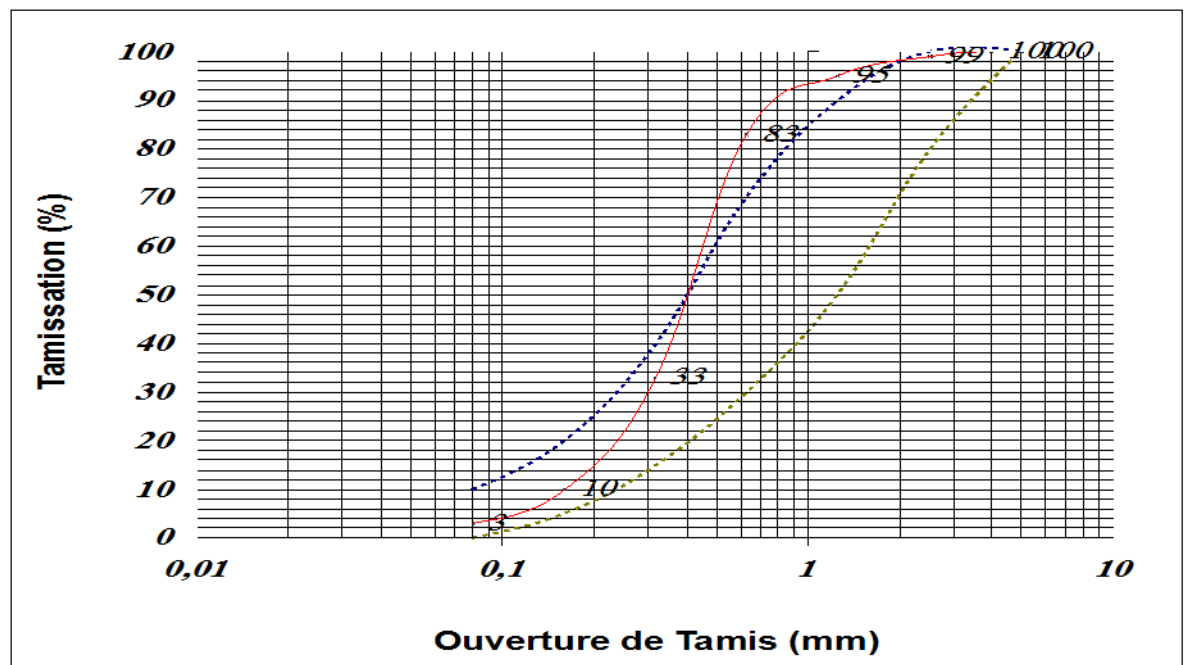
Sables	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Module de finesse	Equivalent de Sable (%)
Sable Alluvionnaire	1.64	2.70	1.80	66.30



Figure 2.3. Essai l'équivalent de Sable Djamaa

Tableau 2.6 : Résultats de l'analyse granulométrique de sable de DJAMAA

	Masse du tamis [g]	Tamis+ refus [g]	Refus [%]	Tamisa [%]	Observati ons
5	0	0	0	0	100
2.5	12	12	1.2	98.8	99
1.25	35	47	4.7	95.3	95
0.63	122	169	16.9	83.1	83
0.315	497	666	66.6	33.4	33
0.16	237	903	90.3	9.7	10
0.08	64	967	96.7	3.3	3

**Figure 2.4: L'analyse granulométrique de sable de DJAMAA**

2.6. Sable dunaire: "SD"

Le sable de dune est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent. Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, forme la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir

Deux types de sable (SD) ont été caractérisés comme suit:

Échantillon n°01: provient de la région nord de la commune d'EL Oued

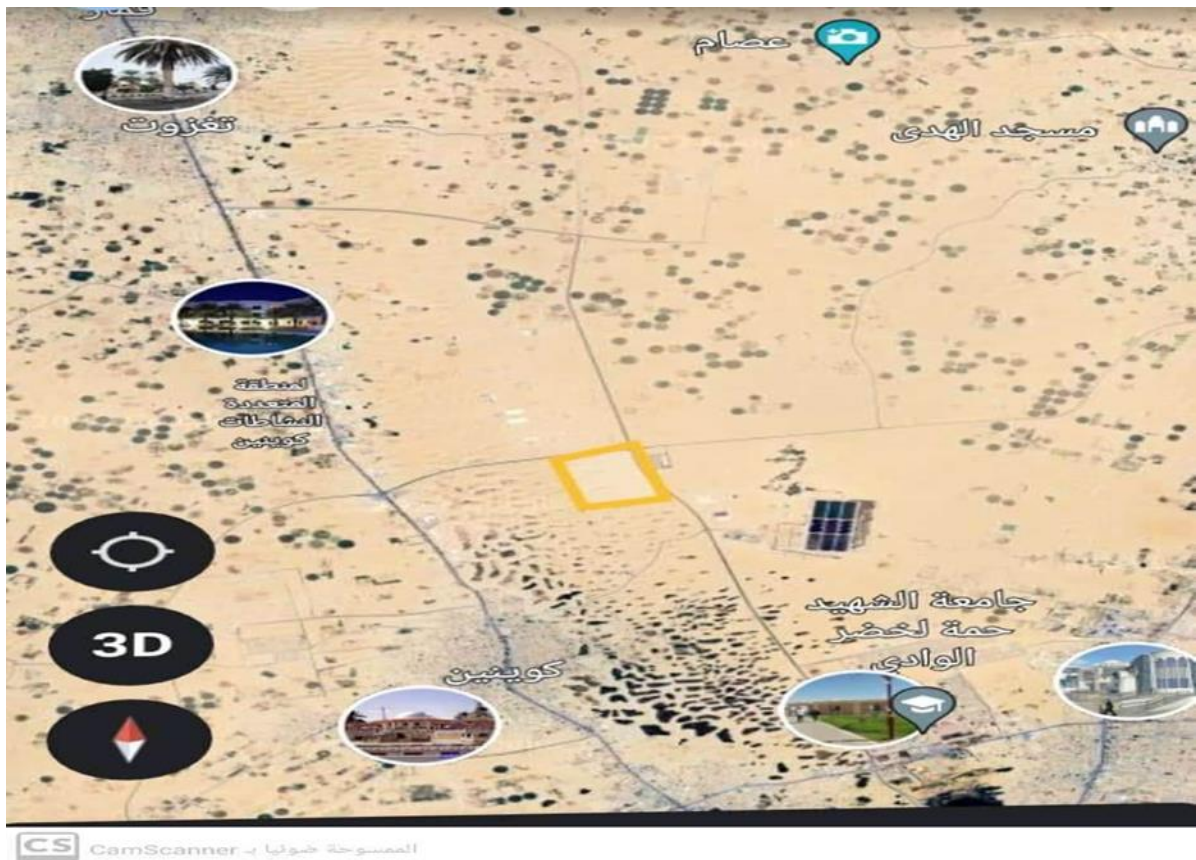


Figure 2.5. Photo satellite de la situation du sable de dune 01

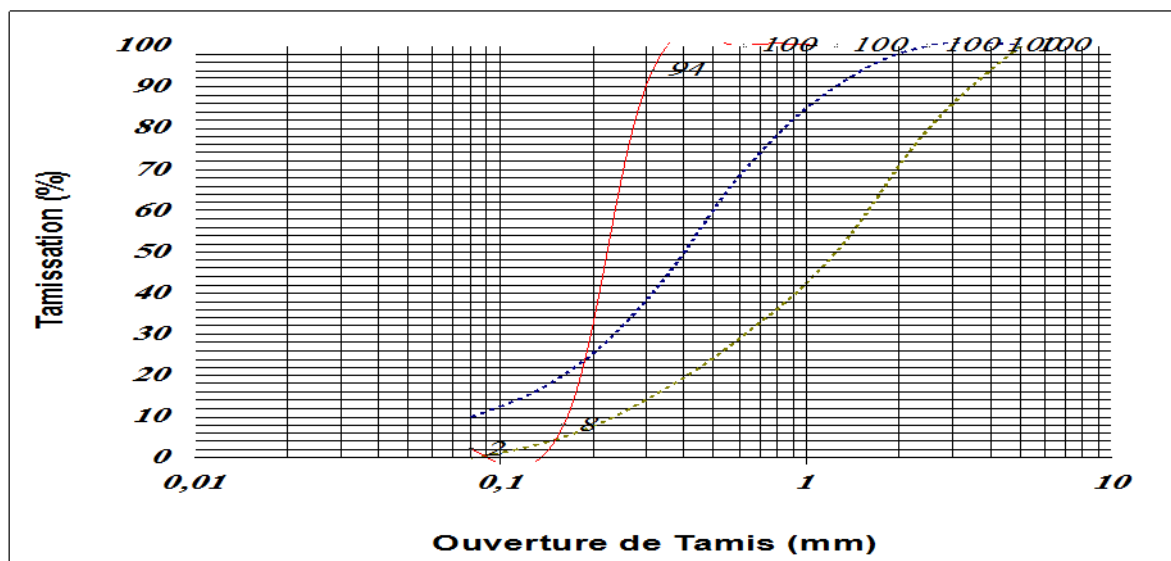
Tableau 2.7: Résultats récapitulatif des propriétés physiques s. de dune 01

Sables	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Module de finesse	Equivalent de Sable (%)
Sable Dune01	1.51	2.60	0.98	85

Tableau 2.8 : Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune 01

Ouverture	Refus	Refus	Pourcentage	Pourcentage	Observations
Tamis	Partiel	cumulé	e refus	e passant	
5	00.00	00.00	00.00	00.00	100
2.5	00.00	00.00	00.00	00.00	100
1.25	00.00	00.00	00.00	00.00	100
0.63	0.19	0.19	0.01	99.99	100
0.315	55.28	55.47	5.54	94.46	94
0.160	866.90	922.37	92.23	7.77	8
0.08	61.72	984.09	98.40	1.6	2

Figure 2.6 L'analyse granulométrique de sable de dune 01



Échantillon n°02: provient de la commune de c. Hassani Abdelkerim

Tableau 2.9 : Résultats récapitulatif des propriétés physiques s. de dune 02

Sables	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Module de finesse	Equivalent de Sable (%)
Sable Dune 02	1.51	2.58	1.23	90

Tableau 2.10: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune 02

Ouverture Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	Pourcentage refus	Pourcentage passant	Observations
5	00.00	00.00	00.00	00.00	100
2.5	00.00	00.00	00.00	00.00	100
1.25	00.00	00.00	00.00	00.00	100

0.63	20.69	20.69	2.06	97.94	98
0.315	269.84	290.30	29.05	70.95	71
0.160	635.16	925.69	92.56	7.44	7
0.08	44.35	970.04	97.00	3	3

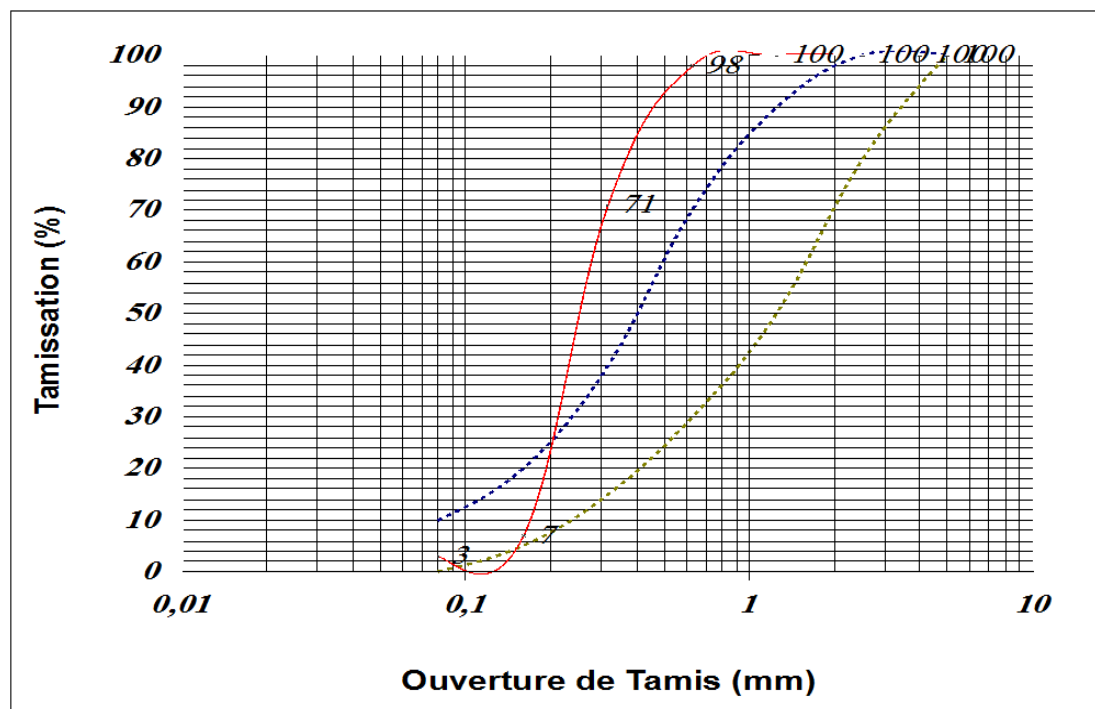


Figure 2.7: L'analyse granulométrique de sable de dune 02

D'après l'analyse, et selon les données de base concernant le module de finesse du mélange souhaité est environ de 2.50. Nous avons constaté que le plus grand diamètre des granulats de sable dune $D_{max} = 0.63\text{mm}$.



Figure 2.8: Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable de dune

Tableau 2.11: MEB+drx du sable de dune

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	66.74	60.99
14	Si	Silicon	9.56	15.34
6	C	Carbon	18.74	12.85
20	Ca	Calcium	2.35	5.37
13	Al	Aluminium	1.32	2.04
16	S	Sulfur	1.10	2.01
53	I	Iodine	0.19	1.39

FOV: 63.9 μm, Mode: 15kV - Map, Detector: BSD Full, Time: MAY 8 2023 12:58

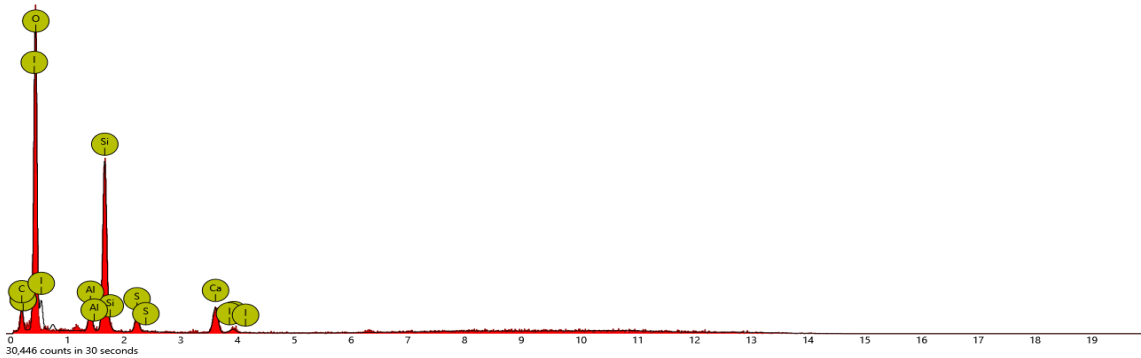


Figure 2.9: Analyse du sable de dune

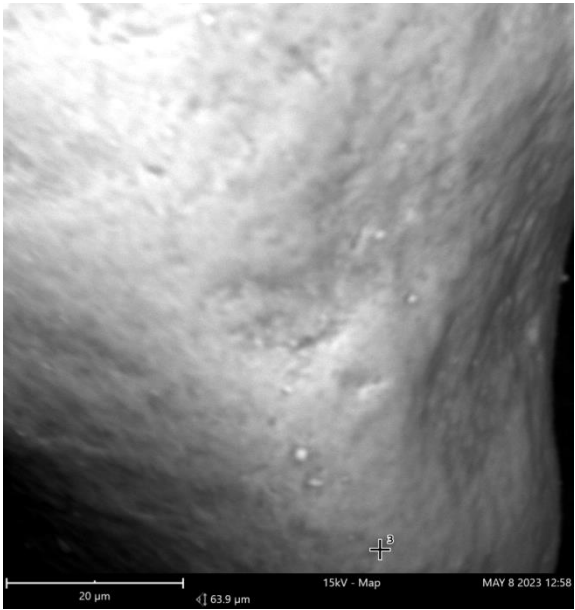
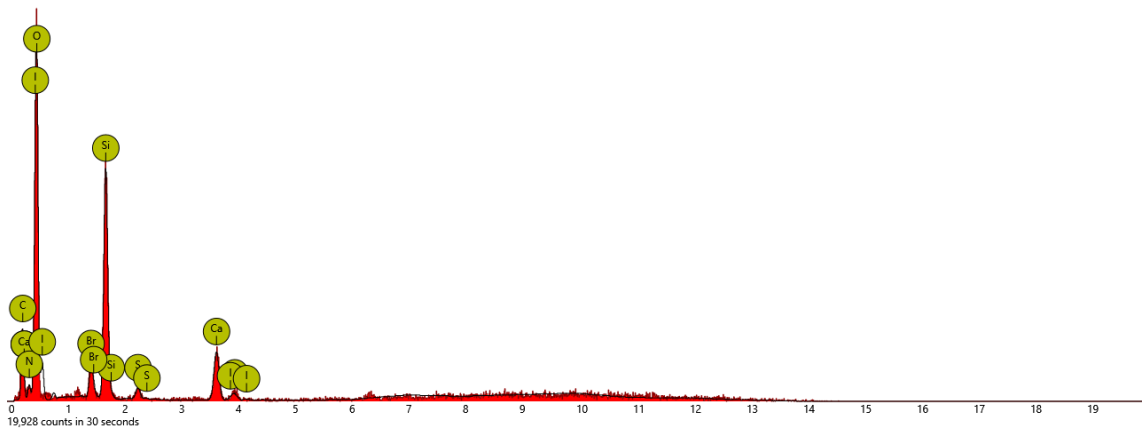


Figure 2.10: Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable de dune

Tableau 2.13:

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	54.57	50.90
6	C	Carbon	25.95	18.17
14	Si	Silicon	7.15	11.71
7	N	Nitrogen	8.36	6.83
20	Ca	Calcium	2.38	5.57
35	Br	Bromine	1.01	4.70
53	I	Iodine	0.19	1.38
16	S	Sulfur	0.39	0.74

FOV: 63.9 µm, Mode:15kV - Map, Detector: BSD Full, Time: MAY 8 2023 12:58



Disabled elements: B

Figure 2.11: Analyse du sable de dune

3. region

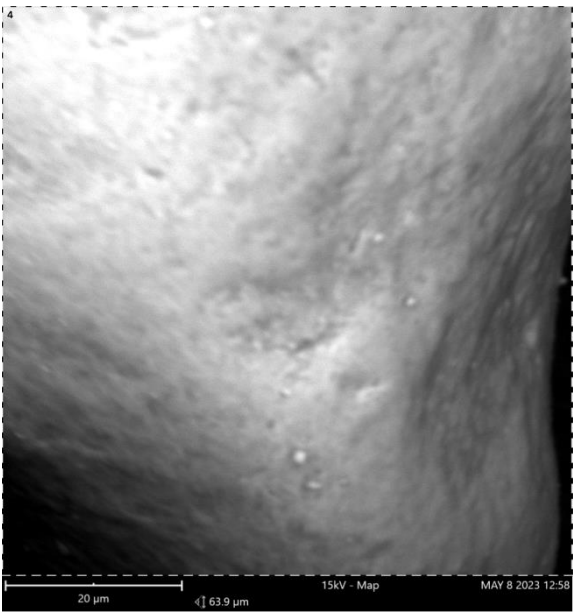
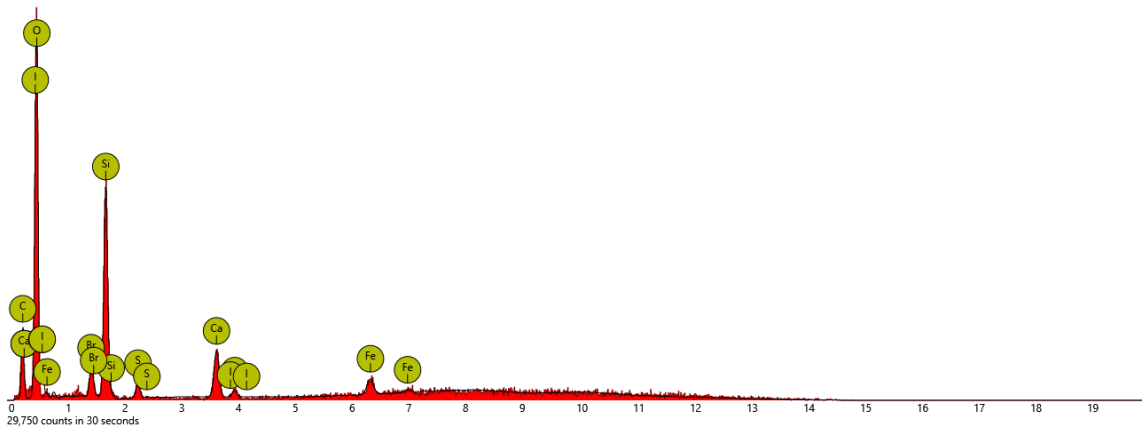


Figure 2.12: Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable de dune

Tableau 2.14: MEB+drx du sable de dune

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	54.84	49.05
6	C	Carbon	31.30	21.01
14	Si	Silicon	7.55	11.86
26	Fe	Iron	2.16	6.74
20	Ca	Calcium	2.49	5.58
35	Br	Bromine	1.04	4.66
16	S	Sulfur	0.61	1.09

FOV: 63.9 μm, Mode: 15kV - Map, Detector: BSD Full, Time: MAY 8 2023 12:58



Disabled elements

Figure 2.13: Analyse du sable de dune

2.7. Granulats recyclés

Les granulats recyclés testés dans ce travail proviennent de bétons d'origine différente.

Et la plupart des échantillons étaient au niveau de laboratoire publique LTPS antenne d'El Oued, sous forme géométrique normalisés.

Ces bétons ont été concassés selon les étapes suivantes:

*Le concassage manuel à l'aide d'une massette pour diminuer le volume.

*Puis par la fragmentation par choc à l'aide de l'appareil "LA" Los Angeles, pendant de courtes périodes alternés, dont l'objectif proposé d'obtenir une fraction de 2/4.



Figure 2. 14: Le concassage manuel

- Le concassage par LA

Tableau 2.15: Résultats de l'analyse granulométrique de sable recyclé 2/4 Prise d'essai 980.8 g

Ouverture	Refus	Refus	Pourcentage	Pourcentage	Observations
Tamis	partiels	cumulé	refus	passant	
5	00	00	00	100	100
2.5	634.06	643.06	65.56	34.44	34

1.25	332.04	975.10	99.41	0.59	1
0.63	057	975.67	99.47	0.53	1
0.315	00	975.67	99.47	0.53	1
0.160	00	975.67	99.47	0.53	1
0.08	00	975.67	99.47	0.53	1

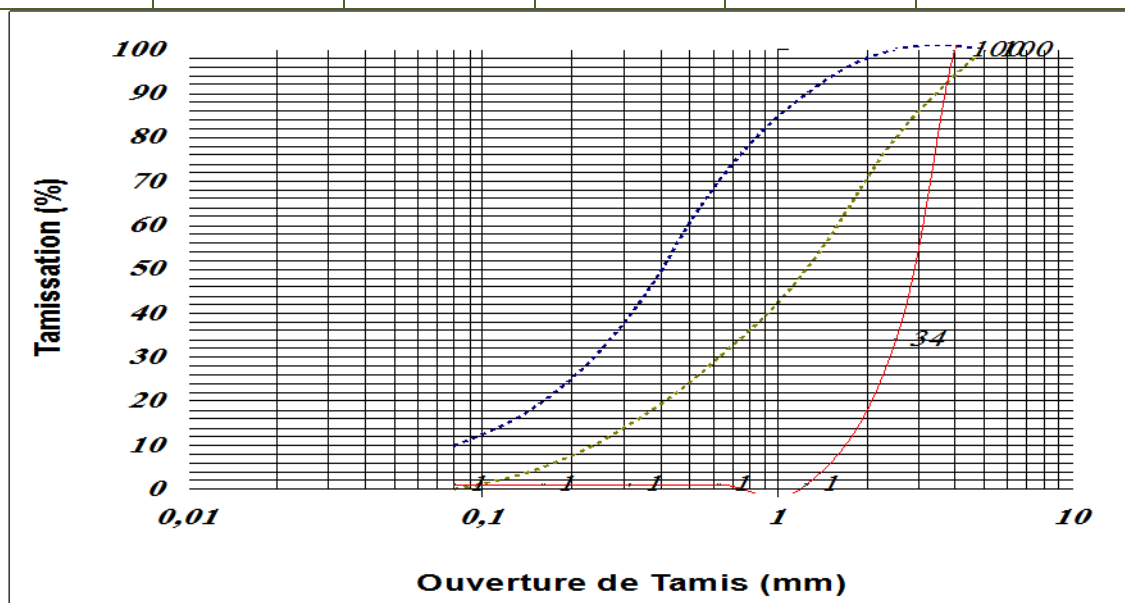


Figure 2.15: La courbe granulométrique de sable recyclé 2/4

Tableau 2.16: Résultats récapitulatif des propriétés physiques S.R 2/4

Sables	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Module de finesse
S.R 2/4	2.51	3.60	4.63

Avec un module de finesse entre 0.98 et 1.23 c'est-à-dire un sable trop fine.

-sable recyclé 4/2 avec un module de finesse 4.63 c'est-à-dire un sable trop gros.

-On va mélanger le SR 2/4 avec sable de dunes. Dans ce cas nous utiliserons la méthode habituelle de correction du modèle de finesse et d'obtenir un mélange avec un module de finesse de 2,5%(souhaité). MF3 = 2.5 % selon la norme NF EN 933-1

Si MF1 est le module de finesse d'un sable 1

Si MF2 est le module de finesse d'un sable 2

On peut obtenir un sable 3 d'un module de finesse (prédéfinie) mf3 qui est la combinaison d'un mélange proportionné des deux sable 1 et 2

Avec $MF3 < MF1$ $MF3 > MF2$ les proportions sont:

$$\text{Sable2} = \frac{MF3 - MF1}{MF2 - MF1}$$

$$\text{Sable1} = \frac{MF2 - MF3}{MF2 - MF1}$$

Avec $MF2 = 4.63\%$ $MF3 = 2.5\%$ $MF1 = 0.98\%$

$$0.42 = \frac{0.98 - 4.63}{0.98 - 2.5} \quad 0.58 = \frac{0.98 - 4.63}{2.5 - 4.63}$$

Alors, $S1\% = 58\%$ $S2\% = 42\%$

Tableau 2.17: Résultats de l'analyse granulométrique de SR 2/4 58%+ SD 42%

Ouverture	Refus	Refus	Pourcentage	Pourcentage	Observations
Tamis	partiel	cumulé	refus	passant	
5	00	00	00	100	100
2.5	273.06	273.06	27.30	72.70	73
1.25	144.55	417.61	41.76	58.24	58
0.63	0.17	417.78	41.77	58.24	58
0.315	27.37	445.15	44.51	55.49	0.55
0.160	538.92	984.07	98.40	01.6	02
0.08	9.73	993.3	97.38	00.62	01

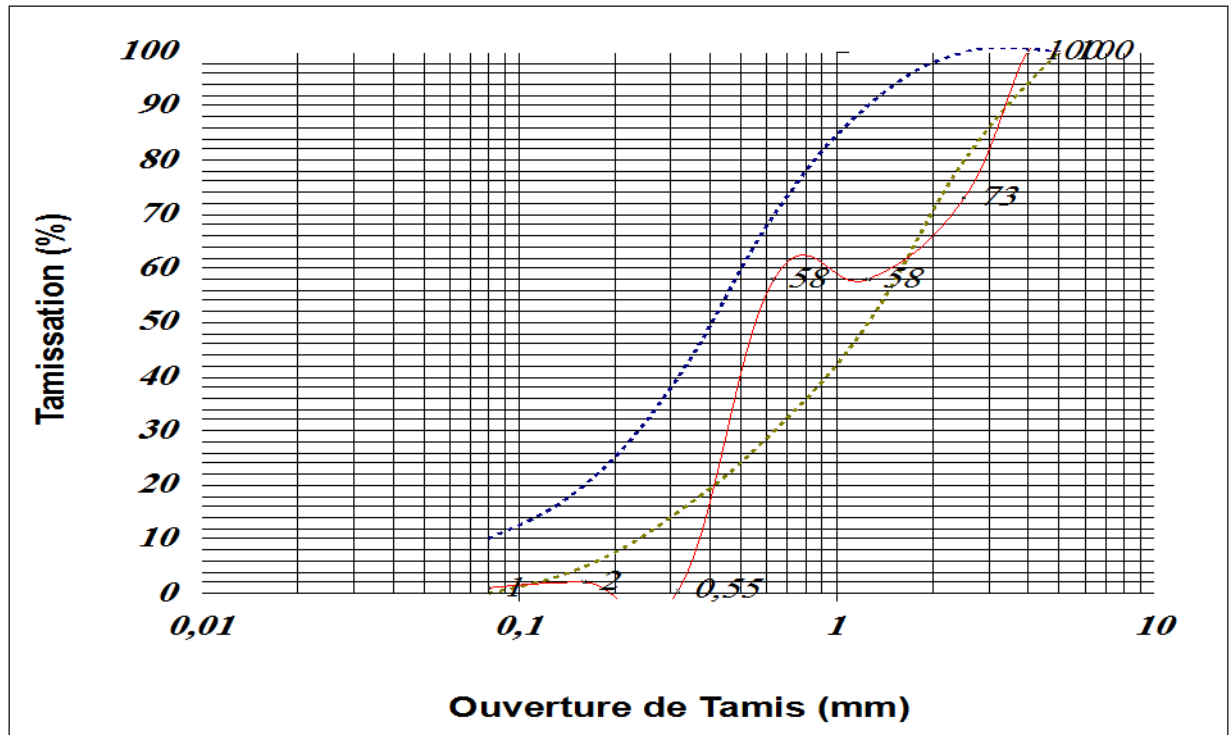


Figure 2.16: La courbe granulométrique d'un mélange 42 % SR 2/4+58% S.D

La courbe ci-dessus présente une discontinuité, un autre manière il y a un manque ou un excès des grains entre Dmax sable de dune 0.63mm et d min de sable recycler 2 mm.

L'utilisation de la méthode du poids pondérale qui considérée une méthode plus pratique, sur le sable de dune et le sable recyclé, et la résultat comme suit:

En peut avoir les pourcentages tamisât de chaque tamis sont les suivants:

Tableau 2.18: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dune

Tamis	Pourcentage passant
5	99%a 100%
4	99%a100%
2.5	93%a98%
2	85%a95%
0.36	47%a67%
0.315	24%a34%
0.16	7%a14%
0.08	1%a5%

Nous avons changé le sable précédemment sélectionné SD.02, à un nouvel extrait du site; la commune de Hassani Abdelkerim "Zgoum" côté nord -est.

Tableau 2.19: sable de dune**Sable de dune**

Overture tamis	Refus partiels	Refus cumulés	Pourcentage refus	Pourcentage passant	Observation
5	0.0	0.0	0.0	100	
2.5	0.0	0.0	0.0	100	
1.25	0.0	0.0	0.0	100	
0.63	0.0	0.0	0.0	100	

0.315	717.5	717.5	71.8	28.2	
0.16	180.0	897.5	89.8	10.2	
0.08	92.5	990.0	99.0	1	

Prised'essai 990.00

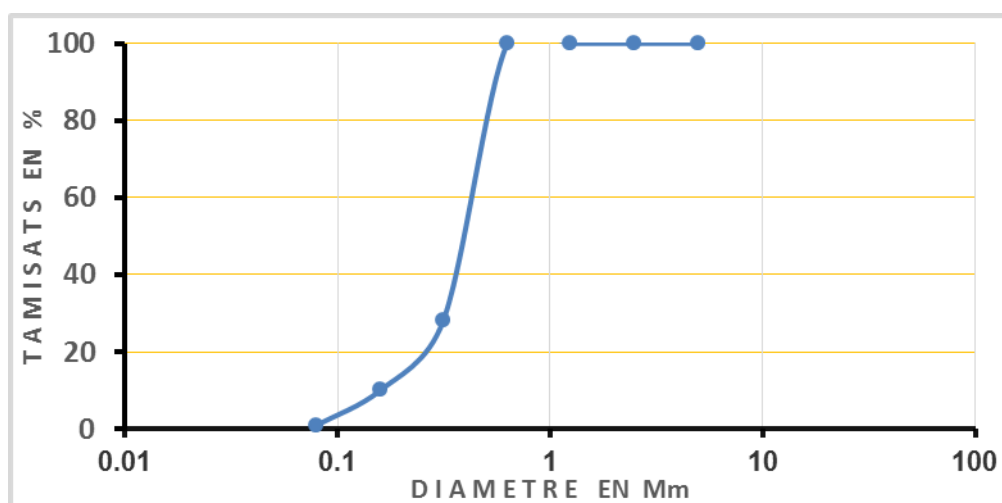


Figure 2.17: La courbe granulométrique du sable de dune

Tableau 2.20 : Résultats récapitulatif des propriétés physiques SR 4/0.63

Sables	Masse Volumique apparente (g/cm ³)	Masse Volumique absolue (g/cm ³)	Module de finesse	Equivalent de Sable (%)
SR	1.34	2.48	3.75	///

Tableau 2.20 : Résultats de l'analyse granulométrique de sable recyclé modifié

Overture tamis	Refus partiels	Refus cumulés	Percentage refus	Percentage passant	Observation
5.00	0.00	0.00	0.00	100	
4.00	0.00	0.00	0.00	100	
2.50	238	238.00	23.80	76	
1.25	320	558.00	55.80	44	
0.63	426	984.00	98.40	2	
0.32	0.00	984.00	98.40	2	
0.16	0.00	984.00	98.40	2	
0.08	0.00	984.00	98.40	2	

MF = $1/100 \sum$ Refus cumulés en % des tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5)

Donc, on a obtenu un module de finesse du sable recyclé (d'une fraction 0.63/4) est de 3.75.

Avec $MF_3 < MF_1$ $MF_3 > MF_2$ les proportions sont:

$$\text{Sable}_2 = \frac{MF_3 - MF_1}{MF_2 - MF_1}$$

$$\text{Sable}_1 = \frac{MF_2 - MF_3}{MF_2 - MF_1}$$

Avec $MF_2 = 3.75\%$ $MF_3 = 2.47\%$ (le module possible et approuvé par l'encadreur) $MF_1 = 1.62\%$

$$0.40 = \frac{1.62 - 3.75}{1.62 - 2.47} \quad 0.60 = \frac{1.62 - 3.75}{2.47 - 3.75}$$

Les résultats d'analyse granulométrique de ce mélange dans le tableau ci-dessous:

Tableau 2.21: Résultats de l'analyse granulométrique de SR 0.63/4 40%+ SD 60%

Ouverture tamis	Refus partiaux	Refus cumulés	Pourcentage refus	Pourcentage passant	Observation
5	0.0	0.0	0.0	100.0	
4	0.0	0.0	0.0	100.0	
2.5	190.0	190.0	9.5	90.5	
1.25	256.0	446.0	22.3	77.7	
0.63	341.0	787.0	39.4	60.6	
0.315	861.0	1648.0	82.4	17.6	
0.160	216.0	1864.0	93.2	6.8	
0.080	111.0	1975.0	98.8	1.2	

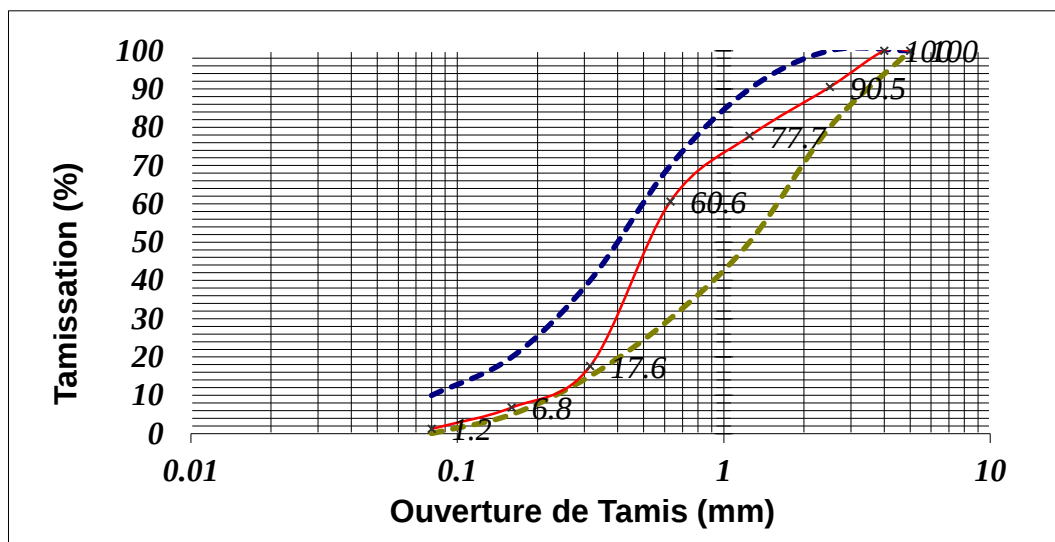
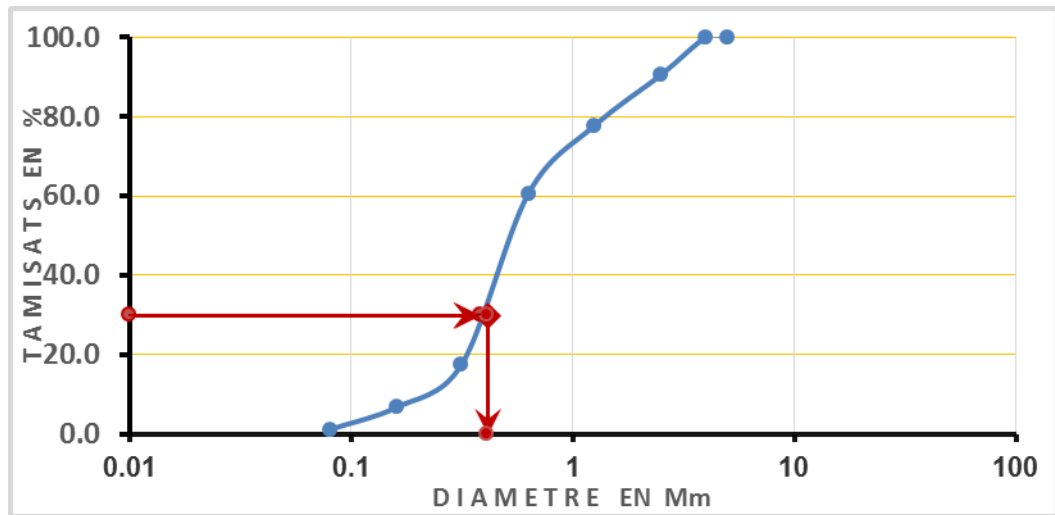


Figure 2.18: Les courbes granulométriques du SR 0.63/4 40%+ SD 60%

Interprétation des courbes:

Soit D le diamètre pour lequel le tamisât est de X%, ex: D30= diamètre du tamis pour lequel on obtient 30 % de passant.

Coefficient d'uniformité: ou le c. de Hazen

Ce coefficient permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée, notamment en ce qui concerne les sables.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

A.N:

$$Cu = D_{60}/D_{10} = 0.63/0.21 = 3.00$$

$C_u > 2 \rightarrow$ granulométrie étalée.

$C_u < 2 \rightarrow$ granulométrie uniforme ou serrée

Donc, notre courbe est étalée.

Coefficient de courbure:

Ce coefficient vient en complément de C_u dans la classification des sols LCPS, afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

A.N:

$$C_c = (0.41)^2 / (0.21 * 0.63) = 1.27$$

$> 1C_c < 3 \rightarrow$ matériau bien gradué (la continuité est bien répartie.)

$C_c < 1$ ou $C_c > 3 \rightarrow$ matériau mal gradué (la continuité est mal répartie.)

Donc, notre courbe est bien gradué.

*En raison d'assurer la quantité satisfaite pour achever tous les essais expérimentaux, on a utilisé un concasseur à mâchoires situé dans le laboratoire LTPS antenne de Ouargla, néanmoins ce broyeur donne des granulats de calibres spécifiques: 0/7. Puis nous avons pensé à utiliser un mini compacteur situé au niveau le siège de la subdivisionnaire des travaux publics à D. Debila.



(6)



(5)

Figures (5,6) 2.19: Le concassage par broyeur



Figure 2.20: Le broyage par un compacteur cylindrique



Figure 2.21. Les différentes fractions du sable recyclé 0.63/4(2.5,1.25 et 0.63 mm)

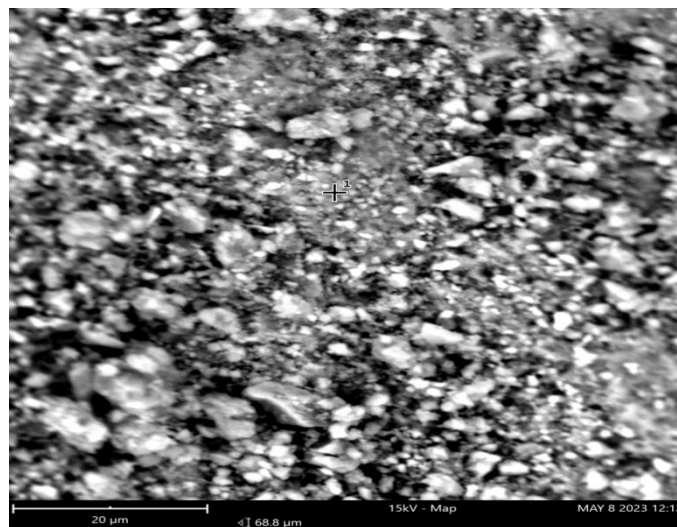
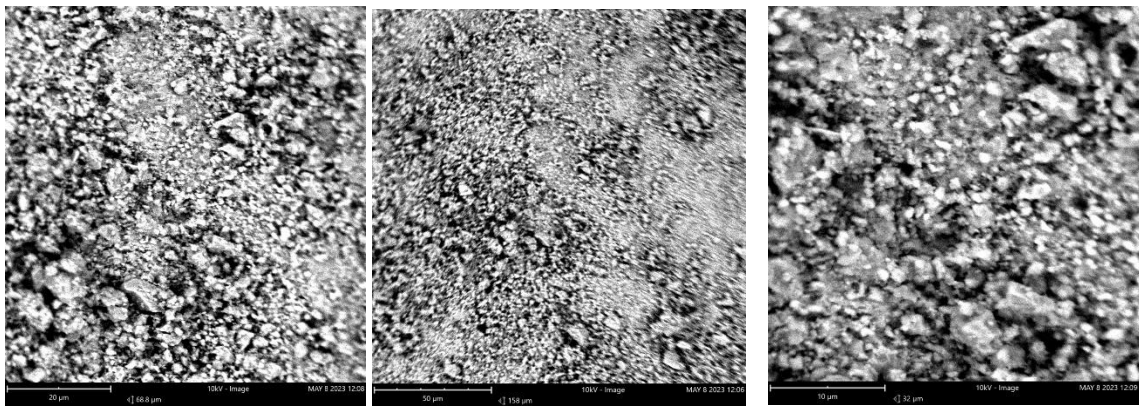


Figure 2.22; Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable recyclé avant le traitement chimique

Tableau 2.22: L'analyse du sable de recyclé

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	63.46	53.59
20	Ca	Calcium	12.89	27.26
6	C	Carbon	18.28	11.58
14	Si	Silicon	2.95	4.37
12	Mg	Magnesium	1.80	2.31
13	Al	Aluminium	0.63	0.89

FOV: 68.8 µm, Mode: 15kV - Map, Detector: BSD Full, Time: MAY 8 2023 12:12

**Figure 2.23: Image MEB 10,20,50 µm du sable recyclé avant le traitement**

2.7.1 Traitement chimique des granulats recyclés

Cette étude s'est concentrée sur l'utilisation d'une boue de ciment CRS et de bicarbonate de sodium (NaHCO_3). Le GR a été éliminé par trempage dans les boues composées de 4% de ciment et de 2,4, et 6% de NaHCO_3 pendant 48 heures. [32]

En général, cette solution est une méthode efficace pour améliorer les propriétés du GR en réduisant son absorption d'eau et sa valeur d'écrasement, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la compression du béton.

En date du 24/04/2023 le trempage a été effectué comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.23: Concentration du ciment CRS- NaHCO_3

Symbole	Concentration %		Le poids (g)			
	CRS	NaHCO_3	CRS	NaHCO_3	Eau	GR
SR2	4%	2%	40	20	1000	1000
SR4	4%	4%	40	40	1000	1000
SR6	4%	6%	40	60	1000	1000

**Figure 2.24 Le trempage du sable recyclé 0.63/4(2.5, 1.25 et 0.63 mm)**

Après 48 heures, on a filtré et séché toutes les quantités sous le soleil.

Composition des mortiers

Dans ce travail, huit formulations du béton de sable différentes ont été testées:

Premièrement ces formulations ont été réalisés sur la base de: $C=450 \text{ kg/m}^3$,
 $\text{Eau/Ciment} = 0,6$ et $\text{Sable/Ciment} = 3,0$

2.7.2. La série non traités par le NaHCO_3 :

-Un béton de référence (SA) dans lequel aucun sable recyclé n'a été utilisé pour sa fabrication; un sable alluvionnaire+ ciment.

- Formulations du Béton de sable de dune 100%, nommée SD100%
- Formulations du Béton de sable recyclé 100%, nommée SR100%
- Formulations du Béton d'un mélange SR 0.63/4 40%+ SD 60%, nommée M

2.7.3. La série traités par les boues ciment- NaHCO_3 :

- Formulations du Béton de sable 2% NaHCO_3 +4% CRS, nommée M 2%
- Formulations du Béton de sable 4% NaHCO_3 +4% CRS, nommée M 4%
- Formulations du Béton de sable 6% NaHCO_3 +4% CRS, nommée M 6%

La série non traités lavée par l' eau:

- Formulation de Béton d'un mélange SR 0.63/4 40%+ SD 60% (ML)

Les compositions étudiées sont présentées dans le Tableau II.8 suivant:

Tableau 2.24 composition des bétons de sable utilisés

Nom	C [g]	S.al [g]	S.D [g]	SR [g]	E/C	E
SA	450	1350	02	0	0.60	270
SD100%	450	0	1350	0	0.60	270
SR100%	450	0	0	1350	0.60	270
M	450	0	810	540	0.60	270
M 2%	450	0	810	540	0.60	270
M 4%	450	0	810	540	0.60	270
M 6%	450	0	810	540	0.60	270
ML	450	0	810	540	0.60	270

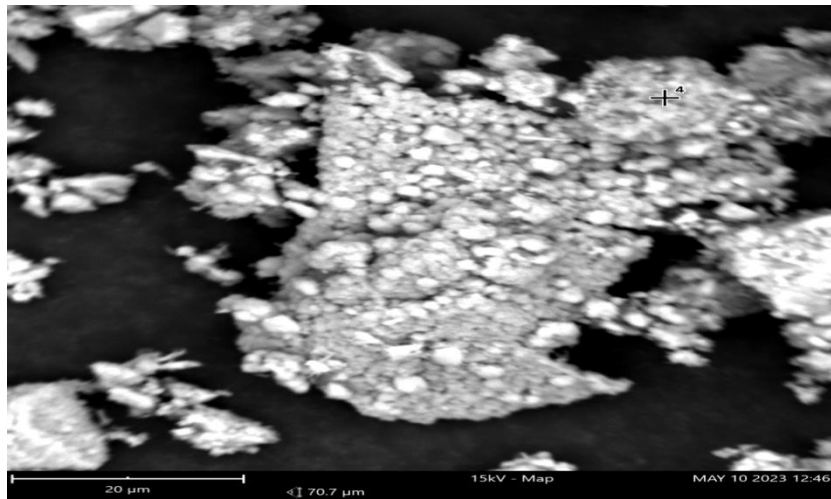


Figure 2.25 Image par microscopie électronique à balayage (MEB) du sable recyclé après le traitement chimique

Tableau 2.25: MEB+drx du sable de recyclé

Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Conc.	Weight Conc.
8	O	Oxygen	54.87	43.55
20	Ca	Calcium	18.99	37.75
6	C	Carbon	22.10	13.17
14	Si	Silicon	2.21	3.08
12	Mg	Magnesium	0.84	1.01
13	Al	Aluminium	0.58	0.77
16	S	Sulfur	0.42	0.66

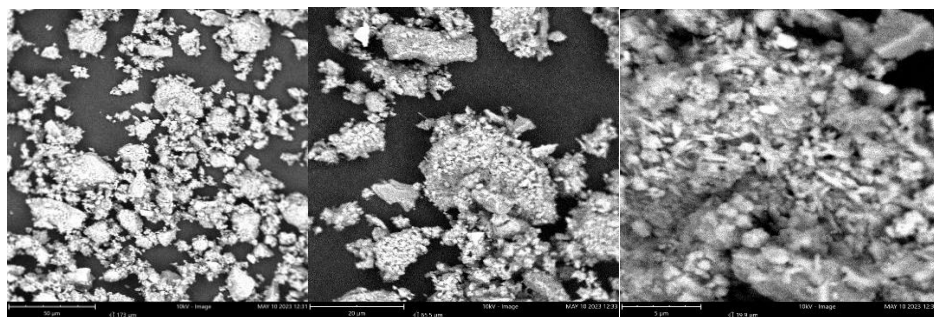


Figure 2.26: Image MEB 5,20,50 μm du sable recyclé traité

2.8. Procédure de fabrication des éprouvettes:

Les échantillons de mortiers ont été confectionnés suivant la norme EN 196 mais le malaxage est manuel. Le remplissage des moules prismatiques 40 x 40 x 160 mm a été effectué par piquage et vibration (Figure 3.5/b). et les étapes sont détaillées comme suit:

*Pesage les composants (Figure 2.27)

*Introduction tous les composants solides et secs dans un bac humide (ciment, sables, granulats) puis un malaxage à sec afin d'assurer une bonne dispersion des matériaux.

*On a ajouté l'eau légèrement jusqu'à d'obtenir un mélange homogène.



Figure 2.27. Le pesage des matériaux



Figure 2.28. Le malaxage à sec des matériaux



Figure 2.29 Le malaxage des matériaux

*Lubrification les moules métalliques.

*Le remplissage de l'éprouvette à moitié puis vibrer afin d'éliminer les vides. (Figure.2.30)

*Le remplissage total de l'éprouvette avec vibration.

**Figure 2.30 Remplissage à moitié****Figure 2.31 Remplissage total**

Dans ce travail nous avons confectionnés 100 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm au niveau de laboratoire S.A.R.L I.A.C.T situé à Hassani Abdelkrim.

En effet pour chaque formulation, le démoulage des éprouvettes s'est fait après 24h.

Les échantillons fabriqués sont conservés au niveau laboratoire $T = 23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures jusqu'au démoulage. Après 24 heures, une fois démoulés ils ont été immergés dans l'eau jusqu'aux échéances de 14, et 28 jours.

**Figure 2.32 Les éprouvettes coulés**

2.9. Programme d'expérimentation:

Cette section présente et explique les tests effectués possibles lors de ce travail.

2.9.1. L'étalement:

En raison du manque de l'indisponibilité les outils nécessaires, l'essai de l'étalement malheureusement n'est pas effectué. D'après plusieurs recherches identiques confirment que le rapport $E/C=0.60$ il est donné des résultats admissibles.

2.9.2. Teneur en air: (NA EN 12350-7)

Est une technique qui consiste à retenir volontairement dans ce matériau une quantité déterminée d'air occlus, qui restera piégé dans le béton. La méthode de calcul sera mathématique.

$$\text{Air occlus (\%)} = \frac{M_{\text{sec}} - M_{\text{frais}}}{M_{\text{frais}}} \times 100$$

2.9.3. Détermination de la masse volumique à l'état frais:

Cette mesure détermine le rendement volumique de la composition du béton frais et permet de vérifier la validité de la formulation théorique. Pour effectuer cette mesure, on utilise un récipient de volume et de masse connus. Ce récipient est rempli entièrement du béton de sable et sa sur face libre est ensuite arasée. On pèse alors le récipient plein. Le rapport entre la masse du béton (masse du récipient plein à laquelle on soustrait la masse du récipient vide) sur le volume du récipient correspond à la masse volumique du mortier frais exprimée en kg/m³.



Figure 2.33 Pesage du récipient cylindrique (environ 1 L) avec le béton

2.9.4. Porosité: NF P18-459

La porosité représente le rapport du volume des pores contenus d'un corps éprouve à son volume apparent, exprimé en pourcentage.

- **Principe:**

La mesure de la porosité accessible à l'eau du béton durci implique la détermination par pesées des:

*Masse dans l'air libre du même corps d'épreuve imbibé

*Masse à l'état sec.

La porosité ouverte et la masse volumique apparente sont calculées à partir de ces résultats.

- **Mode opératoire:**

*Placer le corps d'épreuve dans le système de suspension de la balance hydrostatique et le peser complètement immergé, soit M_{eau} .

*Extraire le corps d'épreuve de l'eau et essayer rapidement et soigneusement, à l'aide d'une éponge, afin d'éliminer l'eau superficielle, sans toutefois retirer l'eau des pores. Peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air, soit M_{air} .

*Sécher le corps d'épreuve à 105 ± 5 °C jusqu'à la masse constante. Ainsi déterminer la masse sèche M_{sec} .

$$P = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$



Figure2.34 Pesage hydrostatique des éprouvettes

2.10. Essai d'auscultation dynamique: EN12504-4

La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion, comme le montre la Figure II.18.

Trois mesures ont été effectuées pour chaque série. Ces mesures sont levées à l'âge 14 jours, et à l'âge 28 jours deux fois l'un avant le chauffage et la dernière fois après.



Figure 2.35 Mesure de la vitesse de propagation de sons sur des éprouvettes (4x4x16) cm³

2.10.1. La perte de masse:

On va étudier l'effet de la température sur le comportement physico- mécanique des mortiers à l'état durci à l'âge de 28 jours. Ces mortiers sont soumis à des températures de 200 °C, 500 °C et 700 °C avec une vitesse de la montée en température de 10°C/min.



Figure 2.36 les éprouvettes dans le four

2.10.2. Résistance à la flexion 3 points

La résistance à la traction par flexion a été effectuée sur trois éprouvettes prismatiques de mortier 40 x 40 x 160 mm pour chaque variable conformément à la norme NF EN 196-1 (2006). Cet essai est réalisé sur une presse de flexion à trois points de capacité de 5kN (Figure 3.6). La vitesse de chargement durant l'essai est de 50 N/sec.

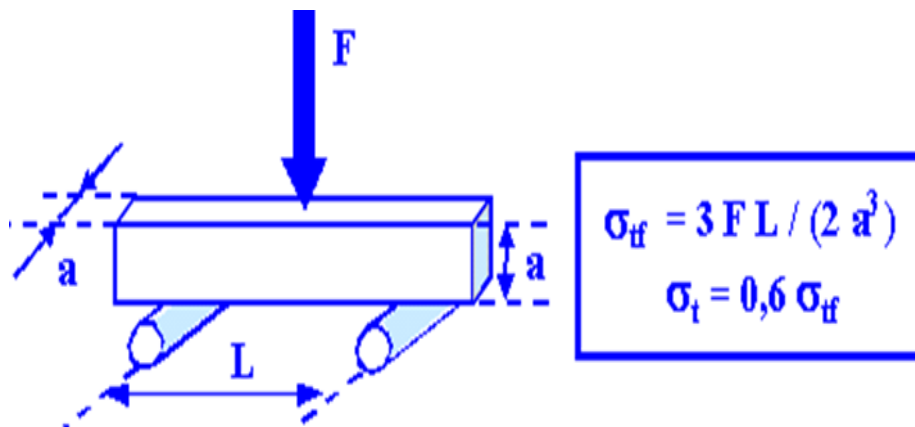


Figure 2.36 Déroulement de l'essai de flexion trois points pour éprouvettes prismatiques de mortiers 40 x 40 x160 mm.

Après avoir enregistré la valeur de la force de rupture F_r , on peut calculer la valeur de la résistance à la flexion par la formule ci-dessous.

$$R_t = \frac{3FL}{2a^3}$$

Où;

R_t : Résistance à la flexion exprimée en MPa.

F : Force de rupture exprimée en Newton.

a : dimension de la section ($a=40$ mm.)

L : portée de l'élément ($L=110$ mm)



Figure2.37 Eprouvette après écrasement

2.10.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression est la propriété la plus fréquemment mesurée sur le mortier. L'essai de résistance à la compression des mortiers a été effectué selon la norme NF P 18-406 (1981). Elle est mesurée sur des éprouvettes de 40 x 40 x 160 mm pour chaque mélange du mortier à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours. L'effort de compression est appliqué par une presse hydraulique de capacité 3000 kN (Figure 3.6) dont le chargement est contrôlé en force à raison de 0,5 à 0,6 kN/s.

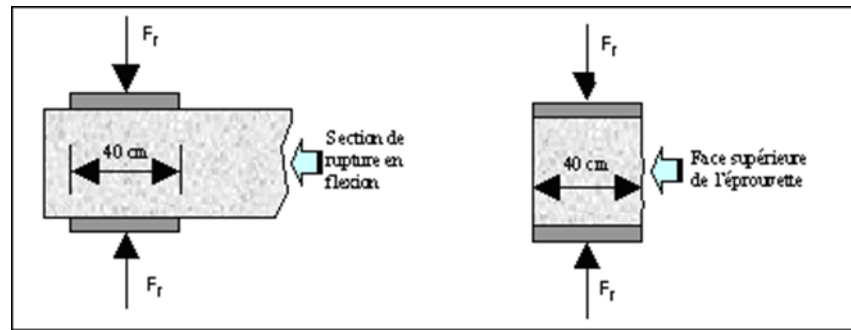


Figure 2.38.: Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme.

Après avoir enregistré la valeur de la force de rupture F_r , on peut calculer la valeur de la contrainte de compression donnée par la formule ci-dessous.

$$R_c = \frac{F_r}{b^2}$$

Où;

R_c : Résistance à la compression exprimée en MPa.

F_r : Force de rupture exprimée en Newton.

b^2 : section du prisme donnée par $40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$.



Figure: 2.39 Rupture d'un demi-prisme.

2.11. Résultats et interprétations des essais sur mortiers soumis des températures élevées.

- **Introduction:**

Dans ce chapitre on va étudier l'effet de la température sur le comportement physico-mécanique des mortiers incorporé avec le déchet d'aluminium à l'état durci. Ces mortiers sont soumis à des températures de 200 °C, 500 °C et 700 °C avec une vitesse de la montée en température de 10°C/min.

Les résultats de la perte de masse pour les différentes formulations de mortier soumis à différents températures (200 °C, 500 °C et 700 °C) sont représentés dans le troisième chapitre.



Figure:2.40: La texture des éprouvettes après le traitement thermique.

Chapitre 03

Analyse et discussion des résultats

3.1 Introduction:

Dans le présent chapitre, nous exposons les différents résultats expérimentaux relatifs aux différentes essais effectuées sur les bétons, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre 11. Une analyse et une discussion des résultats, suivies d'une comparaison avec ceux reproduits dans la littérature, y seront également présentées.

3.2. Béton à l'état frais

3.2.1. La masse volumique:

Tableau 3.1: Résultats de la masse volumique des bétons de sable à l'état frais

Série	Récipient vide(g)...P ₀	Récipient remplis (g).....P	Masse (g).... P- P ₀	M v.(g/cm ³) (P- P ₀)/v
SA	3431	5459	2028	2.32
SR100%	3431	5318	1887	2.15
M	3431	5474	2043	2.33
SD100%	3431	5465	2034	2.11

N.B: -Le volume du récipient est : $V = (5.1)^2 \times 3.14 \times 10.7 = 873.833 \text{ cm}^3$

-Pour chaque variante une seule mesure a été effectuée.

On observe que les masses volumiques de la série SR100% est diminuée par rapport les éprouvettes de référence SA. Cela peut être expliqué par la porosité importante du vieux mortier constituant le sable recyclé et la proportion importante de fines (> 5%) présentant une surface spécifique très élevée.

Et concernant la série M "mélange traité" on remarque une augmentation légère puisque la substitution des GR est bien exprimé avec le sable de dune qui été donné une bonne granulométrie.

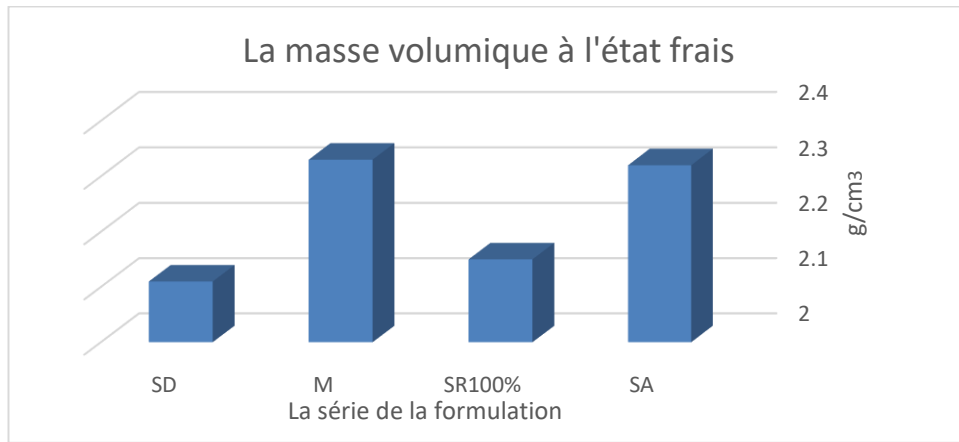


Figure 3.1: Variation de masse volumique selon le type de formulation

3.2.2. Air occlus:

Tableau 3.2: Les masses volumiques du mortier à l'état frais

	SD 100% (g)	SA100%(g)	SR100%(g)	M(40% SR+60%SD)
M recipient vide	3432	3432	3432	3432
V recipient (cm3)	873.88	873.88	873.88	873.88
Essai 01	5272	5449	5270	5489
Essai 02	5284	5446	5277	5470
Essai 03	5278	5437	5263	5484
Mmoy .tot	5278	5444	5270	5481
M moy net	1846	2012	1838	2049
ρ (g/cm3)	2.11	2.32	2.15	2.33

Tableau 3.3: Les résultats de l'air occlus

	SD 100% (g)	SA100%(g)	SR100%(g)	M(40% SR+60%SD)
M frais(g)	1846	2012	1838	2049
Msec(g)	1943	2116	1932	2150
Air occlus %	5	4.91	4.86	4.69

Dans littérature, l'intervalle de l'air occlus entre 4% ÷ 8%

3.3. Béton à l'état durci:

3.3.1. La porosité:

D'après le graphique, on remarque une augmentation importante de la porosité pour les variantes M2% et SR100% est de 16%, 15%, respectivement pour celle de béton SA (témoin) car l'incorporation des GR sont 100% et leur masse volumique est plus légère, ce qu'explique le volume des pores dans le matériau. Le mélange "M" qui donne une diminution est de 6% (presque 54%) cette diminution a cause d'un part, à la substitution du sable de dune(squelette bien graduée), et la quantité des fillers dans le GR en raison de type de broyage d'autre part.

Une porosité à l'eau de moins de 10% a été obtenue pour le béton M6%, alors que tous les restes; M2 % et M4% ont montré une porosité supérieure à 14%, et 12% respectivement, de l'à on peut dire que le traitement chimique a joué un rôle positif dans le remplissage des pores.

Les résultats obtenus sont comme suit :

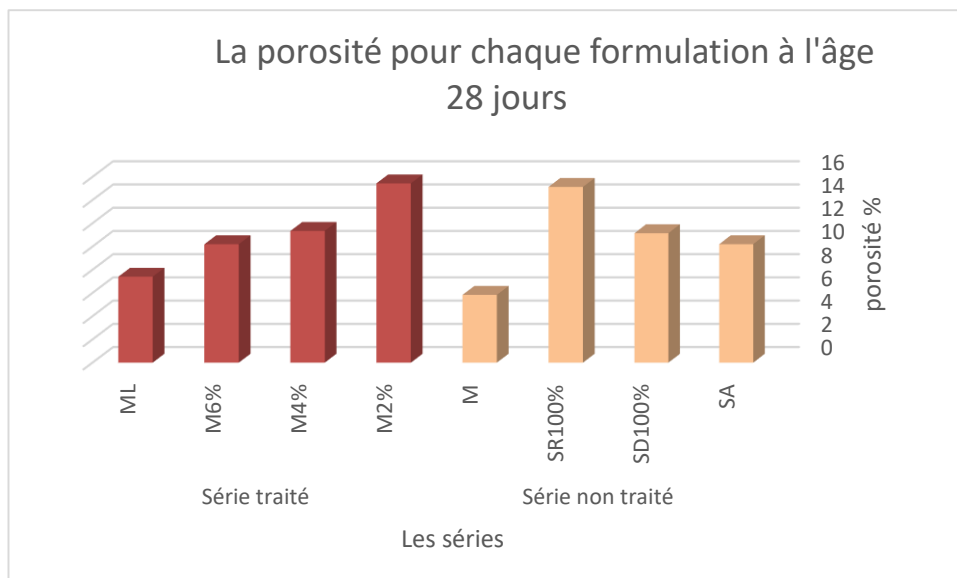


Figure 3.2 La porosité pour les séries utilisées à l'âge 28j

3.3.2.Essai d'auscultation dynamique: EN12504-4:

D'après la figure 3.3 on remarque que la vitesse ultrasonique pour les différents mortiers diminuée proportionnellement avec l'augmentation de la température. Plus on observe une augmentation légère presque 5% pour la série traitée et celles de la série traitée. Il n'y a pas de d'effet signalé sur la vitesse. A de degré 500°C on a constaté une

diminution de presque de 50% par rapport à celles avant le chauffage.

A 700 °C un éclatement pour la formulation SD100%, et une chute remarquable pour les restes.

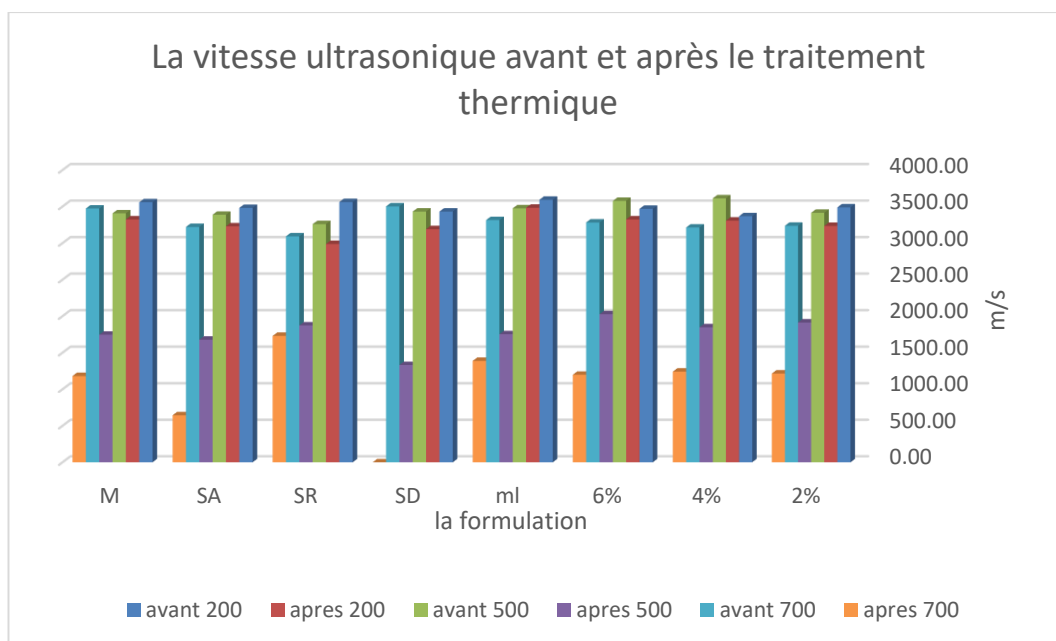


Figure 3.3. La vitesse ultrasonique avant et après le traitement thermique

3.3.3 La résistance à la compression et la flexion :

3.3.3.1. L'âge 14 jours :

On remarque que la résistance pour les ML, M2% arrivent à la résistance optimale qui est signalée à l'âge 28j, ainsi sur la vitesse ultrasonique. Et concernant la flexion on trouve des résultats identiques.

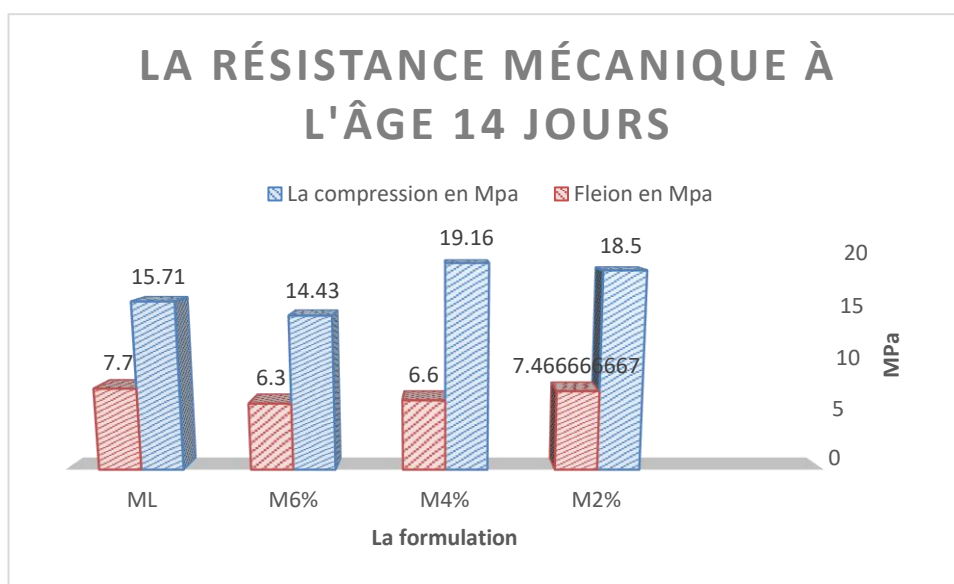


Figure 3.4. La résistance mécanique à l'age 14 jours

On observe que tous les variantes elle est données une augmentation légère à l'âge 28 j (presque 10%), et bonne résultat à l'âge 14 jours par rapport le SA.

3.3.3.2. L'âge 28 jours :

Premièrement on remarque un meilleur résultat obtenu dans M et ML par rapport le SA presque 1.5% à 20°C. Encore la série traitée qui a été soumis à 200°C signale une augmentation à celle le béton de référence SA.

A 700°C tous les séries non traitées ont été éclatées, par contre la série traité.

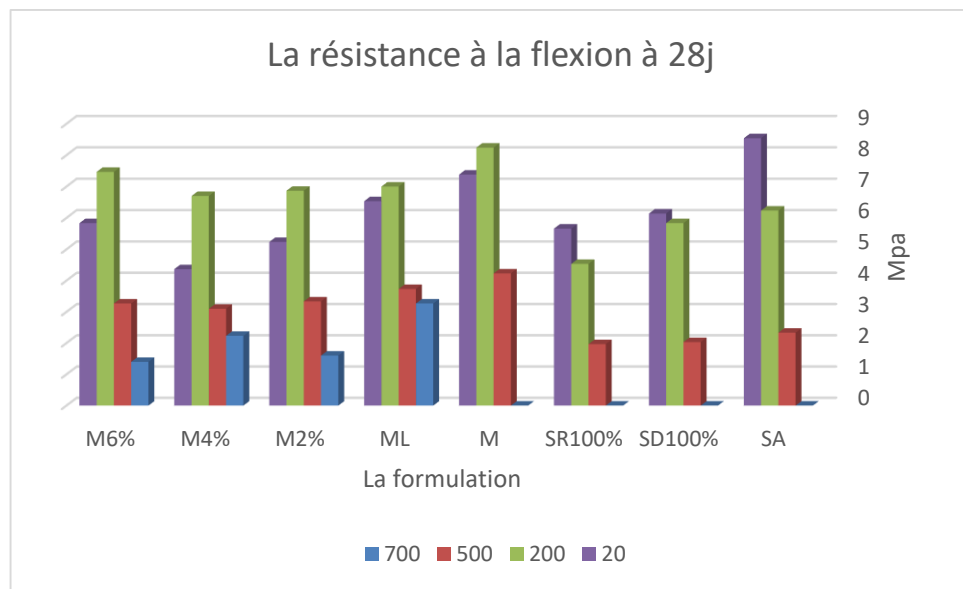


Figure 3.5. La résistance à la flexion à 28j

D'après la figure 3.5 on remarque une meilleure résultat pour les ; SA et ML à température 20°C, en outre une résistance identique pour la série traité. Une croissante importante à 200°C pour la série traité. Encore une différence presque de 45% entre le béton de référence SA et la série traité à 500°C. Le résultat minimum est au niveau la formulation SR100% car leur $M_f=3.75$.

Aucune fissuration n'est perceptible à l'œil nu pour toutes les formulations.

A 700°C pour la série traite ont été destructives, (volume de fissuration important). A contre la série traitée signale une bonne résistance.

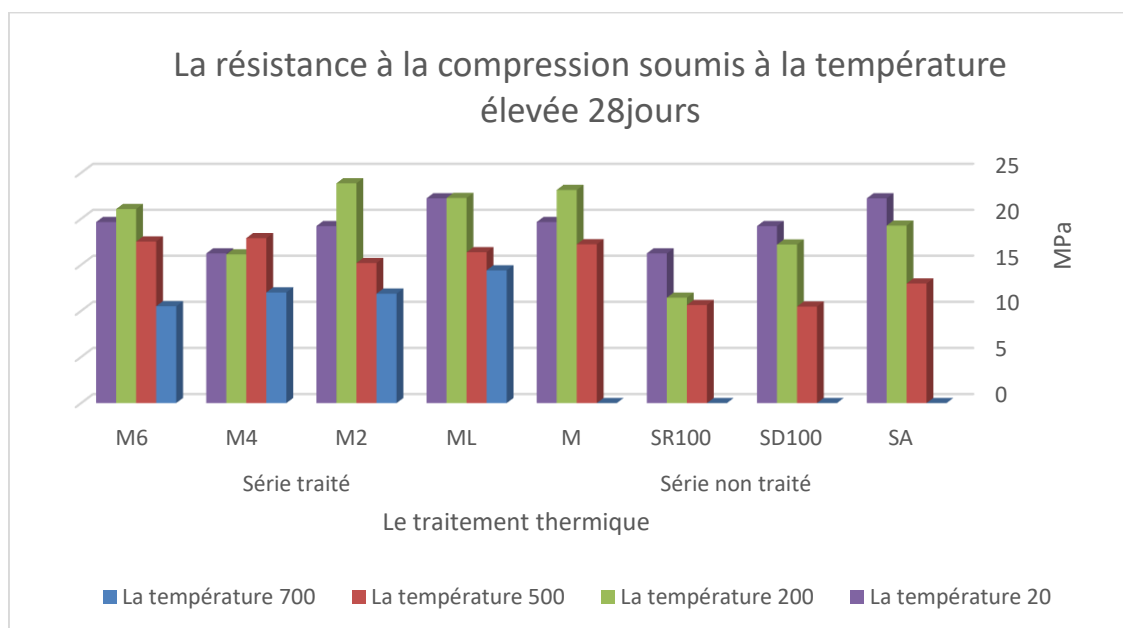


Figure 3.6: La résistance à la compression après le traitement thermique

3.3.4. La perte de masse :

On observe qu'il n'y a pas une influence sur toutes les formulations à 200°. Une perte de masse identique environ 10% pour toutes les formules, sauf le SA donne 5%, et la perte de masse la plus observée dans le SR100% à la 500°. A niveau le 700° éclatement totale de la série non traitée. Et une perte de masse importante pour la série traitée.

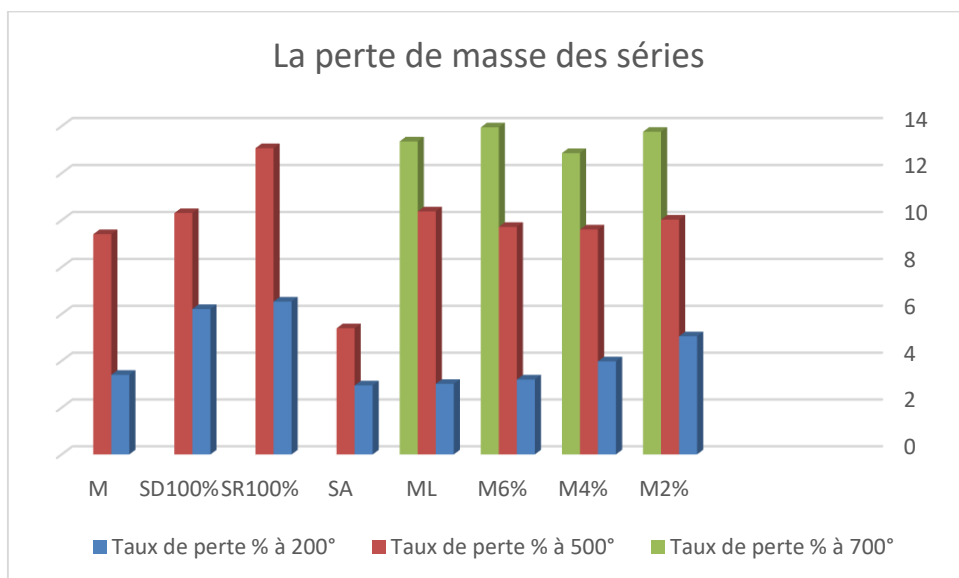


Figure 3.7: la perte de masse des compression

Jusqu'à 200°C, la perte de masse est essentiellement due à l'évaporation de l'eau libre, entre 200°C et 400°C et à la déshydratation de CSH, entre 500 et 700 °C.

3.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des travaux expérimentaux sur les mortiers formulés du point de vue :

- La masse volumique à l'état frais, air occlus.
- La porosité et la Vitesse ultrasonique.
- Caractéristiques mécaniques en compression et en flexion,
- Des interprétations à ces résultats et les justifier.

Les résultats des travaux expérimentaux sur l'effet de la température sur les mortiers formulés du point de vue :

- La perte de masse
- La porosité et la Vitesse ultrasonique.
- Caractéristiques mécaniques en compression et en flexion,

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Ce travail de fin d'étude a permis de rappeler le processus de recyclage des déchets de construction et de démolition en se focalisant sur les déchets de béton. Nous avons rappelé l'impact des différentes méthodes de recyclage et l'utilisation de granulats recyclés de béton dans la fabrication de nouveaux bétons et mortiers. Nous avons compris les normes qui limitent l'incorporation de granulat recyclé. Nous avons ensuite étudié l'effet du traitement chimique sur des granulats recyclés de béton. Finalement, nous avons analysé l'effet de l'utilisation des granulats recyclés trempés par les boues NaHCO_3 - CRS et non-traités sur les propriétés des mortiers.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La concentration du NaHCO_3 à 6% permet de réduire la porosité.
- Aucune effet signalé sur la vitesse ultraonique.
- Concernant la resistance en compression des mortiers, l'utilisation de sable recyclé 4/0.63 au taux 40% avec sable de dune (60%) augmente la resistance.
- * La résistance des mortiers en flexion donne une amélioration a pu être constatée pour la série traité.
- La perte de masse pour les différents mortiers augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température.
- Cette étude pourrait être complétée par des travaux sur la durabilité des mortiers à base de granulat recyclé, sur l'impact et l'effet de traitement chimique sur des réels déchets de béton issus de centres de revalorisation. Dans ce mémoire, la concentration de NaHCO_3 a eu lieu avec des concentrations en 2%,4% et 6% il serait alors intéressant d'étudier d'autre concentration en NaHCO_3 . Il serait également intéressant d'étudier économiquement parlant la faisabilité à l'échelle industrielle d'un tel traitement tant au niveau technologique qu'au niveau économique.

Bibliographie

Bibliographie

- 1) Eurostat Statistics Explained. Waste statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics. En ligne, consulté le 30 avril 2019.
- 2) Eurostat Statistics Explained. Population au 1er janvier. <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=fr&pcode=tps00001>. En ligne, consulté le 13 mai 2019.
- 3) Nabil Manseur and Sifax Ziani. **Etude et caractérisation des granulats recyclés de démolition**. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira-Béjaia, Juin 2014.
- 4) Christian Fischer and Mads Werge. Eu as a recycling society, present recycling levels of municipal waste and construction and demolition waste in the eu. WorkingPaper ETC/SCP working paper 2/2009, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, 2009.
- 5) Confédération Construction Wallonne. La gestion des déchets de construction. [https://www.confederationconstruction.be/Portals/28/cellule%20environnement/guidesdocumentsutiels/gestiondesdechets/Les%20d%C3%A9marches%20administratives%20\(stockage%20-%20transport-%20valorisation\).pdf](https://www.confederationconstruction.be/Portals/28/cellule%20environnement/guidesdocumentsutiels/gestiondesdechets/Les%20d%C3%A9marches%20administratives%20(stockage%20-%20transport-%20valorisation).pdf), 2013. En ligne, consulté le 27 mai 2019.
- 6) Nabil Manseur and Sifax Ziani. Etude et caractérisation des granulats recyclés de démolition. Master's thesis, Université Abderrahmane Mira-Béjaia, Juin 2014.
- 7) Simon Delvoie, Zengfeng Zhao, Frédéric Michel, and Luc Courard. State of the art on recycling techniques for the production of recycled sands and aggregates from construction and demolition wastes. In Circular Concrete - SeRaMCo - Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products, Luxembourg, LU, Novembre 2018. Mid-term conference SeRaMCo.
- 8) Raul Oliveira Neto, Pascal Gastineau, Bogdan Grigore Cazacliu, Lauredan Le Guen, Régis Sebben Paranhos, and Carlos Otávio Petter. An economic analysis of the processing technologies in cdw recycling platforms. Waste Management, 60 :277 – 289, 2017.
- 9) Simon Delvoie, Zengfeng Zhao, Frédéric Michel, and Luc Courard. Utilisation des sables et granulats recyclés dans le béton préfabriqué: comparaison des exigences

réglementaires et techniques en Europe. In Conférence Internationale Francophone NoMaD 2018, Liège, BE, Novembre 2018. Université de Liège.

10) NBN EN 1992-1-1. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (+ac :2010). Standard,NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 2005.

11) Zengfeng Zhao, Sébastien Rémond, Denis Damidot, and Weiya XU. Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2 :186–203, Juillet 2013.

12) APERROUT. Amélioration des performances des recyclés en domaine routier par optimisation des unités de traitement, 2016.

13) Zengfeng Zhao, Luc Courard, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Denis Fian- daga. Tentatives de prétraitement des granulats recyclés pour l'amélioration des bétons préfabriqués. In *Ciments, bétons et fibres - Matériaux et structures*, Lausanne, CH, Février 2015. 16e édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B.

14) NBN EN 1097-6. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Standard, NBN - Bureau for Standardisation, Bruxelles, BE, 2013.

15) Ashraf M. Wagih, Hossam Z. El-Karmoty, Magda Ebid, and Samir H. Okba. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, 9(3) :193–200, 2013.

16) José M.V Gomez-Soberon. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8) :1301 – 1311, 2002.

17) Sandrine Braymand, Sébastien Roux, and Hanaa Fares. Thème1 évaluation en laboratoire de techniques destinées à séparer la pâte de ciment du gravillon naturel d'origine. Rapport de recherche, IJL Nancy -IMFS, Mars 2017.

18) Elske Linß and Anette Mueller. High-performance sonic impulses—an alternative method for processing of concrete. *International Journal of Mineral Processing*, 74: S199

– S208, 2004. Special Issue Supplement Comminution 2002.

- 19) Kathy Bru, Sol`ene Touzé, Florent Bourgeois, Nicholas Lippiatt, and Yannick M´enard. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*, 126 :90 – 98, 2014.
- 20) F. Homand-Etienne and R. Houpert. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(2) :125 – 134, 1989.
- 21) Solène Touzé, Kathy Bru, Yannick M´enard, Alexander Weh, and Fr´ed´eric Von der Weid. Electrical fragmentation applied to the recycling of concrete waste – effect on aggregate liberation. *International Journal of Mineral Processing*, 158 :68 – 75, 2017.
- 22) Ngoc Tru Vu. Contribution à l’´etude de la corrosion par carbonatation du béton armé: approche expérimentale et probabiliste. PhD thesis, Université de Toulouse, Juin 2011.
- 23) Philippe Turcry. Carbonatation des matériaux cimentaires. https://edurmat.sciencesconf.org/conference/edurmat/pages/Pres_Ecole_EdurMat_Turcry_1.pdf. En ligne, consulté le 24 mai 2019.
- 24) Malek Batayneh, Iqbal Marie, and Ibrahim Asi. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12) :1870 – 1876, 2007.
- 25) Jiake Zhang, Caijun Shi, Yake Li, Xiaoying Pan, Chi-Sun Poon, and Zhaobin Xie. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 98 :1–7, Aouˆt 2015.
- 26) Kunwufine Deodonne. Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental. PhD thesis, Université de Strasbourg, Juillet 2015.
- 27) Zine-El-Abidine Tahar, El-Hadj Kadri, Tien-Tung NGO, Adrien Bouvet, Abdelhak Kaci, and Salima Aggoun. Etude de l’influence des granulats recycl´es sur le compor- tement des MBE. In RUGC 2015, Bayonne, FR, Mai 2015. E´tude de l’influence des granulats recyclés sur le comportement des MBE.
- 28) Sami W. Tabsh and Akmal S. Abdelfatah. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2) :1163

– 1167, 2009.

29) Mohamed ElKarim Bouarroudj, Sébastien Remond, Frédéric Michel, Zengfeng Zhao, David Bulteel, and Luc Courard. Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. *Materials and Structures*, 52(1) :18, Jan 2019.

30) Francisco Agrela, P Alaejos, and M.S. De Juan. Properties of concrete with recycled aggregates, chapter 12, pages 304 – 329. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. Woodhead Publishing, 2013.

31) Monalisa Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti. Recycled aggregate from c&d waste & its use in concrete – a breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68 :501 – 516, 2014.

32) Christian Fischer and Mads Werge. Eu as a recycling society, present recycling levels of municipal waste and construction and demolition waste in the eu. WorkingPaper ETC/SCP working paper 2/2009, European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production, 2009.

33) DELALDJA Dalila: **Valorisation des déchets industriels dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées, mémoire** fin d'études présenté pour l'obtention du diplôme de master filiere: génie civil specialité: Matériaux.

34) Brahim DJEMACI: **La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité**, mémoire fin d'études THÈSE de doctorat en sciences économiques université de Rouen.

35) Berredjem Layachi1*, Arabi Nourredine2, Molez Laurent3, Jean-Yves Brossault4 et Nguyen Van-Minh5 **Durabilité des mortiers de ciment à base du sable recyclé.**

36) François de Larrard et Horacio Colina: **Caractérisation des granulats de béton recyclé**. HAL Id: hal-02928251.<https://hal.mines-ales.fr/hal-02928251> Submitted on 2 Sep 2020

37) Henry Simon: **Prétraitement des granulats recyclés au moyen de la carbonatation accélérée pour la fabrication de mortiers** mémoire fin d'études (master en genie civil) année 2018-2019. Université de Liège.

38)J. N Reddy, Chien Ming Wang, Van Hai Luaong et Anh Tuan Le : ICSCEA 2021:Proceeding of the Second International Conférence on Sustainable Civil Engineering and Architecture .ISSN2366-2565(electronic) ISBN 978-981-19-3303-08

39) Ministère de l'environnement; National waste agency: Rapport sur l'état des déchets en Algérie. exercice 2020.

Annexe

Annexe 01



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
Groupe Industriel des Ciments d'Algérie
Société des Ciments de Tébessa
« S.C.T »

N° Identification Fiscale : 099 412 200 315 638 - N° d'Article d'Imposition : 12 200 101 077
N° Registre de Commerce : 98 B05 82 093 00/12

FICHE TECHNIQUE

PRODUIT CEM I 42.5 N-SR5 NA 442/2013

ANALYSE CHIMIQUES			ESSAIS PHYSIQUES			
Eléments	Garanties NA 442	Teneurs %		Garanties NA 442		Mesures
SiO2 (NA 5042)		20.99	PS (g/Cm³)(NA231)			3.00
AL2O3 (NA 5042)		4.30	SSB (cm²/g)(NA231)			3360
Fe2O3 (NA 5042)		4.18	Temps de Prise	Début	≥1h	02h45mn
CaO (NA 5042)		64.36		Fin		03h28mn
MgO (NA 5042)	≤ 4%	1.14	Expansion	A. Chaud	≤ 10 mm	0.30
SO3 (NA 5042)	≤2,5%	2.34		A. Froid		
CL	≤0,10 %	0.002	Refus %	45 μ		10.80
P.A.F (NA 5042)	≤ 5%	1.95	ESSAIS MECANIKES (NA 234)			
RI (NA 5042)	≤5%	0.40				
C3A	≤5%	4.32				
C4AF		12.71				
				Echéance en jours	Garanties NA 442	Mesures
				02 JOURS		4.4



Société des Ciments de Tébessa
FILIALE DU GROUPE INDUSTRIEL DES CEMENTS D'ALGER « Groupe GICA »
CIMENTIERIE : Zone Industrielle BP 03 El Malabiod (W. Tébessa) - Algérie.
Tél : (037 52 58 42) - Fax : (037 52 58 41)
Email : Directeur@unite.sct@gmail.com

Annexe 02

2023/06/06 12:29



SOLVAY

SOLVAY
CHIMICA ITALIA S.p.A.
Cap. Soc. EUR 18.372.400 i.v.
 C.N.I. Fisc. 00101310182 - P.IVA IT00101310182

SOLVAY Product Data Sheet
 CoA Healthcare products
SPE - B 05.02.30 - 06/2018 - Ed. 21

BICAR FOOD 0/13 BICARBONATE DE SODIUM

LOT: J4000/ROA120214

Caractères: Poudre cristalline blanche. Stable en air sec mais se décompose lentement en air humide. Les solutions, récemment préparées dans l'eau froide sans agitation, sont alcalines au papier tournesol. L'alcalinité de la solution augmente par agitation ou chauffage. 1 g se dissout dans 10 mL d'eau. Insoluble dans l'alcool.

Caractéristiques	Unités	Valeur	Spécification	Méthode	Réf
Identification Sodium	-	Conforme	Conforme	Solvay	3
Identification Bicarbonate	-	Conforme	Conforme	Solvay	3
Sels d'ammonium (NH ₄)	-	Pas d'odeur	Pas d'odeur	FCC	1
Ploimb (Pb)	ppm	< 0,1	< = 2,0	Solvay	2
Test substances insolubles	-	Limpide	Limpide	Solvay	1
Parte à dessiccation (H ₂ O)	%	0,05	< = 0,25	Solvay	2
Alcalinité totale (NaHCO ₃)	%	100,1	99,0 - 100,5	Solvay	1
pH (1 % dans l'eau)	-	8,4	8,0 - 8,6	Solvay	1
Mercuré(Hg)	ppm	< 0,012	< = 1,000	Solvay	3
Arsenic (As)	ppm	< 2,0	< = 2,0	Solvay	1
Poids spéo. p écoulement libre	kg/dm ³	1,02	0,80 - 1,30	Solvay	2
Food Chemicals CODEX	-	Conform 12th ed.	Conform 12th ed.		
Directive Eur. 2008/84/CE	-	Conform 9th ed.	Conform 9th ed.		
European Regulation	-	231/2012/EU	231/2012/EU		
< 0,063 mm	%	35,0	< = 40,0	Solvay	2
< 0,200 mm	%	81,8	> = 70,0	Solvay	2
Date de production		30.04.2021			
Best-before-date		30.04.2024			

1 - Analyse effectuée sur chaque lot
 2 - Analyse hebdomadaire
 3 - Analyse mensuelle

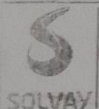
Les méthodes Solvay ont été validées dans nos laboratoires
 Les spécifications sont définies dans la feuille de données du produit.

BICAR® FOOD peut être utilisé comme additif alimentaire
 E 500(ii). Il est fabriqué en respectant les conditions HACCP.

Page 1 / 2

AI CAMERA
 Shot on realme C11 2021

Annexe 03



SOLVAY
CHIMICA ITALIA S.p.A.

Cap. Soc. EUR 15.232.450 i.v.
Ced. Fisc. 06104349182 - P.A.V. IT0124240432

SOLVAY Product Data Sheet

Soda Hydroxide products

SPE - B 05.02.30 - 06/2018 - Ed. 21

BICAR FOOD 0/13 BICARBONATE DE SODIUM

LOT: J4000/ROA120214

Caractéristiques: Poudre cristalline blanche. Stable en air sec mais se décompose lentement en air humide. Les solutions, récemment préparées dans l'eau froide sans agitation, sont alcalines au papier tournesol. L'alcalinité de la solution augmente par agitation ou chauffage. 1 g se dissout dans 10 mL d'eau. Insoluble dans l'alcool.

Caractéristiques	Unités	Valeur	Spécification	Méthode	Réf
Identification Sodium	-	Conforme	Conforme	Solvay	3
Identification Bicarbonate	-	Conforme	Conforme	Solvay	3
Sels d'ammonium (NH ₄)	-	Pas d'odeur	Pas d'odeur	FCC	1
Plomb (Pb)	ppm	< 0,1	< = 2,0	Solvay	3
Test substances insolubles	-	Limpe	Limpe	Solvay	1
Parte à dessiccation (H ₂ O)	%	0,05	< = 0,25	Solvay	2
Alcalinité totale (NaHCO ₃)	%	100,1	99,0 - 100,5	Solvay	1
pH (1 % dans l'eau)	-	8,4	8,0 - 8,6	Solvay	1
Mercuré(Hg)	ppm	< 0,012	< = 1,000	Solvay	3
Arsenic (As)	ppm	< 2,0	< = 2,0	Solvay	1
Poids spéc. p. écoulement libre	kg/dm ³	1,02	0,80 - 1,30	Solvay	2
Food Chemicals CODEX	-	Conform 12th ed.	Conform 12th ed.		
Directive Eur. 2008/84/CE	-	Conform 9th ed.	Conform 9th ed.		
European Regulation	-	231/2012/EU	231/2012/EU		
< 0,063 mm	%	35,0	< = 40,0	Solvay	2
< 0,200 mm	%	81,8	> = 70,0	Solvay	2
Date de production		30.04.2021			
Best-before-date		30.04.2024			

- 1 - Analyse effectuée sur chaque lot
- 2 - Analyse hebdomadaire
- 3 - Analyse mensuelle

Les méthodes Solvay ont été validées dans nos laboratoires.
 Les spécifications sont définies dans la feuille de données du produit.

BICAR® FOOD peut être utilisé comme additif alimentaire
 E 500(III). Il est fabriqué en respectant les conditions HACCP.

Page 1 / 2

 AI CAMERA
 Shot on redline C11 2021

2023/06/06 12:29

جَمَلُ الدِّينِ