

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De l'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



Faculté de Technologies

Département D'hydraulique et de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

Présenté En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

en Génie Civil

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

**Amélioration des propriétés physiques
d'un mortier écologique**

• **Encadreur :**

▪ Dr. Tarek Djedid

• **Co-encadreur :**

▪ Tahar Zerig

• **Présenté Par :**

▪ Bellaggoun Mohammed Nadjib

▪ Maaloul Abderrahmane

▪ Dadi Nacer

▪ Maamri Mahmoud

Membres du Jury

▪ Président : Mohammed Mani Univ. EL-oued

▪ Examineur Dr. Abdelaziz Logbi Univ. EL-oued

Promotion : Juin 2023

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu **DIEU** miséricordieux qui nous a donné la vie, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Le présent travail a été réalisé au sein du laboratoire pédagogique d'hydraulique et de génie civil et d'hydraulique de l'Université Hamma Lakhdar El-oued, et laboratoire des travaux publics et bâtiment **AYATI Salah**, et laboratoire **Nizolab**.

Nous tenons à remercier chaleureusement et à exprimer notre très grande reconnaissance à notre encadreur Monsieur DJEDID Tarek ; Maître de conférences au Département de Génie civil et d'hydraulique, Université d'El-oued, qui nous a dirigé tout au long de ce travail. Nous le remercions pour son aide scientifique, son expérience et son efficacité qui nous a transmis avec passion. Sans elle, ce projet de fin d'études n'aurait pas pu voir le jour. Quelle trouve ici l'expression de nous sincères gratitude.

Nos remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous tenons à remercier sincèrement tout ce que de près ou de loin ont participé la rédaction de ce document il s'agit plus parti clairement :

Dr. Mohammed Mani, Dr. Abdelaziz Logbi, Dr. Mohammed zouhir kaab, Dr. Ali farik, Dr. Ilyes slimane.

Nous tenons à remercier les techniciennes du laboratoire pédagogique de génie civil et d'hydraulique de l'Université d'El-oued, laboratoire **AYATI Salah**, et laboratoire **Nizolab** pour leurs disponibilités pour mener à bien nos essais à l'intérieur du laboratoire.

Nous remercions également toute nos familles pour leurs patiences durant ces derniers mois et pour leurs encouragements, surtout nos parents nos épouses. Merci pour tous.

Ce quand fait dans notre vie résonnera dans l'éternité.

Dédicace

*A l'aide d'Allah tout puissant, Nous avons pu réaliser ce
modeste travail que je dédie : A mes chers parents*

A mes frères, et sœurs

A Ma chère épouse Chahrazade,

A mes enfants Souhaib , Aymen , Zid

Mes filles Rym , Roeya , Raouane

A mes amis,

A mon encadreur : m. Tarek Djedid

À tous les enseignants qui ont contribué à mon apprentissage.

Et à ceux qui m'ont donné un coup de main

Et pour tous ceux qui aiment la Génie civil.

Bellaggoun Mohammed Nadjib

الإهداء

إلى كل من علمني حرفا في هذه الدنيا الفانية

إلى روح أمي العزيزة الغالية

إلى أبي العزيز حفظه الله وأدامه نورا لدربي

إلى زوجتي العزيزة وأبنائي الأعزاء

إلى أخواتي البنات وجميع أفراد الأسرة التربوية في الجزائر الحرة الأبية

إلى كل هؤلاء وهؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع

ونسأل الله أن يجعله نبراسا لكل طالب علم

أمين يا رب العالمين

دادي الناصر

الاهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

أهدي هذا العمل المتواضع إلى روح أبي الطيبة

وإلى القلب الكبير النابض بالحب والحنان، أمي الغالية

إلى زوجتي العزيزة وأبنائي وبناتي الأحباء

إلى سندي وقوتي في الصعاب والضيق أخي "خريف"

إلى من بهم يشد ساعدي وتعلو هامتي، هم سندي وركائز نجاحي إخوتي وأخواتي.

يبقى لنا دائماً العجز في وصف كلمات الشكر خصوصاً للأرواح التي تمضي

خلال الأيام والتي تتصف بالعطاء بلا حدود أساتذتي جميعاً

إلى من فرحت قلوبهم بفرحي وحزنت لحزني، أصدقائي جميعاً

معلول عبد الرحمان

الإهداء

إلى من أفصلها على نفسي، ولم لا، فلقد ضحّت من أجلي

ولم تدّخر جهدًا في سبيل إسعادي على الدوام

(أمّي الحبيبة).

نسير في دروب الحياة، ويبقى من يُسيطر على أذهاننا في كل مسلك نسلكه

صاحب الوجه الطيب، والأفعال الحسنة.

فلم يبخل عليّ طيلة حياته

(والدي العزيز).

إلى أصدقائي، وجميع من وقفوا بجواري وساعدوني بكل ما يملكون، وفي أصعدة كثيرة

أُقدّم لكم هذا البحث العلمي، وأتمنّى أن يجوز على رضاكم.

معمرى محمود

ملخص:

ترتكز إعادة استخدام وإعادة تدوير نفايات البناء على تحضير الركام المعاد تدويره لاستخدامه في الخرسانة أو الملاط الإسمنتي عن طريق إضافة بعض الركام المعاد تدويره بدلاً من الركام الطبيعي إلى الخليط، لإنتاج الخرسانة أو الملاط المعاد تدويرها، مما يسمح باستعادة هذه النفايات والحفاظ على البيئة وتوفير الطاقة والمواد اللازمة لتصنيع الخرسانة. الهدف من هذا العمل التجريبي هو دراسة مزايا وإمكانية الاستبدال الكامل لرمال البناء واستبداله بالرمال المعاد تدويرها ورمال الكثبان ومتابعة تأثيرها على سلوك الملاط الذي يمكن أن يساهم في معالجة عيوب مكونات الملاط وتحسين خصائصه الميكانيكية والفيزيائية.

يعتمد تكوين الملاط على استبدال رمل البناء برمل الكثبان والرمل المعاد تدويره بنسبة 60 و 40٪ على التوالي، وكمية الإسمنت ثابتة عند 450 كجم / م³.

تمت دراسة الملاط دون معالجة الركام، ثم تحت تأثير الغسل بالماء، وأخيراً تحت تأثير المعالجة الكيميائية بنسب متغيرة على ثلاث مراحل.

يهدف هذا العمل الحالي إلى تحسين الخصائص الفيزيائية للملاط المختلط (الكثبان الرملية والرمل المعاد تدويره) وفحص مدى ملاءمة استخدامه للتطبيقات المختلفة في تشييد المباني.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح تأثير المعالجة الكيميائية إيجاباً سواء على الخصائص الفيزيائية أو الميكانيكية.

- **الكلمات المفتاحية:** الملاط، الكثبان الرملية، الرمل المعاد تدويره، مخلفات البناء، تحسين الخواص

الميكانيكية والفيزيائية.

Résumé :

La réutilisation et le recyclage des déchets de construction se concentrent sur la préparation de granulats recyclés à utiliser dans le béton ou le mortier de ciment en ajoutant une partie du granulats recyclés au lieu du granulats naturels au mélange, pour produire du béton ou du mortier recyclés, ce qui permet la valorisation de ces déchets et la préservation de l'environnement Fournir de l'énergie et des matériaux pour la fabrication du béton.

Le but de ce travail expérimental est d'étudier les avantages et la possibilité de remplacer totalement les sables naturels et de les remplacer par des sables recyclés et des sables de dunes et de suivre leur effet sur le comportement des mortiers, ce qui peut contribuer à remédier aux défauts des composants du mortier et en améliorant ses propriétés mécaniques et physiques.

La composition des mélanges est basée sur le remplacement du sable alluvionnaire par du sable de dune et du sable recyclés dans la proportion de 60 et 40% respectivement, la quantité de ciment fixée à 450kg/m³.

Ce mortier a été étudié sans traitement de granulats, puis sous l'effet d'un lavage à l'eau, et enfin sous l'effet d'un traitement chimique dans des proportions variables en trois étapes.

Ce présent travail a pour objectif d'amélioration des propriétés physiques d'un mortier mélange (sable de dune et sable recyclé) et d'examiner l'aptitude de l'utiliser aux diverses applications de la construction des bâtiments.

Les résultats obtenus montrent clairement l'effet positif du traitement chimique tant sur les propriétés physiques que mécaniques.

- **Mots clés** : mortier, sable de dune, sable recyclé, déchets de construction, amélioration les propriétés mécaniques et physiques.

Abstract :

This present work aims to improve the physical properties of a mixed mortar (dune sand and recycled sand) and to examine the suitability of using it for various applications in the construction of buildings.

The aim of this experimental work is to study the advantages and the possibility of completely replacing natural sands and replacing them with recycled sands and dune sands and to follow their effect on the behavior of mortars, which can contribute to remedying defects in mortar components and improving its mechanical and physical properties.

The composition of the mixtures is based on the replacement of alluvial sand by dune sand and recycled sand in the proportion of 60 and 40% respectively, the quantity of cement fixed at 450kg/m³.

This mortar was studied without treatment of aggregates, then under the effect of washing with water, and finally under the effect of a chemical treatment in variable proportions in three stages.

This mortar was studied without treatment of aggregates, then under the effect of washing with water, and finally under the effect of a chemical treatment in variable proportions in three stages.

The results obtained clearly show the positive effect of the chemical treatment on both the physical and mechanical properties.

- **Key words:** mortar, dune sand, recycled sand, construction waste, improvement of mechanical and physical properties.

Sommaire

RESUME

ABSTRACT

ملخص

LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	VIII
ABREVIATION	X
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre 01 : Recherche bibliographique

I.1. Introduction	2
I.1.1. Définition	2
I.1.2. Constituants des mortiers.....	2
I.1.2.1. Le Liant	2
I.1.2.2. Le sable	2
I.1.2.3. L'eau de gâchage.....	3
I.1.2.4. L'adjuvant	3
I.1.2.5. Les ajouts.....	3
I.1.3. Fabrication des mortiers	3
I.1.3.1. Fabrication à la main	3
I.1.3.2. Fabrication mécanique.....	4
I.1.4. Les différents types de mortiers.....	5
I.1.4.1. Mortier pour assembler des éléments de construction.....	5
I.1.4.2. Mortier pour enduire un mur	5
I.1.4.3. Mortier pour sceller le carrelage	5
I.1.4.4. Mortier pour la fabrication de béton	6
I.1.4.5. Mortiers pour l'étanchéité	6
I.1.4.6. Mortiers pour résister aux fortes températures	6
I.1.4.7. Mortier industriel.....	6
I.1.5. Les caractéristiques de mortier	6
I.1.6. Classes des mortiers selon leur domaine d'utilisation	7
I.2. Le sable.....	7

I.2.1. Définition de sable.....	7
I.2.2. Les classes de sables	7
I.2.3. Les familles de sables	8
I.2.3.1. Les sables roulés siliceux (0 /2)	8
I.2.3.2. Les sables de concassage calcaires.....	8
I.2.3.3. Le sable de dune	8
I.2.4. Les sables de dunes	8
I.2.4.1. Définition	9
I.2.4.2. Intérêt de sable de dune	9
I.2.5. Type de dune	10
I.2.6. Les différents milieux de la dune.....	10
I.2.6.1. Les dunes mobiles	10
I.2.6.2. Les dunes noires (arbres)	11
I.2.6.3. La dune verte (appelée aussi avant-dune ou dune embryonnaire)	11
I.2.6.4. La dune blanche ou jaune.....	11
I.2.6.5. La dune grise	11
I.2.6.6. La dune brune (dune boisée ou frange forestière)	12
I.2.6.7 La dune littorale	12
I.2.7. Données bibliographiques sur les sables de dunes Algérien	12
I.2.7.1 Compositions granulométriques.....	12
I.2.7.2 Composition minéralogique	12
I.2.7.3 Caractéristiques physiques.....	13
I.2.7.4 Composition chimique	13
I.3. Le sable de béton recycle	14
I.3.1. Introduction.....	14
I.3.2. Valorisation des sables de béton recycle	14
I.3.3. Béton de démolition	14
I.3.4. Caractéristiques des granulats recyclés de béton.....	15
I.4. Conclusion	16

Chapitre 02

Résultats expérimentaux

II.1. Introduction	17
II.2. Matériaux utilisés	17
II.3. Caractéristiques des matériaux	18
II.3.1. Caractéristiques du ciment utilisé	18
II.3.2. L'eau de gâchage	20
II.3.3. Caractéristique du sable	20
II.3.3.1. Caractéristique du sable de dune.....	20
II.3.3.1.1. Analyses chimiques	20
II.3.3.2. Caractéristique du sable alluvionnaire	21
II.3.3.2.1. Analyses chimiques	22
II.3.3.3. Caractéristique du sable de béton recycle	23
II.3.3.3.1. Analyses chimiques	23
II.3.3.4. Analyses granulométriques	25
II.3.3.4.1 Module de finesse	29
II.3.3.4.2. Modification du module de finesse	29
II.3.3.4.3. Calcul des coef. d'uniformité (Cu) et des coef. de classement (Cc) ...	30
II.3.3.4.4. Analyse des courbes granulométriques	31
II.3.3.5 La masse volumique du sable	31
II.3.3.5.1. Masse volumique apparent	31
II.3.3.5.2. Masse volumique absolue	33
II.3.3.5.3. Equivalent du sable	35
II.4. Formulation des compositions	38
II.4.1. Traitement du granulat	39
II.4.1.1. Méthode de lavage	40
II.4.1.2. Méthode de traitement chimique.....	40
II.4.2 Confection des éprouvettes (malaxage et mise en place)	41
II.4.2.1 Préparation de la pâte	42
II.4.2.2 Confection des éprouvettes	42
II.4.3. Conservation des éprouvettes	43
II.5. Essais de caractérisation des mortiers	43
II.5.1. Essais sur mortier frais	43

II.5.1.1. L'ouvrabilité	43
II.5.1.2. Masse Volumique à l'état frais	44
II.5.1.3. Air occlus	45
II.5.2. Essais sur mortier durci	46
II.5.2.1. Absorption par immersion totale	46
II.5.2.2. Essai d'absorption par capillarité	46
II.5.2.3. Porosité	47
II.5.2.4. Masses volumiques humide et sèche	48
II.5.2.5. Résistance à la traction par flexion trois points	49
II.5.2.6. Résistance à la compression	50
II.5.2.7 Essai ultrasonique	51
II.5.2.8. Retrait	53
II.6. Conclusion	54

Chapitre 03

Interprétation et exploitation des résultats

III.1. Introduction	55
III.2. Influence du compositions et les traitements sur les propriétés du mortier	55
III.2.1. Les propriétés physiques	55
III.2.1.1. L'absorption par immersion totale	56
III.2.1.2. L'absorption capillaire	57
III.2.1.3. La porosité	59
III.2.1.4. Les masses volumiques humides et sèches	60
III.2.2. Les propriétés mécaniques	61
III.2.2.1. La résistance à la compression et à la traction	61
III.2.2.2. Vitesse ultrasonique	62
III.2.3. Les propriétés rhéologiques	63
III.2.3.1. Le retrait des éprouvettes	63
III.3. Conclusion	64
CONCLUSION GENERALE	65
ANNEXE	66

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Étude Bibliographique

Figure I.1 : Exemple d'un gâchait de mortier.....	2
Figure I.2 : Exemple d'une fabrication des mortiers à la main	4
Figure I.3 : Exemple d'une fabrication des mortiers mécanique	4
Figure I.4 : Enduits isolants et enduits de façade	5
Figure I.5 : Sables roulés siliceux	8
Figure I.6 : Sable de concassage calcaire	8
Figure I.7 : Sable de dune	8
Figure I.8 : Sable de dune	9
Figure I.9 : Les dunes mobiles	10
Figure I.10 : Sable de dune noire	11
Figure I.11 : Sable de dune verte	11
Figure I.12 : Sable de dune blanche	11
Figure I.13 : Sable de dune grise	11
Figure I.14 : Sable de dune brune	12
Figure I.15 : La dune littorale	12
Figure I.16 : Formes des granulats recyclés	14

Chapitre II : Résultats expérimentaux

Figure II.1 : Solution chimique NaHCO ₃ avec l'eau distillé	18
Figure II.2 : Sac de ciment utilisé.....	19
Figure II.3 : Fiche technique de ciment	19
Figure II.4 : Photo du sable de dune utilisé	20
Figure II.5 : Aspect normal de granulats de sable de dune	21
Figure II.6 : Diagramme du composante de granulats de sable de dune	21
Figure I.7 : Photo du sable de BEADJ utilisé	21
Figure II.8 : Aspect normal de granulats de sable alluvionnaire	22
Figure II.9 : Diagramme du composante de granulats de sable alluvionnaire	22
Figure II.10 : préparation des granulats du béton de démolition	23
Figure II.11 : Aspect normal de granulats de sable recycle	24

Figure II.12 : Diagramme du composante de granulats de sable recyclé	24
Figure II.13 : Aspect normal de granulats de sable recyclé traité	25
Figure II.14 : Diagramme du composante de granulats de sable recyclé traité	25
Figure II.15 : Photo du tamis utilisée	26
Figure II.16 : Courbe granulométrique des sables utilisés	28
Figure II.17 : Essais de la masse volumique apparente du sable de dune utilisé	32
Figure II.18 : Essais (ρ apparent) du sable alluvionnaire	33
Figure II.19 : Essais (ρ apparent) du sable recyclé.....	33
Figure II.20 : Essais (ρ apparent) du sable mélange	33
Figure II.21 : Essais (ρ absolue) du sable de dune	34
Figure II.22 : Essais (ρ absolue) du sable alluvionnaire	34
Figure II.23 : Essais (ρ absolue) du sable recyclé.....	35
Figure II.24 : Essais (ρ absolue) du sable mélange	35
Figure II.25 : Essai de l'équivalent du sable	36
Figure II.26 : lavage du granulats par l'eau	40
Figure II.27 : Préparation du traitement chimique du granulats à chaque variante	41
Figure II.28 : : Les étapes pour préparer la pâte de mortier	42
Figure II.29 : Lubrification des moules (4 x 4 x 16) cm	43
Figure II.30 : vibration manuel des moules	43
Figure II.31 : Dernière vibration et rasage	43
Figure II.32 : Prélèvement et étiquetage des éprouvettes	43
Figure II.33 : Cure des éprouvettes à l'eau pendant 7, 14, et 28 jours	43
Figure II.34 : Essais (ρ) du sable mortier à l'état frais	44
Figure II.35 : L'essai d'absorption par capillarité	47
Figure II.36 : Principe de l'essai d'absorption par capillaire	47
Figure II.37 : Balance hydrostatique	49
Figure II.38 : Etuve ventilée	49
Figure II.39 : L'essai de traction par flexion trois points	50
Figure II.40 : L'essai de résistance à la compression	51
Figure II.41 : Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme	51
Figure II.42 : Appareil à ultrasons (Proceq Pundit Lab)	52

Figure II.43 : Appareil à ultrasons (controls)	53
--	----

Chapitre III : Interprétation et exploitation des résultats

Figure III.1 : L'évolution de l'absorption par immersion totale de mortiers non traité	56
Figure III.2 : L'évolution de l'absorption par immersion totale de mortiers traité	56
Figure III.3 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 07 jours	57
Figure III.4 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 14 jours	58
Figure III.5 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 28 jours	58
Figure III.6 : L'évolution de la porosité de mortiers non traité en fonction du temps	59
Figure III.7 : L'évolution de la porosité de mortiers traité en fonction du temps	59
Figure III.8 : Evolution de la masse volumique des mortiers à 7 jours	60
Figure III.9 : Evolution de la masse volumique des mortiers à 14 jours	60
Figure III.10 : Evolution de la masse volumique des mortiers à 28 jours	61
Figure III.11 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps	61
Figure III.12 : Evolution de la résistance à la traction en fonction du temps	62
Figure III.13 : La vitesse d'ultrason.....	62
Figure III.14 : L'évolution de retrait de mortiers non traité en fonction du temps	63
Figure III.15 : : L'évolution de retrait de mortiers traité en fonction du temps	64

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Étude Bibliographique

Tableau I.1 : Compositions granulométriques des sables de dune	12
Tableau I.2 : Propriétés physiques des sables du Sud	13
Tableau I.3 : Compositions chimiques des sables du sud	13

Chapitre II : Résultats expérimentaux

Tableau II.1: caractéristiques techniques du ciment	19
Tableau II.2: Les analyse chimique du sable de dune	20
Tableau II.3: Les analyse chimique du sable alluvionnaire	22
Tableau II.4: Les analyse chimique du sable recycle non traiter	23
Tableau II.5: Les analyse chimique du sable recycle traiter	24
Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable de dune.	26
Tableau II.7 : Analyse granulométrique du sable alluvionnaire.	27
Tableau II.8 : Analyse granulométrique du sable recyclé.	27
Tableau II.9 : Analyse granulométrique du sable mélange (60% S. D+40% S. R).	28
Tableau II.10: La masse volumique apparente ($\rho_{apparent}$) du sable.de dune	32
Tableau II.11: ($\rho_{apparent}$) du sable alluvionnaire	33
Tableau II.12: ($\rho_{apparent}$) du sable recyclé	33
Tableau II.13: ($\rho_{apparent}$) du sable mélange	33
Tableau II.14: ($\rho_{absolue}$) du sable dune	34
Tableau II.15: ($\rho_{absolue}$) du sable alluvionnaire	34
Tableau II.16: ($\rho_{absolue}$) du sable recyclé	35
Tableau II.17: ($\rho_{absolue}$) du sable mélange	35
Tableau II.18: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP .	37
Tableau II.19: Résultats d'essais d'équivalent de sable de dune	37
Tableau II.20: Résultats d'essais d'équivalent de sable alluvionnaire.....	38
Tableau II.21: La première composition des mortiers étudiées	39
Tableau II.22: La deuxième composition des mortiers étudiées	39
Tableau II.23: Concentration de ciment et NaHCO_3	41
Tableau II.24: Préparation du mélange	41
Tableau II.25: les masses volumiques du mortier à l'état frais	44

Tableau II.26: Air occlus 45

Tableau II.27: Qualité du béton suivant la vitesse de propagation des impulsions 52

ABREVIATION

Rc : l'activité du ciment en Mpa .

E/C : le rapport massique eau -ciment.

MF : module de finesse

M : Masse (kg).

ρ_{app} : Masse volumique apparente

ρ_{ab} : Masse volumique absolue

ES : équivalent de sable au piston

h : hauteur (m)

ESV : équivalent de sable visuel

SD_{100%} : sable de dune 100%

SA_{100%} : sable alluvionnaire 100%

SR_{100%} : sable recycle100%

SM_{(60+40)%} : sable mélange 60%SD+40% SR

MSD_{100%} : mortier à sable de dune 100%

MSA_{100%} : mortier à sable alluvionnaire 100%

MSR_{100%} : mortier à sable recycle100%

MSM_{(60+40)%} : mortier à sable mélange 60%SD+40% SR

MSM_{(E)%} : mortier à sable mélange à granulat laver à leau

MSM_{(2x4)%} : mortier à sable mélange à granulat traité chimiquement 2% NACH+4% CRS

MSM_{(4x4)%} : mortier à sable mélange à granulat traité chimiquement 4% NACH+4% CRS

MSM_{(6x4)%} : mortier à sable mélange à granulat traité chimiquement 6% NACH+4% CRS

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les déchets en matières bâtiment représentent une part importante des déchets solides. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie importante induisant par suite une pollution visuelle partout. La gestion des déchets bâtiments est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement.

Le sable de dune constitue en Algérie un gigantesque gisement, il couvre presque 60% de son Sahara. Cette quantité peut être adoptée en tant que matériau de construction tel que dans la production de brique et/ou de verre. Le mortier est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Le taux de sable peut aller jusqu'à 65% de la masse totale du mortier.

Plusieurs études ont été effectuées sur les mortiers afin de savoir leurs formulations et de déterminer leurs caractéristiques et leurs comportements rhéologique ces études ont pu prouver que le mortier à base de sable de dune pourrait remplacer avantageusement le mortier ordinaire dans certains secteurs du bâtiment et des travaux publics.

Dans notre étude la formulation des mélanges adoptée se base sur la substitution de sable alluvionnaire par de sable de dune et de sable recyclé dans la proportion de 60 et 40% respectivement, la quantité de ciment fixée à 450kg/m^3 .

Le manuscrit est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une analyse bibliographique des : sables de dune, sable recyclé et mortiers (définitions, types, classifications et propriétés ...etc.).

Il est nécessaire que les matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène possédant par conséquent des propriétés uniformes. Par ailleurs, il faut choisir des essais adéquats pour parvenir à un meilleur contrôle des propriétés rhéologiques et mécaniques des formulations confectionnées. Pour cela, le chapitre II présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser nos mortiers au 7, 14 et 28 jours.

Dans le chapitre III on a présenté les différents résultats expérimentaux obtenus durant la période de la réalisation de ce travail et cela dans le but de contribuer ainsi à la valorisation le sable de dune et le sable recyclé dans la construction. Aussi d'étudier les caractéristiques mécaniques et physique des mortiers à base de ces matériaux afin de pouvoir les utiliser dans certains domaines de construction. En exploitant et comparant ces derniers aux règles normatives et aux résultats de la littérature.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

Le mortier :

I.1. Introduction

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « Mortier ». [1]

I.1.1. Définition :

Le mortier est un matériau de construction obtenu par mélange de liant, de sable et d'eau, éventuellement des adjuvants, réalisé dans des proportions bien définies de manière à obtenir une pâte de plasticité convenable pour la mise en œuvre. [2]



Figure I.1: Exemple d'un gâchait de mortier [3]

I.1.2. Constituants des mortiers :

I.1.2.1. Le Liant :

On utilise généralement des liants hydrauliques qui peuvent être le ciment, cette dernière est une matière pulvérulente à base de silicate et d'aluminate, et de la chaux obtenue par la cuisson.

Généralement, on peut utiliser : Les ciments (normalisés et spéciaux) ; Les liants à maçonner; Les chaux (hydrauliques naturelles et éteintes). [4]

I.1.2.2. Le sable :

Normalement, les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se

feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. [4]

I.1.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton/mortier, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton/mortier lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton/mortier frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle. [4]

I.1.2.4. L'adjuvant :

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons et des mortiers. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants : (Les plastifiants ; les entraîneurs d'air ; les modificateurs de prise ; les hydrofuges.....). [4]

I.1.2.5. Les ajouts :

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre. Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont : (poudres fines pouzzolaniques ; fibres de différentes natures ; colorants ; polymères). [4]

I.1.3. Fabrication des mortiers :

I.1.3.1. Fabrication à la main :

Il faut tout d'abord, avec la pelle, mélanger à sec le sable et liant aussi parfaitement que possible et former ensuite au milieu du mélange une cuvette qui recevra l'eau de gâchage. La masse est humectée progressivement puis malaxée à l'aide d'un robot à mortier. [5]

Cependant il faut savoir :

- Que le mélange à sec doit être fait soigneusement pour que le liant soit parfaitement réparti dans toute la masse.
- Que l'eau doit être versée en plusieurs fois, d'abord pour la commodité et la qualité du mélange, ensuite parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en enlever.

[5]



Figure I.2: Exemple d'une fabrication des mortiers à la main [6]

I.1.3.2. Fabrication mécanique :

La fabrication des mortiers se fait à l'aide des engins appelés bétonnières. Avec certains modèles, le mélange doit être fait à sec, en partie avant l'introduction dans les tambours mélangeur où il est mouillé convenablement. D'autres font elles-mêmes le mélange complet : on introduit soit directement dans le tombeur, soit dans une benne, l'ensemble des éléments constitutifs du mortier. L'opération ne dure que quelques minutes, elle est beaucoup plus rapide et moins pénible qu'à la main. [5]



Figure I. 3 : Exemple d'une fabrication des mortiers mécanique [7].

I.1.4. Les différents types de mortiers :

Les mortiers peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure [8 ; 9].

I.1.4.1. Mortier pour assembler des éléments de construction :

- ✚ **Le mortier de montage** : Pour monter un mur et assembler des blocs de béton entre eux, c'est le mortier de montage qui est utilisé car il est d'une grande résistance et d'une prise rapide. Le sable à utiliser doit être plutôt fin : partir sur du 0/1 ou du 0/4 [10].

I.1.4.2. Mortier pour enduire un mur :

- ✚ **Le mortier de ragréage** : Le mortier de ragréage est un mélange de sable 0/1, de ciment et d'eau. L'ajout d'adjuvants est recommandé, notamment l'hydrofuge pour les façades extérieures. Il vous servira pour tous vos travaux de ragréage en intérieur et en extérieur. Certains artisans rajoutent de la chaux pour rendre le mortier plus souple [10]. Certains mortiers de ragréage contiennent des fibres. Cela limite l'apparition de fissures qui peuvent apparaître en cas d'application au soleil ou par vent fort... [10].



Figure I.4 : Enduits isolants et enduits de façade [11].

I.1.4.3. Mortier pour sceller le carrelage :

- ✚ **Le mortier colle** : Appelé également ciment colle à La Réunion, la colle carrelage permet de sceller des éléments entre eux. Vous l'utilisez principalement pour coller du carrelage. Il existe plusieurs classes de performances pour définir une colle carrelage : ♦ C1 pour la pose de carrelage intérieur (sols et murs)
 - ♦ C2 pour la pose de carrelage intérieur et extérieur (sols et murs)

- ◆ C2 S1 ou S2 pour la pose de carrelage intérieur et extérieur (sols et murs) avec en plus, des propriétés d'adhérence élevées et une capacité à être déformé par une contrainte entre le carreau et la surface d'encollage. [10]

I.1.4.4. Mortier pour la fabrication de béton :

- ✚ **Le mortier bâtard :** Le mortier bâtard sert le plus souvent de béton pour de la petite maçonnerie. Il contient un peu de chaux qui le rend plus élastique et plus facile à mettre en œuvre. Selon les formules, le temps de séchage peut-être un peu plus long qu'un mortier de ciment pur. Attention, sa résistance n'est pas élevée, il n'est pas recommandé pour réaliser des fondations par exemple [11].

I.1.4.5. Mortiers pour l'étanchéité :

- ✚ **Le mortier d'imperméabilisation :** Les mortiers d'imperméabilisation sont utilisés dans le cadre de travaux situés dans des lieux humides comme la salle de bain, les abords de piscine. Ils ont une plus grande résistance à l'humidité. Ils sont aussi utilisés pour tous les travaux de cuvelage, fondation et bassins [11].

I.1.4.6. Mortiers pour résister aux fortes températures :

- ✚ **Les mortiers réfractaires :** sont employés dans le cas où des éléments scellés ou assemblés sont soumis à une température élevée comme dans la fabrication de barbecue. Ces types de mortiers peuvent résister jusqu'à une chaleur de près de 1 000 °C... [11].

I.1.4.7. Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins.

I.1.5. Les caractéristiques de mortier :

Elles sont nombreuses. A savoir :

- Résister à l'écrasement en répartissant régulièrement les pressions ;
- Être compact : pour éviter l'infiltration des eaux dans les ouvrages, et accroître la résistance mécanique ;

- Être imperméable : pour obtenir un maximum d'étanchéité des joints de maçonnerie, et des enduits ; Adhérer aux matériaux : pour mieux transmettre les charges, ou créer un écran durable contre les intempéries ;
- Conserver un volume constant pendant la prise et le durcissement pour éviter les tassements ou les dislocations des ouvrages ;
- Résister aux agents agressifs d'une atmosphère ou d'un sol pollué ;
- Être ouvrable, afin que l'exécutant puisse le mettre en place dans les meilleures conditions ;
- Conserver toutes ses qualités, et notamment la permanence de la résistance. De quoi dépendront tous ces qualités des constituants : de leur nature ; De leur dosage. [10]

I.1.6. Classes des mortiers selon leur domaine d'utilisation :

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, et ce dernier qu'est très vaste et leurs domaines permet de citer les catégories suivantes : Mortier (de pose ; de joints ; pour les crépis ; pour le sol ; pour les stucs ; Pierres artificielles ; Support pour les peintures murales ; d'injection). [4]

I.2-Le sable :

I.2.1. Définition de sable :

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0.063 (limon) et 2mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires de coquillage et de Coraï [12].

I.2.2. Les classes de sables :

On peut classer les sables selon trois paramètres [12] :

- a) **La granularité:** Permet de séparer les sables en trois catégories (fins ; moyens ; grossiers).
- b) **La propreté et la teneur en fines:** Elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.
- c) **La nature minéralogique :** En général, les sables peuvent être classés comme suit : (siliceux ; silico-calcaires ; calcaires).

I.2.3. Les familles de sables :

On distingue Trois familles :

I.2.3.1. Les sables roulés siliceux (0 /2) : dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement [12] (Figure I.5).



Figure I.5 : Sables roulés siliceux [13]

I.2.3.2. Les sables de concassage calcaires : sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant [12]. (Figure I.6).



Figure I.6: Sable de concassage calcaire [14]

I.2.3.3. 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, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités [12] (Figure I.7).



Figure I.7 : Sable de dune [15]

I.2.4. Les sables de dunes :

Les sables de dune sahariens ont fait l'objet depuis longtemps de campagne de reconnaissance et d'identification scientifique. Dès les années 50, des campagnes d'investigation menées dans le saharien algérien ont mis en évidence des provinces minéralogiques homogènes. Dans ces immensités désertiques, les sables sont caractérisés par une composition minéralogique et granulaire quasi similaires. Depuis et ce à ce jour, plusieurs investigations ont été tentées dans le but de l'utilisation de ce matériau surabondant dans le domaine de la construction, notamment en Algérie et en Afrique qui ont fait l'objet de travaux de recherche [12] (Fig I.8).



Figure I.8 : Sable de dune [16].

I.2.4.1. Définition :

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable [12].

D'après Fookes et Higginbotham (1968) cité par [8]. Le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux [12].

Qu'est-ce qu'une dune ?

I.2.4.2. Intérêt de sable de dune :

L'intérêt d'utilisation de tels agrégats se situe à deux niveaux : technique et économique [12].

a) Les aspects économiques :

Les aspects sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement [12].

b) Les aspects techniques :

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance. Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base [12].

I.2.5. Type de dune :

1. les avant-dunes (fore dune en anglais) : qui sont des bourrelets plus ou moins fixés par la végétation (oyats par exemple), parallèles au trait de côte et solidaire de la plage, c'est-à-dire échangeant du sable avec elle, dans un même système sédimentaire [12].

2. les falaises dunaires (dune cliffe en anglais) : est plutôt un profil résultant de l'érosion marine d'une dune ancienne fixée par une pelouse ou un boisement qui ont été à l'origine de la formation d'une couche d'humus ou de sol sableux [12].

3. les dunes perchées (cliffe-top dune en anglais) : apparaissent au sommet d'une falaise vive. Elles sont alimentées en sable par le vent à partir de l'estran, voire à partir du profil de pente, quand il s'agit d'une falaise dunaire [12].

4. les cordons dunaires artificiels : sont construits par l'homme, généralement comme élément de protection contre la mer ou d'une zone cultivée et/ou construite. [12].

Tous ces types de dunes peuvent exister sous trois formes : simple, composée et complexe [12].

I.2.6. Les différents milieux de la dune :

Les dunes sont composées de milieux différents, On distingue différents types de dunes

I.2.6.1. Les dunes mobiles : Peu ou pas fixées par la végétation (oyats, chiendents des sables etc.) ou dunes blanches, les dunes « reliques » définitivement fixées par la végétation comme les dunes Grises (mousses, lichens, argousiers, etc.), [12] (Figure I.9).



Figure I. 9 : Les dunes mobiles [17]

I.2.6.2. Les dunes noires (arbres) : Et les dunes fossiles recouvertes par des dépôts sédimentaires autres que le sable [12] (Figure I.10).



Figure I.10 : Sable de dune noire [18]

I.2.6.3. La dune verte (appelée aussi avant-dune ou dune embryonnaire) : Végétation pionnière des hauts de plage s'installant sur une dune en formation ou à la base d'une dune mobile, dominée par des peuplements clairsemés de psammophytes de type chiensables, Renouée maritime, Pourpier de mer, Soude brûlée, Cakilier maritime, Panicaut maritime, Euphorbe maritime et liseron des dunes [12] (Figure I.11).



Figure I.11 : Sable de dune verte [19]

I.2.6.4. La dune blanche ou jaune : Partie de la dune littorale mobile colonisée par l'Oyat, plante fixatrice adaptée à une assez faible salinité du substrat (2 % maximum) à laquelle s'associent d'autres espèces spasmophiles (Panicaut des dunes, Achillée maritime, giroflée des dunes, chou marin, liseron des dunes, gaillet des sables, Lis maritime) [12] (Figure I.12).



Figure I.12 : Sable de dune blanche [20]

I.2.6.5. La dune grise : Partie de la dune sous le vent correspondant au talus interne de la dune blanche, où pénètrent des plantes herbacées fixatrices succédant aux espèces pionnières, le tout évoluant peu à peu vers une pelouse constituée d'un tapis dense de mousses et lichens qui enrichit le sable de matière organique et d'humus [12] (Figure I.13).



Figure I.13: Sable de dune grise [21]

I.2.6.6. La dune brune (dune boisée ou frange forestière) : La pelouse est progressivement remplacée par des prairies enrichies d'espèces pré-forestières, puis par des buissons et fourrés, arbustes, voire un boisement littoral [12] (Figure I.14).



Figure I.14 : Sable de dune brune [22]

I.2.6.7 La dune littorale : Les dunes littorales ou dunes bordières se forment sur le long des côtes basses où les vents et l'apport de sédiments par la dérive littorale permettent l'accumulation de sable sur les plages [12] (Figure I.15).



Figure I. 15 : La dune littorale [23]

I.2.7. Données bibliographiques sur les sables de dunes Algérien

I.2.7.1 Compositions granulométriques :

Les compositions granulométriques représentées par le pourcentage des tamisât sont reportées dans le tableau I.1.

Tableau I.1: Compositions granulométriques des sables de dune [24]

tamis (mm) \ %	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,125	0,08
EL Golea	100	100	100	99,76	27,13	18,27	9,57	1,46
EL Oued	100	100	100	99,46	91,42	65,59	9,12	0,65
Biskra	100	100	100	99,37	83,84	-	6,89	1,58
HassiBahbah	100	99,98	99,91	99,30	92,71	68,67	4,34	0,57
Ain Safra	100	99,99	99,97	99,95	95,86	54,23	2,72	0,01

Ces sables ont une granulométrie fine, (les plus gros grains n'atteignent pas 1 mm de taille) [24]

I.2.7.2 Composition minéralogique : Des tests effectués sur la composition minéralogique des sables provenant des différentes régions ont permis de constater que :

- Le quartz forme plus de 85% du sable : les grains sont généralement arrondis et parfois anguleux.

- La calcite se manifeste par des grains de couleurs différentes variant autour de 5% ; ils ne dépassent en aucun cas les 10%.
- Le gypse se trouve sous forme de grains fins, de couleur blanchâtre avec des pourcentages ne dépassant pas les 2 à 3%.
- On peut également trouver dans certains gisements du feldspath, son pourcentage ne dépasse pas les 4%. [24]

I.2.7.3 Caractéristiques physiques : On peut regrouper les propriétés moyennes des différents sables étudiés dans le tableau I.2:

Tableau I.2: Propriétés physiques des sables du Sud [24]

Région	Humidité naturelle en %	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
EL Golea	0,34	1590	2500
EL Oued	2,60	1420	-
Biskra	1,40	1510	-
HassiBahbah	2,62	1550	-
Ain Safra	0,50	1485	2660

I.2.7.4 Composition chimique : Les sables de dune sont caractérisés par une teneur relativement importante de silice (SiO₂). Les résultats des analyses chimiques sont regroupés dans le tableau I.3 :

Tableau I.3 : Compositions chimiques des sables du sud [24]

Région	EL Golea	EL Oued	Biskra	HassiBahbah	Ain Safra
SiO ₂	94-88	86,85	67,90	94,50	96,86
Al ₂ O ₃	1,28	1,15	0,65	1,67	0,89
Fe ₂ O ₃	0,54	0,40	0,50	0,25	0,39
CaO	0,97	5,81	15,88	1,43	0,66
MgO	0,63	0,30	0,60	0,10	0,09
SO ₃	0,52	0,24	0,79	0,65	0,29
K ₂ O	0,25	0,37	0,16	0,22	0,32
Na ₂ O	0,14	0,08	0,09	0,23	0,02
TiO ₂	0,12	-	-	-	0,08
Mno	0,04	-	-	-	0,05
Cl	0,04	0,004	-	-	-
P-F	1,00	4,60	13,33	1,43	-

I.3. Le sable de béton recycle

I.3.1. Introduction

Durant la dernière décennie, l'épuisement des ressources naturelles et les règlements environnementaux contraignants ont conduit à devoir chercher à utiliser les Déchets de Construction et de démolition comme granulats alternatifs pour la construction. L'utilisation de granulats de béton recyclé dans le béton est une solution économique intéressante pour valoriser au mieux les Déchets de Construction et de démolition. Néanmoins, les granulats de béton recyclé présentent des caractéristiques différentes de celles des granulats naturels. Par conséquent, les performances des bétons incorporant des granulats de béton recyclé sont aussi différentes de celles des bétons traditionnels.

I.3.2. Valorisation des sables de béton recycle

Les granulats recyclés peuvent fournir un béton de résistance caractéristique à 28 jours nettement supérieure à 20 MPa. Le choix de béton incluant des combinaisons en granulats.

I.3.3. Béton de démolition :

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition : En effet, le granulats recyclés de béton est un matériau composite, dont les deux constituants sont :

- ✓ des granulats naturels concassés partiellement.
- ✓ de la pâte de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels.

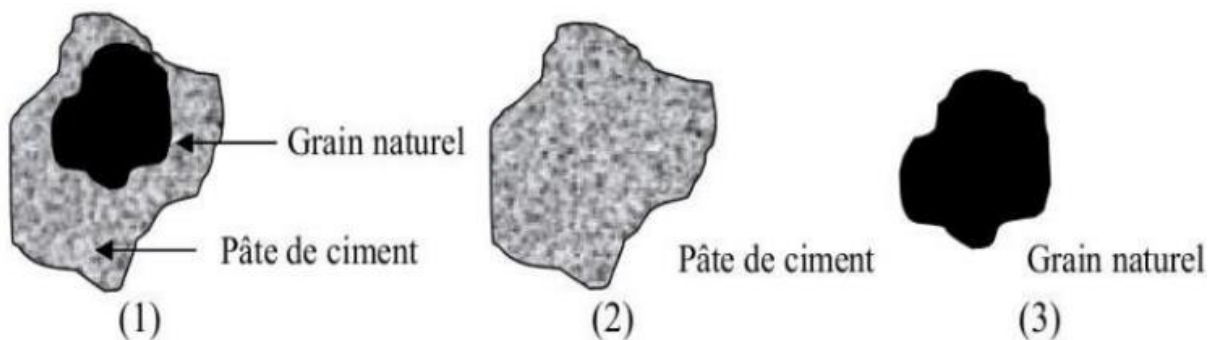


Figure I. 16 : Formes des granulats recyclés [25].

Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différente. En effet, Le taux de pâte de ciment présent dans les granulats recyclés de béton varie en fonction de leur origine c'est-à-dire en fonction de la formulation de base du béton initial appelé béton parent dans la littérature.

I.3.4. Caractéristiques des granulats recyclés de béton :

La principale particularité des granulats issus du recyclage du béton est l'existence d'une gangue de ciment ancien attachée aux granulats naturels primaires.

Elle a une influence importante sur le comportement des bétons à base de granulats recyclés, car elle détermine, en grande partie, les caractéristiques géométriques (forme, état de surface), physiques (porosité et absorption d'eau). Mécaniques (friabilité, résistance aux chocs et à l'usure) et physico-chimiques de ces granulats (ils ne peuvent pas être considérés comme inertes). [25]

Lorsque les granulats recyclés sont issus de produits de démolition, il apparaît une autre particularité : la présence de différents types d'impuretés indésirables : minérales : comme le gypse, le verre, les chlorures, les briques ou bien organiques : comme le papier, le bois, les plastiques, etc.

Cette présence d'impuretés introduit une hétérogénéité importante des granulats recyclés et pose des problèmes liés à l'échantillonnage et à la représentativité des résultats lors de leur caractérisation, mais aussi des problèmes liés à la durabilité des bétons incluant ces granulats.

I.4. Conclusion :

En résumé, nous avons présenté une analyse bibliographie qui a comprenait : premièrement presque tous ce qui concerne les mortiers (types, caractéristique, destination...), puis deuxièmement une vue sur les sables de dunes comme source naturel renouvelable (les différentes dunes, leurs caractéristiques ...), en terminant avec les sables de béton recyclée, leurs avantages et caractéristiques ...). C'est sur cette dernière que nous nous sommes appuyés dans notre étude.

CHAPITRE II : Résultats expérimentaux

CHAPITRE II : Résultats expérimentaux

II.1. Introduction

Dans toute étude sur les bétons ou autres matériaux, la présentation et la caractérisation des différents matériaux et matérielles utilisés est une tâche indispensable pour que le travail soit valable, strict et dans les normes.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'emploi judicieux des matériaux de construction qui exige la pré-connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques et mécaniques, afin d'obtenir le meilleur choix répondant à leur destination. Les informations concernant les matériaux utilisés doivent être récoltées par des techniques fiables tout en préférant les essais normalisés. En plus, il est nécessaire que les matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène possédant par conséquent des propriétés uniformes.

Par ailleurs, il faut choisir des essais adéquats pour parvenir à un meilleur contrôle des propriétés rhéologiques et mécaniques des formulations confectionnées.

Ajoutons en fin que les essais physique et mécanique sont réalisés dans le Laboratoire Pédagogique du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université Hamma Lakhdar – El-oued –, laboratoire Nizoulab à el-oued, et laboratoire ayati salah à hassani abdelkrim.

II.2. Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux suivant :

- Un ciment (CEM I 42.5N-SR5 NA 442) : de la cimenterie ELMALABIAD Tebessa.
- Eau de gâchage : l'eau potable du laboratoire de AYATI Salah commune Hassani Abdelkrim.
- Sable de dune (SD) de la région de Hassani Abdelkrim et de z'goum ouest, de la Wilaya d'El-oued.
- sable alluvionnaire de la région de BAADJ-DJEMAA de la Wilaya d'om-toyour.
- Granulats du Béton de démolition :

Pour les granulats recyclés, on a choisi des déchets du béton de démolition, certaines et dont on dispose des renseignements sur la composition de leurs bétons, la qualité des granulats et leurs caractéristiques. Les granulats recyclés utilisés dans les études sont donc des granulats concassés de classes : sable 0.615/4, (mode du concassage avec compacteur

1T comme illustre dans la [figure II.7](#). La préparation et l'obtention des classes granulaires se fait par concassage, criblage et tamisage.

- la solution chimique NaHCO_3 ; l'eau distillé et ciments CRS (pour Traitement des agrégats) car elle est disponible sur le marché.



Figure II.1 : solution chimique NaHCO_3 avec l'eau distillé

II.3. Caractéristiques des matériaux :

II.3.1. Caractéristiques du ciment utilisé :

Dans le [tableau II.1](#) qui suit, les caractéristiques du ciment utilisé pour tous les mortiers confectionnés dans cette étude qui est le ciment Portland (CEM I 42.5N-SR5 NA 442/2013) comme montre la [figure II.3](#).

Le choix du (CEM I 42.5N-SR5 NA 442/2013) s'explique facilement par le fait qu'il s'agit d'un ciment disponible localement. D'une manière générale, le choix du ciment dépend, en particulier, de la résistance souhaitée du béton, des exigences de mise en œuvre et de l'environnement de la structure.

Ses caractéristiques techniques sont représentées ci-après :

N.B/ Les compositions C_3S et C_2S né pas donnée sur la fiche technique originale du ciment présenté sur la figure II.3, nous le l'avons calculé par **la formule de bogue** comme c'est suite :

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07 (\text{CaO}) - 7.6 (\text{SiO}_2) - 6.72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85 (\text{So}_3)$$

$$= 4.07 (64.36\%) - 7.6 (20.99\%) - 6.72 (4.30\%) - 1.43 (4.18\%) - 2.85 (2.34\%) = \underline{\underline{60.88 \%}}$$

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

Tableau II.1: caractéristiques techniques (voir annexe)

ANALYSE CHIMIQUES		
Eléments	Garanties NA 442	Teneurs (%)
SiO ₂ (NA5042)		20.99
AL ₂ O ₃ (NA5042)		4.3
Fe ₂ O ₃ (NA5042)		4.18
CaO (NA5042)		64.36
MgO (NA5042)	≤ 4 %	1.14
SO ₃ (NA5042)	≤ 2.5 %	2.34
CL	≤ 0.1 %	0.002
P.A.F (NA5042)	≤ 5 %	1.95
RI (NA5042)	≤ 5 %	0.40

ESSAIS PHYSIQUES			
		Garanties NA442	Mesures
PS (g/cm ³) (NA231)			3.00
SSB (g/cm ³) (NA231)			3360
Temps de prise	Début	≥ 1h	02h45mn
	Fin		03h28mn
Expansion	A. chaud	≤10mm	0.30
	A. Froid		
Refus (%)	45 μ		10

COMPOSITIONS MINERALOGIQUES		
Eléments	Gar. NA 442	Teneur (%)
C ₃ S		60.88
C ₂ S		14.58
C ₃ A	≤ 5 %	4.33
C ₄ AF		12.71

ESSAIS MECANIQUES NA234			
	E. en jours	G. NA442	Mesures
Résistance à la flexion en MPA	02 jours		4.4
	07 jours		6.4
	28 jours	≥ 1h	7.8
Résistance à la compression en MPA	02 jours	≥10.0	24.0
	07 jours		39.9
	28 jours	≥42.5	55.6

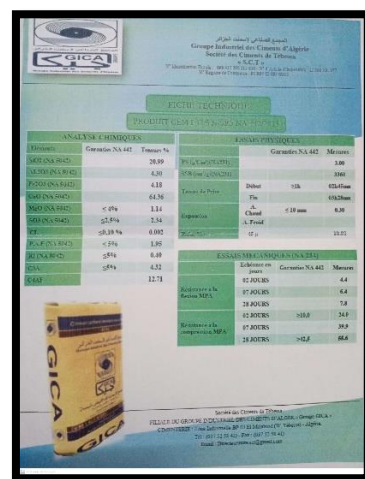


Figure II.2: Sac de ciment utilisé.

Figure II.3: Fiche technique de ciment

II.3.2. L'eau de gâchage :

Eau de gâchage : nous avons utilisé l'eau du robinet disponible dans laboratoire de AYATI Salah commune Hassani Abdelkrim. Cette eau doit être conforme à la norme NA 1966 [6]. Et ne doit pas contenir d'impuretés nocives telles que chlorure, sulfate, matière organique, nitrates, sodium (Na), sels de potassium (K) ... etc. L'utilisation de l'eau potable dans les mortiers est considérée comme une pratique sécuritaire.

II.3.3. Caractéristique du sable :

II.3.3.1 Caractéristique du sable de dune :

On a utilisé un sable mélange de deux sables de dune de région, (z'goum et Hassani Abdelkrim de la Wilaya d'El-oued). (Figure II. 4).



Figure II.4: Photo du sable de dune utilisé.

D'où ces caractéristiques sont les suivantes :

II.3.3.1.1. Analyses chimiques :

Tableau II.2: Les analyse chimique du sable de dune

N° d'élément	Symbol	Non d'élément	concentration atomique	concentration pondérale
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

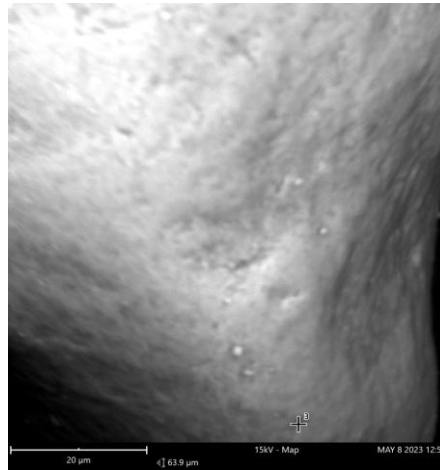


Figure II.5 : Aspect normal du granulat de sable de dune .observation au (MEB :63.9 μm Mode : 15kV)

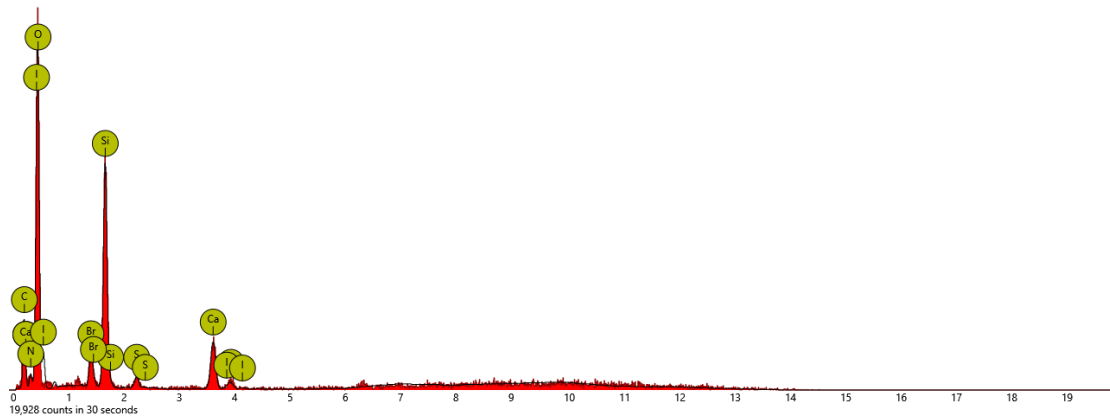


Figure II.6 : Diagramme des composantes du granulat de sable de dune 19.928 points en 30 secondes.

II.3.3.2 Caractéristique du sable alluvionnaire :

On a utilisé le sable alluvionnaire de BEADJ djemaa. (Figure II. 7).



Figure II.7: Photo du sable de BEADJ utilisé.

II.3.3.2.1. Analyses chimiques :

Tableau II.3: Les analyse chimique du sable alluvionnaire

N° d'élément	Symbol	Non d'élément	concentration atomique	concentration pondérale
8	O	Oxygen	65.54	59.72
6	C	Carbon	22.63	15.48
20	Ca	Calcium	5.74	13.11
14	Si	Silicon	4.49	7.19
52	Te	Tellurium	0.36	2.61
13	Al	Aluminum	1.23	1.89

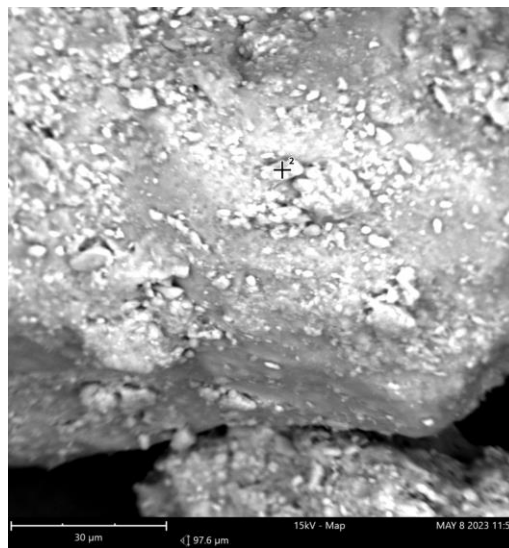


Figure II.8: Aspect normal du granulat de sable alluvionnaire observation au (MEB :97.6 μm Mode : 15kV)

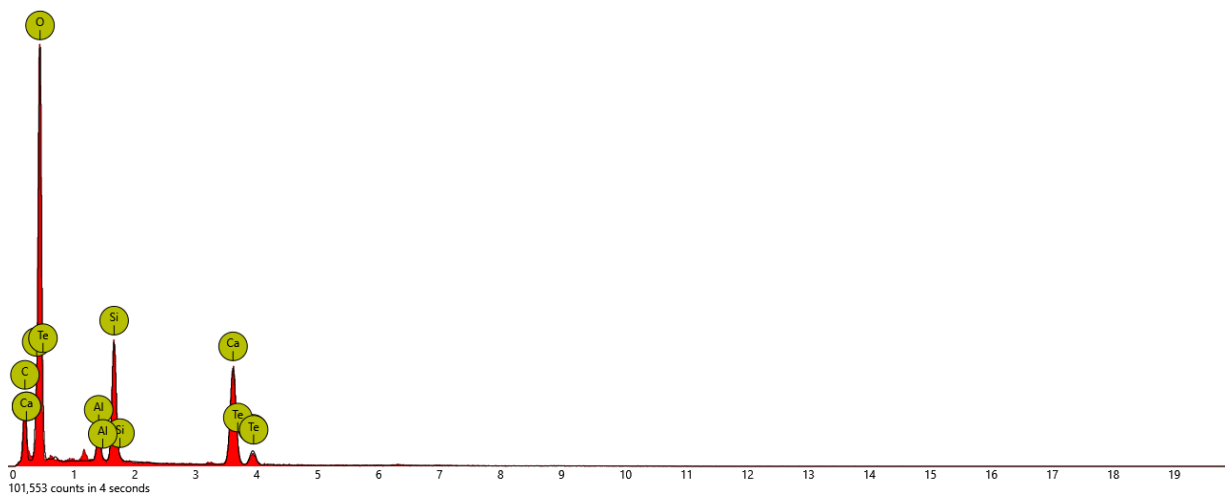


Figure II.9 : Diagramme des composantes du granulat de sable alluvionnaire 101.553 points en 4 secondes

II.3.3.3 Caractéristique du sable de béton recyclé :

Pour les granulats recyclés, on a choisi des déchets du béton de démolition, certaines et dont on dispose des renseignements sur la composition de leurs bétons, la qualité des granulats et leurs caractéristiques. Les granulats recyclés utilisés dans les études sont donc des granulats concassés de classes : sable 0/5, (mode du concassage avec compacteur 1T comme illustre dans la figure II.10. La préparation et l'obtention des classes granulaires se fait par concassage, criblage et tamisage.



Figure II .10 : préparation des granulats de béton de démolition.

II.3.3.3.1. Analyses chimiques :

Tableau II.4: Les analyse chimique du sable recyclé non traité

N° d'élément	Symbol	Non d'élément	concentration atomique	concentration pondérale
8	O	Oxygen	51.77	40.60
20	Ca	Calcium	15.81	31.06
6	C	Carbon	28.25	16.63
52	Te	Tellurium	1.23	7.70
14	Si	Silicon	2.43	3.35
13	Al	Aluminum	0.50	0.66

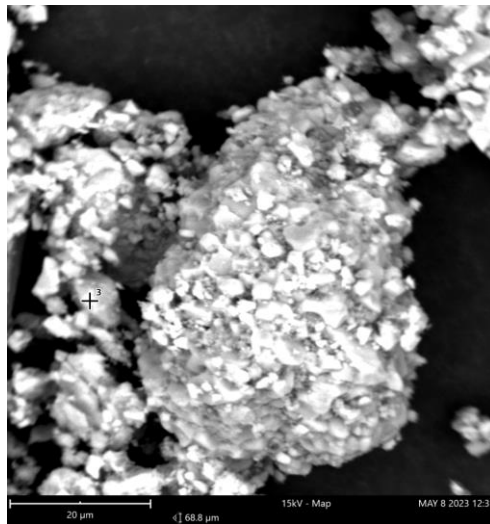


Figure II.11: Aspect normal du granulat de sable resyclé observation au (MEB :68.8 μm Mode : 15kV)

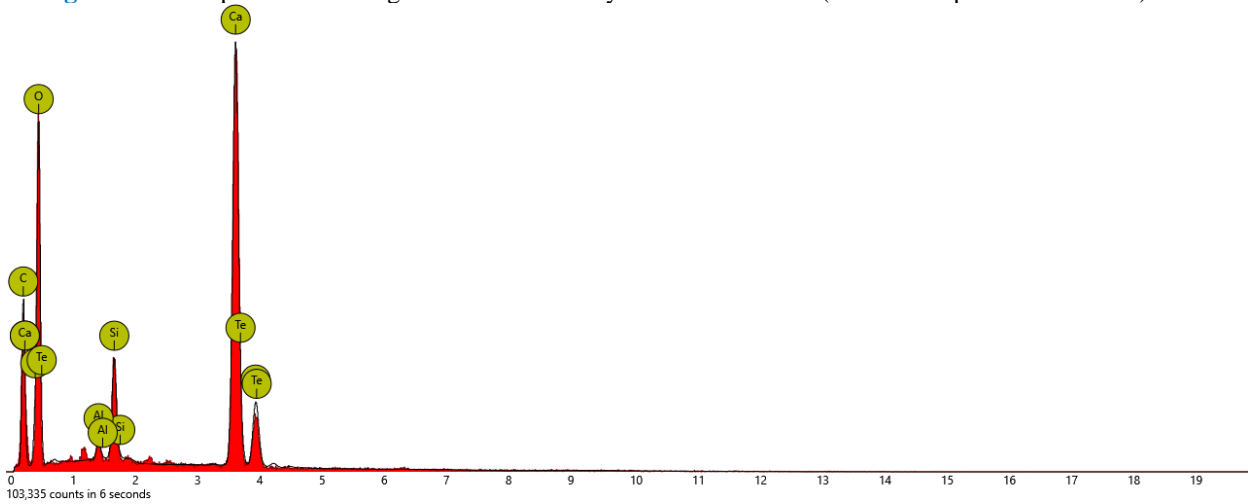


Figure II.12: Diagramme des composantes du granulat de sable resyclé non traiter 103.335 points en 6 secondes

Tableau II.5: Les analyse chimique du sable recyclé traiter

N° d'élément	Symbol	Non d'élément	concentration atomique	concentration pondérale
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	Aluminum	0.58	0.77
16	S	Sulfur	0.42	0.66

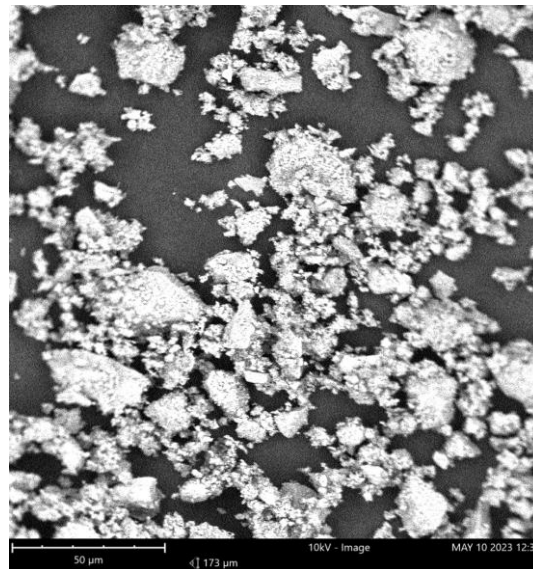


Figure II.13: Aspect normal du granulat de sable rescyclé traité observation au (MEB :70.7 μm Mode : 15kV)

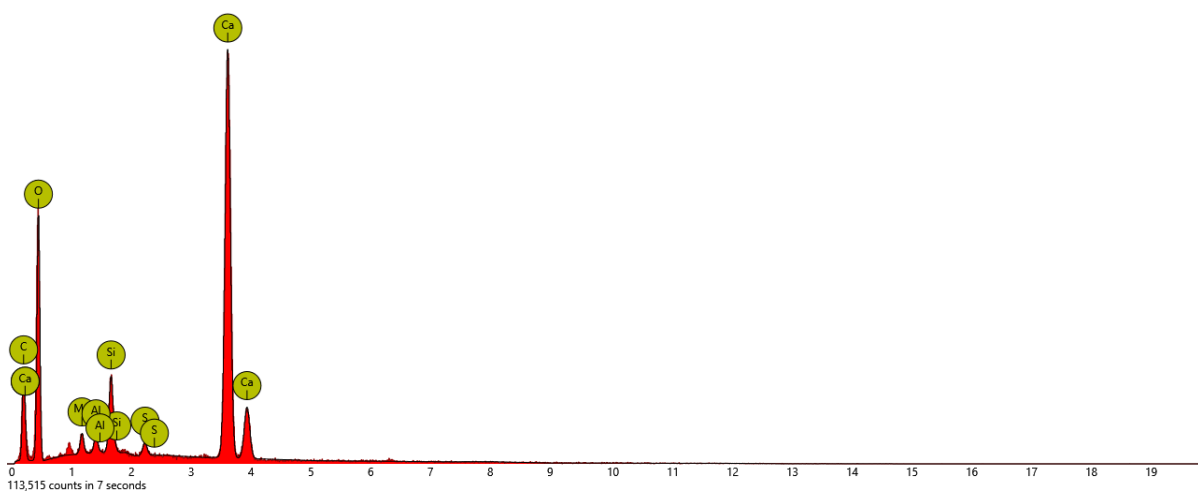


Figure II.14 : Diagramme du composante de granulat de sable recycle traité 103.335 points en 6 secondes

II.3.3.4. Analyses granulométriques : NA 2607 [1]

- **But de l'essai :**

L'analyse granulométrique permet de détecter et miner la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des filets.

- **Principe de l'essai analyse granulométrique :**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

- **Mode opératoire :**

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

Appareillage spécial pour l'analyse granulométrique (Figure II.15) :

- Les tamis.
- Série de tamis en mm (5 - 4 – 2.5 – 1.25 - 0.630 - 0.315 - 0.160 - 0.08).
- Balance.
- Brosse pour nettoyage des tamis.
- Etuve.



Figure II.15: Photo du tamis utilisée.

Les **tableaux II.6; II.7; II.8; II.9;** ci-dessous regroupe les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différents sables utilisés.

Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable de dune.

Poids de l'échantillon sec		1000 g		
Ouverture tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage refus cumulé (%)	Pourcentage passant (%)
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.630	0	0	0	100
0.315	718	718	71.80	28.2
0.160	180	898	89.80	10.2
0.08	93	991	99.10	0.90
Fond				

Tableau II.7 : Analyse granulométrique du sable alluvionnaire.

Poids de l'échantillon sec		1000 g		
Ouverture tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage refus cumulé (%)	Pourcentage passant (%)
5	0	0	0	100
2.5	12	12	1.2	98.8
1.25	35	47	4.7	95.3
0.630	122	169	16.9	83.1
0.315	497	666	66.6	33.4
0.160	237	903	90.3	9.7
0.08	64	967	96.7	3.3
Fond				

Tableau II.8 : Analyse granulométrique du sable recyclé.

Poids de l'échantillon sec		1000 g		
Ouverture tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage refus cumulé (%)	Pourcentage passant (%)
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2.5	238	238	23.80	76.20
1.25	320	558	55.80	44.20
0.630	426	984	98.40	1.60
0.315	0	984	98.40	1.60
0.160	0	984	98.40	1.60
0.08	0	984	98.40	1.60
Fond				

Tableau II.9 : Analyse granulométrique du sable mélange (60% S. D+40% S. R).

Poids de l'échantillon sec		2000 g		
Ouverture tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Pourcentage refus cumulé (%)	Pourcentage passant (%)
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2.5	190	190	9.50	90.50
1.25	256	446	22.30	77.70
0.630	341	787	39.35	60.65
0.315	861	1648	82.40	17.60
0.160	216	1864	93.20	6.80
0.08	111	1975	98.75	1.25
Fond				

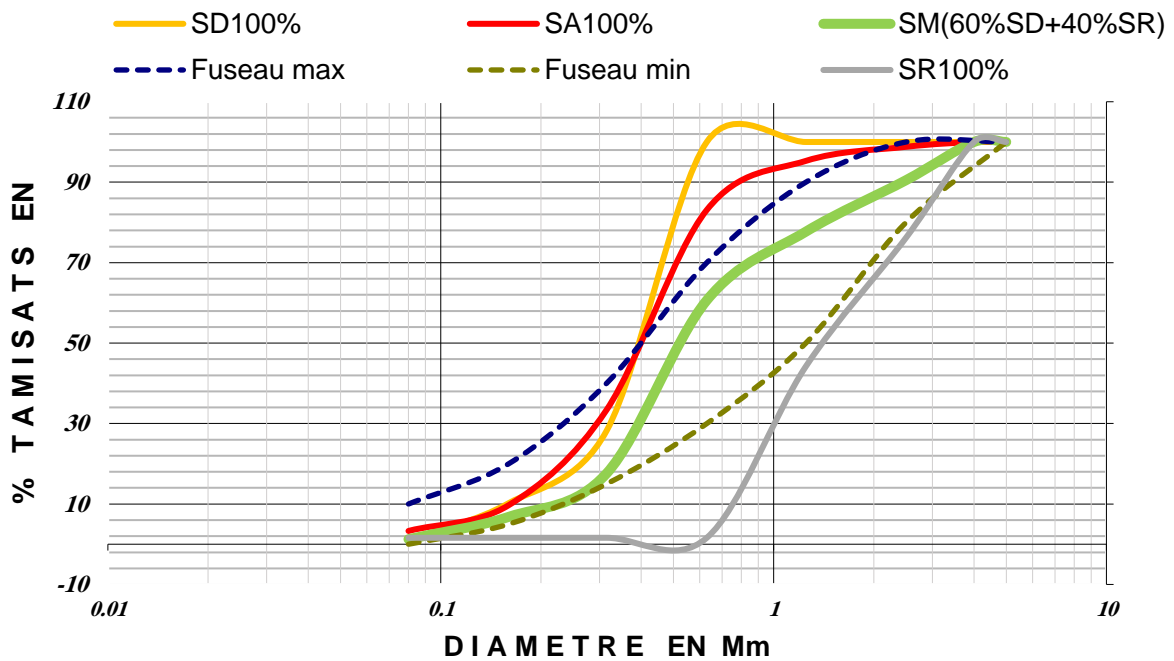


Figure II.16: Courbe granulométrique des sables utilisés.

II.3.3.4.1 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 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).

Suivant la Norme Algérienne NA 5113 [2] Equivalente à la Norme Européenne EN12620 on a :

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus (en \%)} \text{ sur les tamis } 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 \text{ et } 5}{100}$$

- **1.8 et 2.2** : le sable est à majorité de grains fins ;
- **2.2 et 2.8** : on est en présence d’un sable préférentiel ;
- **2.8 et 3.3** : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

$$Mf_{SD100\%} = \frac{1}{100} (89.8 + 71.8 + 0 + 0 + 0 + 0) = 1.62 \quad \boxed{Mf = 1.62}$$

$$Mf_{SA100\%} = \frac{1}{100} (0 + 1.2 + 4.7 + 16.9 + 66.6 + 90.3) = 1.80 \quad \boxed{Mf = 1.80}$$

$$Mf_{SR100\%} = \frac{1}{100} (0 + 23.8 + 55.8 + 98.4 + 98.4 + 98.4) = 3.75 \quad \boxed{Mf = 3.75}$$

$$Mf_{SM(60\%SD+40\%SM)} = \frac{1}{100} (0 + 9.5 + 22.3 + 39.35 + 82.4 + 93.2) = 2.47 \quad \boxed{Mf = 2.47}$$

D’après les résultats donnés aux [tableaux II.6; II.7; II.8; II.9](#) et les courbes granulométrique ([Figure II.16](#)) nous pouvons constater que :

- SD_{100 %} ; SA_{100 %} ; SR_{100 %} : l’allure est serrée et mal graduée.
- SM_(60%SD+40%SM) : l’allure est étalée et bien graduée et présence d’un sable préférentiel.

II.3.3.4.2. Modification du module du finesse : selon la norme NF EN 933-1

- Si **Mf1** et module de finesse de sable 1
- Si **Mf2** et module de finesse de sable 2

On peut obtenir un sable 3 d’un module de finesse (prédéfini) = Mf3 qui est la combinaison d’un mélange proportionné des deux granulats 1 et 2.

Avec **Mf1 > Mf3 > Mf2**

$$Sable(2) = \frac{Mf_3 - Mf_1}{Mf_2 - Mf_1}$$

$$Sable(1) = \frac{Mf_2 - Mf_3}{Mf_2 - Mf_1}$$

$$Mf1=3.75 > Mf3= 2.47 > Mf2=1.62$$

$$\text{Sable (2)} = (2.47-3.75) / (1.62-3.75) = 60\%$$

$$\text{Sable2 (sable de dune)} = 60\%$$

$$\text{Sable (1)} = (1.62-2.47) / (1.62-3.75) = 40\%$$

$$\text{Sable1 (sable recyclé)} = 40\%$$

Donc les pourcentages du deux sable (60% de SD et 40% SR) c'est vérifier.

II.3.3.4.3. Calcul des coefficients d'uniformité (Cu) et des coefficients de classement (Cc)

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte trois informations : les dimensions (**d**) et (**D**) du granulat, la plus ou moins grande proportion d'éléments fins et la continuité ou la discontinuité de la granularité.

En se référant à la classification suivante, un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D. Le premier désigne le diamètre minimum des grains (d) et le deuxième désigne le diamètre maximum (D). Ainsi, lorsque d est inférieur à 0,5 mm, le granulat est désigné 0/D. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

Ainsi, les courbes granulométriques obtenues et leurs pentes moyennes permettent de caractériser le degré d'uniformité de la taille des éléments minéraux du sol. D'où la définition de deux caractéristiques. Il s'agit du rapport de Hazen ou coefficient d'uniformité de Hazen (Cu) et le coefficient de classement (Cc).

Le (Cu) est le rapport entre deux diamètres apparents, définis de telle sorte que la taille de 60%,et respectivement 10 % des particules soit inférieure [13].

Le coefficient d'uniformité de Hazen est un indice d'irrégularité de la distribution de la taille des particules. Il est obtenu selon la Norme Française (NFP 18-540) par la formule suivante :

$$Cu = \frac{D60}{D10}$$

D60 et D10 étant les valeurs lues en abscisse pour les points de la courbe granulométrique correspondant aux ordonnées de 60 % et 10 %. Par conséquent, la référence suivante permet de déterminer l'uniformité de la courbe.

Si $Cu < 2$, alors la granulométrie est uniforme ou encore serrée.

Si $Cu > 2$, alors la granulométrie est variée ou encore étalée.

Le coefficient de classement ou de courbure (Cc) quant à lui, permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre D10 et D60. Le coefficient de classement fait appel à la notion de diamètre effectif correspondant au pourcentage (%) de passants placés en indice déterminé

à l'aide de la courbe granulométrique. D60 est le diamètre effectif des particules qui correspond à 60 % de passants, D10 est le diamètre effectif des particules qui correspond à 10 % de passants et D30 le diamètre effectif des particules qui correspond à 30 % du passant. Ainsi, si le sol est bien gradué, on a la présence d'une grande variété de diamètres. Lorsque $1 < C_c < 3$, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Un C_c trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D10 et D60, la granulométrie est alors mal graduée.

$1 < C_c < 3$, la courbe bien graduée (continuité bien répartie).

$C_c < 1$, $C_c > 3$ la courbe mal graduée (continuité mal répartie).

La détermination du coefficient de classement est donnée par la formule suivante :

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

Ce coefficient constitue un indice de la variation relative de la pente de la courbe. Les plages du littoral de la Casamance étant essentiellement sableuses, sa référence est: $1 < C_c < 3$ et $C_u > 6$, témoin d'un sol bien gradué expliquant la présence d'une grande variété de diamètres [08]

II.3.3.4.4. Analyse des courbes granulométriques.

De la courbe su dessus du sable mélange et selon la fonction "trend" du logiciel "Excel", nous pouvons obtenir la valeur de D10, D30, D60, indiquée ci-dessous :

$$D_{10} = 0.21 \quad , \quad D_{30} = 0.41 \quad , \quad D_{60} = 0.63$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 0.63/0.21 = 3.00 \quad C_u \geq 2 \text{ la granulométrie est étalée.}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} = (0.41)^2 / (0.63 \times 0.21) = 1.27$$

$1 < C_c = 1.27 < 3$ la courbe granulométrique bien graduée.

II.3.3.5. La masse volumique du sable :

II .3.3.5.1. Masse volumique apparent : Selon la Norme [NFP 18-554].

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube de matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{apparent} = (M2 - M1) / V_R$$

M1 : Masse du récipient vide.

M2 : Masse du récipient plus le sable.

V_R : Volume du récipient ($V_R = 873.88 \text{ cm}^3$) [dans notre cas on a calculé le volume].

Interprétations des résultats :

Les **tableaux II.10; II.11; II.12; II.13**; ci-après présentent les résultats obtenus des essais de la masse volumique apparente de 3 essais :

Tableau II.10: La masse volumique apparente ($\rho_{apparent}$) du **sable.de dune**

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M1 (g)	3431	3431	3431
M2 (g)	4834	4842	4847
$\rho_{app} = \frac{M2 - M1}{V_R}$ [g]/[cm ³]	1.605	1.614	1.620
$\rho_{app}(\text{moy})$ [g]/[cm ³]	1.613		



Figure II.17: Essais de la masse volumique apparente du sable de dune utilisé.

Tableau II.11: ($\rho_{apparent}$) du sable alluvionnaire.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M1 (g)	3431	3431	3431
M2 (g)	4885	4889	4881
$\rho_{app} = \frac{M2 - M1}{VR}$ [g]/[cm ³]	1.663	1.668	1.659
$\rho_{app}(\text{moy})$ [g]/[cm ³]	1.663		



Figure II.18: Essais ($\rho_{apparent}$) du sable alluvionnaire.

Tableau II.12: ($\rho_{apparent}$) du sable recyclé.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M1 (g)	3431	3431	3431
M2 (g)	4604	4611	4597
$\rho_{app} = \frac{M2 - M1}{VR}$ [g]/[cm ³]	1.342	1.350	1.334
$\rho_{app}(\text{moy})$ [g]/[cm ³]	1.342		



Figure II.19: Essais ($\rho_{apparent}$) du sable recyclé.

Tableau II.13: ($\rho_{apparent}$) du sable mélange.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M1 (g)	3431	3431	3431
M2 (g)	4903	4913	4908
$\rho_{app} = \frac{M2 - M1}{VR}$ [g]/[cm ³]	1.684	1.695	1.690
$\rho_{app}(\text{moy})$ [g]/[cm ³]	1.689		



Figure II.20: Essais ($\rho_{apparent}$) du sable mélange.

II.3.3.5.2. Masse volumique absolue : selon la Norme [NFP 18-301]

La masse volumique absolue [ρ_{Ab}] est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains comme montre la figure II.21.

La formule qui nous permet la détermination de la masse volumique absolue est :

$$\rho_{Ab} = M / (V2 - V1)$$

ρ_{Ab} : Masse volumique absolue ;

M : Masse des grains solides ;

$V1$: Volume de l'eau ;

$V2$: Volume total (grain solide + eau).

Interprétations des résultats :

Les résultats obtenus de la masse volumique absolue sont regroupés dans les tableaux II.14; II.15; II.16; II.17; ci-dessous :

Tableau II.14: ($\rho_{absolue}$) du sable dune.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M (g)	50	50	50
$V1$ (cm ³)	100	120	140
$V2$ (cm ³)	118.5	139.5	120
$\rho_{Ab} = M / (V2 - V1)$ (g/cm ³)	2.70	2.56	2.50
$\rho_{Ab(moy)}$ (g/cm ³)	2.58		



Figure II.21: Essais ($\rho_{absolue}$) du sable de dune.

Tableau II.15: ($\rho_{absolue}$) du sable alluvionnaire.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M (g)	50	50	50
$V1$ (cm ³)	100	120	140
$V2$ (cm ³)	119	140	160.5
$\rho_{Ab} = M / (V2 - V1)$ (g/cm ³)	2.63	2.500	2.44
$\rho_{Ab(moy)}$ (g/cm ³)	2.52		



Figure II.22: Essais (ρ_{absolue}) du sable alluvionnaire.



Figure II.23: Essais (ρ_{absolue}) du sable recyclé.

Tableau II.16: (ρ_{absolue}) du sable recyclé.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M (g)	50	50	50
V1 (cm ³)	100	120	140
V2 (cm ³)	121	139.5	160
$\rho_{Ab} = M / (V2 - V1)$ (g/cm ³)	2.38	2.56	2.50
$\rho_{Ab}(\text{moy})$ (g/cm ³)	2.48		



Figure II.24: Essais (ρ_{absolue}) du sable mélange.

Tableau II.17: (ρ_{absolue}) du sable mélange.

Désignation	Essai 1	Essai 2	Essai 3
M (g)	50	50	50
V1 (cm ³)	100	120	140
V2 (cm ³)	119.5	139	158.5
$\rho_{Ab} = M / (V2 - V1)$ (g/cm ³)	2.56	2.63	2.70
$\rho_{Ab}(\text{moy})$ (g/cm ³)	2.63		

II.3.3.5.3. Equivalent de sable : NA 455 [4].

• But de l'essai

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol ou de granulat passant, au tamis à mailles carrés de 5 mm, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable.

• Mode opératoire

- Remplir l'éprouvette d'une solution lavent jusqu'au premier repère (10 cm).

- À l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de (120 ± 1) g dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin de libérer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisse reposer pendant 10 min.
- Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20cm de secousses horizontales en 30s à la main ou à l'aide de l'agitateur mécanique.
- Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec la solution lavant au-dessus de l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- Après 20 min de dépôt,
- Mesurer la hauteur de sable propre seulement ($h'2$) et la hauteur du sable propre y compris le flocculat (éléments fins) ($h1$).
- Mesurer la hauteur du sable plus précisément avec le piston taré ($h2$). L'équivalent de sable visuel (Esv) est défini par :

$$Esv = (h'2 / h1) 100\%$$

L'équivalent de sable par piston (Esp) est défini par :

$$Esp = (h2 / h1) 100\%$$



Figure II.25: Essai de l'équivalent du sable.

Interprétations des résultants :**Tableau II.18:** Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable ESV et ESP.

ESV (%)	ESP (%)	Qualité de sable
$E_{SV} < 65$	$E_{SP} < 60$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités
$65 \leq E_{SV} < 75$	$60 \leq E_{SP} < 70$	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 \leq E_{SV} < 85$	$65 \leq E_{SP} \leq 80$	Sable propre : à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$E_{SV} \geq 85$	$E_{SP} > 80$	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Les résultats sont regroupés dans le tableau II.5 ci-dessous :

Tableau II.19: Résultats d'essais d'équivalent de sable de dune.

	h2 (cm)	h1 (cm)	M (g)	ESP (%)	ESP Moyenne (%)
Essai 1	8.6	9.2	120	93.47	90.45
Essai 2	9.0	9.7	120	92.78	
Essai 3	8.0	9.4	120	85.10	

Suivant la Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SP} donner dans le **tableau II.18** ci-dessus.

Ont conclu que le sable testé est un sable propre : à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

Donc d'après notre résultat nous concluons que notre sable est propre et ne contient que très peu de fines, il est préférable de ne l'employer qu'avec des dosages en ciment élevés ($C \geq 450 \text{ kg/m}^3$).

Tableau II.20: Résultats d'essais d'équivalent de sable **alluvionnaire**.

	h2 (cm)	h1 (cm)	M (g)	E _{SP} (%)	E _{SP} Moyenne (%)
Essai 1	7.8	11.9	120	65.54	66.58
Essai 2	7.6	11.2	120	67.85	
Essai 3	7.7	11.6	120	66.37	

Suivant la Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{SP} donner dans le **tableau II.18** ci-dessus.

Ont conclu que le sable testé est un sable de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait

II.4. Formulation des compositions :

Formuler un mortier ou un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés physiques (ouvrabilité, ...) et mécaniques (résistance à la compression...) répondant à des critères techniques et économiques autorisent une meilleure application dans le domaine de la construction. Dans cette partie, nous avons adapter la méthode de formulation d'un mortier Normalisé. Cette méthode se base sur une portion de ciment (450 g), trois portions de sable (1350 g), avec un rapport E/C = 0.6 pour tous les différents mortiers avec ou sans traitement, car ce rapport a obtenu des bons résultats dans autres études précédent.

Dans notre étude, dans la première étape, trois mortiers était constitué de sable de dune (SD) 100 %, sable alluvionnaire (SA) 100 %, sable recyclé (SR) 100 %. Le quatrième composite élaboré est un mortier dans lequel le sable alluvionnaire a été substitué par un mélange (SM) de 60 % de (SD) et de 40 % de (SR). Tous les composés à ce étape étaient sans traitement du granulats, et avec une concentration en ciment (CRS) de 350 kg/m³.

Quant à la deuxième étape, elle se décompose en deux parties, alors que la première partie s'est limitée à l'étude du mélange composite de sable constitué 60 % de (SD) et 40 % de (SR) sous l'effet du lavage des granulats à l'eau seule. Tandis que la seconde partie reposait sur le traitement chimique des granulats avec des proportions variables de NaHCO₃ (2%, 4%, et 6 %) et à une concentration constante en ciment (CRS) de 4 % à chaque fois, comme indiqué sur les (**Tableaux II.21 et II.22**)

Tableau II.21: La première composition des mortiers étudiés

		Mortiers sans traitement du granulats			
N°	Les compositions	M _{SD100%} [g]	M _{SA100%} [g]	M _{SR100%} [g]	M _{SM(60% SD+40% SR)} [g]
01	Ciment	450	450	450	450
02	Sable de dune	1350	0	0	810
03	Sable alluvionnaire	0	1350	0	0
04	Sable recyclé	0	0	1350	540
05	E/C = 0.6 (Eau)	270	270	270	270

Tableau II.22: La deuxième composition des mortiers étudiés

		Mortiers à granulats laver par l'eau	Mortiers à granulats avec traitement chimique		
			2% NaHCO ₃ + 4% CRS	4% NaHCO ₃ + 4% CRS	6% NaHCO ₃ + 4% CRS
N°	Les compositions	M _{SM(60% SD+40% SR)} [g]			
01	Ciment	450	450	450	450
02	Sable de dune	810	810	810	810
04	Sable recyclé	540	540	540	540
05	E/C = 0.6 (Eau)	270	270	270	270

Dans ce travail nous avons confectionnés 144 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm³ dans des moules de dimensions respectives.

II.4.1. Traitement du granulat :

Le traitement du sable consiste à le faire débarrasser de ces éléments nuisibles à sa qualité c'est-à-dire le faire débarrasser des impuretés des éléments poussiéreux, argileux, vaseux, des sels, des sulfates, mica, ...etc.

Afin d'obtenir un sable de qualité fiable et de composition granulométrique acceptable, et parmi les méthodes de traitement nous citons : méthode de lavage et méthode de traitement chimique.

II.4.1.1. Méthode de lavage :

Cette méthode consiste à éliminer une partie des grains fins c'est-à-dire éliminer l'excès de filler et diminuer le taux d'impureté existant dans le sable. Cette méthode présente des avantages et des inconvénients. Parmi les avantages on cite : Méthode simple et propre, élimine en même temps les grains fins et les impuretés de toutes natures. Parmi les inconvénients on cite : demande beaucoup d'énergie pour le séchage après lavage et un coût élevé. Cette méthode n'a pas beaucoup d'effet, car la boue attachée est toujours là avec l'ancienne.



Figure II.26: lavage du granulat par l'eau

II.4.1.2. Méthode de traitement chimique :

Le but de traitement chimique consistent notamment à éliminer le mortier adhérent des surfaces du granulat recyclée et améliorer leurs propriétés.

Mode opératoire

- versée une quantité d'eau distille dans un récipient équivalent à la quantité du granulat traiter.
- dégivrer une quantité du ciment CRS et du NaHCO_3 avec son concentration nécessaire, (2x4)% ; (4x4)% ; (6x4)% respectivement.
- immersion les granulats recyclés dans la solution.
- Laisse reposer pendant 48 h.
- Séchage les granulats dans l'étuve.



Eau distillé



NaHCO_3



Ciment CRS



Sable recycle

Immersion du granulat

après traitement

Figure II.27: Préparation du traitement chimique du granulat à chaque variante.

Tableau II.23: Concentration de ciment et NaHCO₃. [01]

Désignation	Concentration (% en masse)		Composants (g)			
	Ciment	NaHCO ₃	Ciment	NaHCO ₃	Eau	G. recyclé
Variante 01	4 %	2 %	40	20	1000	1000
Variante 02	4 %	4 %	40	40	1000	1000
Variante 03	4 %	6%	40	60	1000	1000

Tableau II.24: Préparation du mélange.

Désignation	Ciment (g)	NaHCO ₃ (g)	Eau (g)	G. recyclé (g)
Variante 01	54	27	1350	1350
Variante 02	54	54	1350	1350
Variante 03	54	81	1350	1350

II.4.2 Confection des éprouvettes (malaxage et mise en place) :

Dans ce travail nous avons confectionnés 144 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm³ dans des moules de dimensions respectives.

II.4.2.1 Préparation de la pâte :

Nettoyage et séchage parfait des instruments (malaxeur, cuve...).

- Introduire la quantité d'eau choisie : $E / C=0.6$.
- Introduire 450 g de ciment.
- Introduire 1350g de sable de dune ou alluvionnaire ou sable recycle ou du mélange.
- Mettre le malaxeur en route, vitesse lente pendant 60 s, introduire régulièrement le sable entre la 30ème et la 60ème Seconde.
- Stopper le malaxeur, mettre la vitesse rapide et relancer le malaxeur pendant 30 s.
- Stopper le malaxeur pendant 1 min 30 s et nettoyer les parois du récipient pendant les 15 premières secondes.
- Remettre le malaxeur en route, vitesse rapide durant 60 s.

Dans notre cas en utilisant le malaxage manuel, car le malaxeur non disponible.



Figure II.28: Les étapes pour préparer la pâte de mortier avec différent pourcentage des compositions

II.4.2.2 Confection des éprouvettes :

À effectuer immédiatement après préparation du mortier.

- Les moules sont bien nettoyés, et bien montés.
- Enduire les parois latérales des moules d'une légère couche d'huile de décoffrage avant chaque confection des éprouvettes (Figure II.29).
- Introduire la première des deux couches de mortier dans chaque compartiment.
- Etaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement.
- Serrer la première couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine).
- Introduire la seconde couche de mortier.

- Etaler la couche en utilisant la petite spatule tenue verticalement.
- Serrer la deuxième couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine) (Figure II.29)
- Ôter la hausse et enlever l'excédent de mortier avec la règle plate à araser.
- Etiqueter les moules pour identifier les éprouvettes (noms, date, caractéristiques).



Figure II.29 : Lubrification des moules (4 x 4 x 16) cm.



Figure II.30 : vibration manuel des moules.



Figure II.31 : Dernière vibration et rasage

II.4.3. Conservation des éprouvettes :

- Poser une plaque en verre ou en acier sur le périmètre du moule.
- Placer le moule dans une pièce humide pendant 24 heures.
- Démouler ensuite les éprouvettes avec précautions et marquer les éprouvettes (Figure II.32).
- Conserver les éprouvettes dans l'eau à 20°C (Figure II.26).



Figure II.32 : Prélèvement et étiquetage des éprouvettes.



Figure II.33 : Cure des éprouvettes à l'eau pendant 7, 14, et 28 jours.

II.5. Essais de caractérisation des mortiers :

II.5.1. Essais sur mortier frais :

II.5.1.1. L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est une caractéristique fondamentale du béton frais. Elle est évaluée

traditionnellement à l'aide de laisse de cône de d'Abrams. L'augmentation de la demande en teneur en eau des bétons a base de sable concassage est l'un de problème qui se posent pour l'obtention d'une ouvrabilité suffisante. La diminution de l'ouvrabilité peut être due à la présence élevée des fines, a la forme et a la texture du sable de concassage.

Dans notre étude, la quantité d'eau retenue : E/C = 0,6 d'après des études antérieures, qui ont donné de bons résultats.

II.5.1.2. Masse volumique des mortiers à l'état frais :

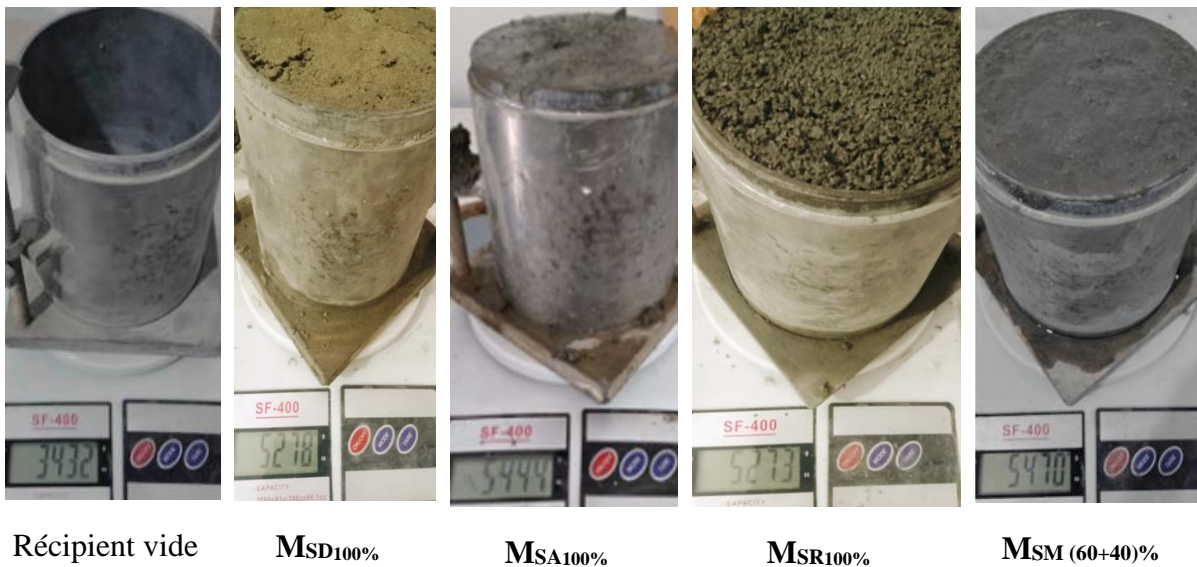


Figure II.34: masses des mortiers à l'état frais.

Tableau II.25: les masses volumiques du mortier à l'état frais.

		S. D 100% [g]	S. A 100% [g]	S. R 100% [g]	S.M (S.D 60+S.R40) % [g]
(ρ) à l'état frais (kg/m³)	M_{récipient vide}	3432	3432	3432	3432
	V_{récipient} [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
	M_{moy•tot}	5278	5444	5270	5481
	M_{moy•net}	1846	2012	1838	2049
	(ρ) [g/cm³]	2.112	2.302	2.103	2.345

II.5.1.3. Air occlus :

Le test de l'air occlus permet la détermination du volume d'air existante dans le mortier (échantillon).

Le béton rempli de poches d'air est généralement situé dans des zones du béton où des dommages dus au gel peuvent se produire. La teneur en air du béton frais de densité normale est généralement mesurée à l'aide de la méthode de pression. Un autre test utile est la méthode volumétrique de mesure de la teneur en air dans le béton, que nous avons adoptée dans ce calcul. Cependant, la méthode de compression est souvent préférée car elle est relativement rapide.

Pour la méthode de calculs, l'air occlus dans le béton est calculé comme suit

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

m_{sec} : La masse volumique du mortier a l'état fais.

m_{frais} : La masse volumique du mortier a l'état sec.

Nous pouvons calculer (m_{sec}) comme indiqué ci-dessous :

Calcul du quantitatifs :

- **Volume de récipient** : $5.1^2 \times 3.14 \times 10.7 = 873.88 \text{ cm}^3$

$$m_{\text{SEC}} = m_{\text{sable}} + m_{\text{cim}} + m_{\text{eau}}$$

$$\text{MSD100\%} : m_{\text{SECsd}} = 1268 + 422 + 253 = 1943 \text{ g}$$

$$\text{MSA100\%} : m_{\text{SECsa}} = 1380 + 460 + 276 = 2116 \text{ g}$$

$$\text{MSR100\%} : m_{\text{SECsr}} = 1260 + 420 + 252 = 1932 \text{ g}$$

$$\text{MSM (60+40)\%} : m_{\text{SECsm}} = (841 + 561) + 467 + 281 = 2150 \text{ g}$$

Tableau II.26: résultats de l'air occlus

Désignation	MSD100%	MSA100%	MSR100%	MSM (60+40)%
$m_{\text{frais net}}$ [g]	1846	2012	1838	2049
m_{ses} [g]	1943	2116	1932	2150
Air _{occlus} [%]	5.25	5.17	5.11	4.93

Les meilleurs résultats pour l'air occlus dans le mortier se situaient généralement entre 4 % et 8 %, ce que nous avons trouvé dans nos calculs.

II.5.2. Essais sur mortier durci :

II.5.2.1. Absorption par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion totale est déterminée selon la norme NBN B 15-215 [7] Le principe de l'essai consiste à déterminer la variation de la masse d'un échantillon de mortier immergé dans un bac d'eau jusqu'à une masse constante, soit la masse **M1**, après séchage à 105°C, soit la masse **M2**

L'absorption d'eau par immersion **Ab** est exprimée en pourcentage de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$Ab = \frac{M_1 - M_2}{M_2} 100\%$$

Les résultats obtenus sur les éprouvettes de chaque mortier (SD, SA, SR, SM) sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne des valeurs mesurées de chaque mortier (SD, SA, SR, SM).

III.5.2.2. Essai d'absorption par capillarité

Parmi les essais de durabilité, Des échantillons formes de 4x4xvar. cm ont été prélevée sur l'une des deux parties qui est divisées par les essais de traction des éprouvettes prismatiques (4x4x16) (Photo II.35).

L'essai d'absorption capillaire a été inspiré des recommandations de l'Association Française de Génie Civil [Association Française Génie Civil, 2007]. Le mode opératoire se déroule comme suit : • Sécher les échantillons dans une étuve à 70°C jusqu'à une masse constante telle que $\Delta m/\text{jour} \leq 0.1\%$ pour assurer une dessiccation complète des échantillons. • Imperméabiliser à l'aide de paraffine (ciré) toutes les faces extérieures des échantillons sauf la face qui sera étudiée et laisser jusqu'à séchage. • Mesurer la masse sèche et placer les faces à étudier dans un bassin d'eau de 5 mm d'épaisseur. • Mesurer la masse pondérale de l'conservation à le temps (10, 20, 30, 60, 90) min, 24h, 48h, 72h. • Déterminer la quantité d'eau absorbée et la sportivité.



Figure II.35 : L'essai d'absorption par capillarité.

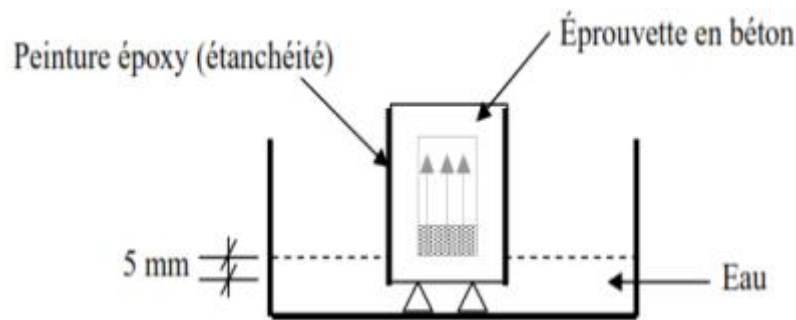


Figure II.36 : Principe de l'essai d'absorption par capillaire.

Pour chaque échéance de mesure (t), le coefficient d'absorption capillaire est défini par la relation suivante :

$$C_t = \frac{M_t - M_0}{A}$$

Où :

- C_t : est le coefficient d'absorption à l'échéance t (g/mm^2),
- A : la section de l'éprouvette (mm^2),
- M_t : la masse à une échéance t (g),
- M_0 : la masse initiale de l'éprouvette (g).

Notons que cette opération a été mesurée à chaque échéance citée précédemment.

II.5.2.3. Porosité :

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de durabilité au sens du document publié par l'AFGC en 2004.

Parmi les méthodes à disposition, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique.

Après conservation des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 7, 14, et 28 jours, et en utilisant une balance hydrostatique, soit :

- M_{eau} : la masse de l'éprouvette immergée dans l'eau
- M_{air} : la masse de l'éprouvette dans l'air alors qu'il est encore imbibé (masse saturée dans l'air)

- M_{sec} : la masse de l'éprouvette après séchage a une température 105 ± 5 °C jusqu'à une masse constante

$$P_0 = \frac{V_0}{V_a} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

II.5.2.4. Masses volumiques humide et sèche :

Conjointement avec la détermination de l'absorption d'eau par immersion, il peut être utile de déterminer les masses volumiques humide et sèche de l'éprouvette. Ces déterminations se font selon les directives de la norme NBN EN 12390-7 :2009

Le volume de l'éprouvette est déterminé grâce à une pesée hydrostatique. Après obtention de la masse humide constante, la masse sous eau de l'éprouvette est déterminée. Le volume V de l'éprouvette est calculé par la relation suivante :

$$V = \frac{M_{humide} - M_{sous\ eau}}{\rho_w (=1000)}$$

Avec :

- M_{humide} , la masse humide de l'éprouvette après immersion et déterminée à l'air ;
- $M_{sous\ eau}$, la masse sous eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique ;
- ρ_w , la masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 kg/m³ .

Les masses volumiques humide (MVH) et sèche (MVS) sont alors calculées par les expressions ci-après :

$$MVH = \frac{M_{humide}}{V} \quad \text{et} \quad MVS = \frac{M_{sèche}}{V}$$



Figure II.37: Balance hydrostatique.**Figure II.38:** Etuve ventilée

II.5.2.5. Résistance à la traction par flexion trois points :

L'essai de traction par flexion est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm³ selon les normes NF P.18-407, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion (3 points) de l'éprouvette soumise à un effort centré exercé à l'aide d'une presse hydraulique à une vitesse de montée en charge 0,04 à 0,06 N/mm² s, cette vitesse constante de $\pm 10\%$.

L'essai est déroulé comme suit :

- Placer l'éprouvette 4x4x16 cm entre les appuis du support de flexion. La face latérale de L'éprouvette doit être en contact avec les appuis.
- après la mise en marche de la presse jusqu'à la rupture.
- Lire la valeur de force de rupture " F ".
- Refaire la même démarche pour les autres éprouvettes.

La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule suivante :

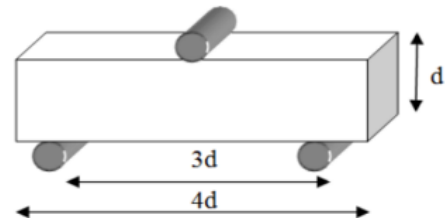
$$R_t = \frac{1.5FL}{B^3}$$

Rt : résistance à la traction par flexion en [MPa]

F : la charge appliquée à la rupture en [N]

L : la distance entre les appuis ($L = 100 \text{ mm}$)

B : le coté de la section carrée de l'éprouvette $B=40 \text{ mm}$



Nous utilisons la machine de compression avec quelque modification pour calculer la résistance à la traction par flexion comme le montrent les images ci-dessous :

Avec :

$$R_t = \frac{1.5FL}{B^3} = \frac{3FL}{2B^3} = \frac{3FL}{2B^3} = \frac{F}{2B^3/3L} \rightarrow A = 2B^3/3L = 2 \times 40^3 / 3 \times 100 = 426.67 \text{ mm}^2$$



Figure II.39: L'essai de traction par flexion trois points.

II.5.2.6. Résistance à la compression : Selon la norme EN 12390-3

La presse utilisée est une machine de type "**Controls**" ayant une capacité maximale de 2000KN puis soumise à un taux de chargement de $0,6 \text{ kN.s}^{-1}$ jusqu'à la rupture. (Photo II.40) La charge maximale qui provoque la rupture de l'éprouvette permet de calculer la résistance en compression comme suit :

$$\sigma_c = Pr / S$$

Avec :

Pr : l'effort enregistré au moment de la rupture de l'éprouvette

S : la section de l'éprouvette
 $40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'étuve pendant 24 heures avant l'âge d'essai.



Figure II.40 : L'essai de résistance à la compression.

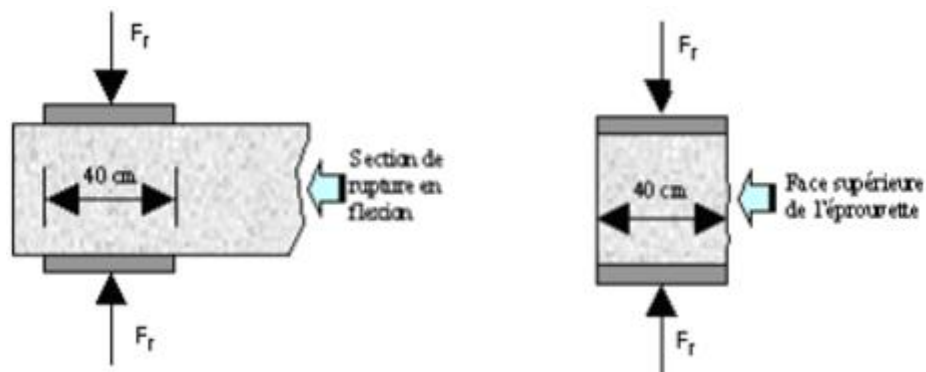


Figure II.41 : Schéma de l'écrasement d'un demi-prisme.

II.5.2.7 Essai ultrasonique :

Le matériel utilisé est l'appareil à ultrasons « Proceq Pundit Lab » (Photo II.16) et l'appareil à ultrasons controls. Cet essai est réalisé suivant **la norme EN 12504-4 (EN 12504-4, 2004)**, le principe de l'essai est qu'une impulsion de vibrations longitudinales est produite par un transducteur électroacoustique maintenu en contact avec une surface du mortier sous test. Après avoir parcouru une longueur de chemin connue dans le mortier, l'impulsion de vibrations est convertie en un signal électrique par un deuxième transducteur et des circuits de synchronisation électroniques permettent de mesurer le temps de transit de l'impulsion.

Dans cette étude, nous avons testé des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ séchées jusqu'à masse constante dans l'étuve à 50°C , trois mesures sont faites sur des éprouvettes utilisées pour chaque formulation de béton. Ces mesures sont faites aux échéances 7, 14 et 28 jours. Et après

lecture directe du temps et la vitesse ultrasonique d'après l'écran (Photo II.42). Ou procède au calcul de la vitesse ultrasonique par l'application de la relation suivante :

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

L : longueur de l'éprouvette

T : temps nécessaire à une impulsion ultrasonore pour se déplacer du transducteur Émetteur au transducteur récepteur.



Figure II.42 Appareil à ultrasons (Proceq Pundit Lab).



Figure II.43 Appareil à ultrasons (controls).

La norme [NA EN 12504-4] définir qualité du béton est déterminée en fonction des résultats obtenus, comme indiqué dans le tableau **tableau II.27** ci-dessous :

Tableau II.27: qualité du béton suivant la vitesse de propagation des impulsions

Qualité du béton	Vitesse de propagation des impulsions (m/s)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 – 4575
Douteuse	3050 – 3660
Mauvaise	2135 – 3050
Très mauvaise	Inferieure a 2135

II.5.2.8. Retrait

En l'absence de toute charge, le béton se déforme spontanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte de l'eau libre, par évaporation, qui se traduit par diminution du volume.

L'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du béton due aux vides d'air. Ces vides d'air sont beaucoup plus importants en présence des granulats poreux qui absorbent une quantité importante d'eau provoquant ainsi des retraits importants lors du durcissement ; d'où l'intérêt de l'étude du retrait.

Le retrait est, par définition, la différence entre la longueur de l'éprouvette aussitôt après démoulage et sa longueur, après séchage consécutif, dans des conditions parfaitement spécifiées.

L'essai de retrait a été réalisé conformément à la norme française NF P 18 - 427 [50]. Il consiste à mesurer en fonction du temps la variation de longueur d'une éprouvette prismatique (4x4x16 cm), par rapport à sa longueur initiale, placée dans un rétractomètre (Figure II.44) muni d'un comparateur qui permet la mesure du retrait à tout moment. La longueur initiale (longueur de référence) est celle de prisme un jour après sa fabrication.

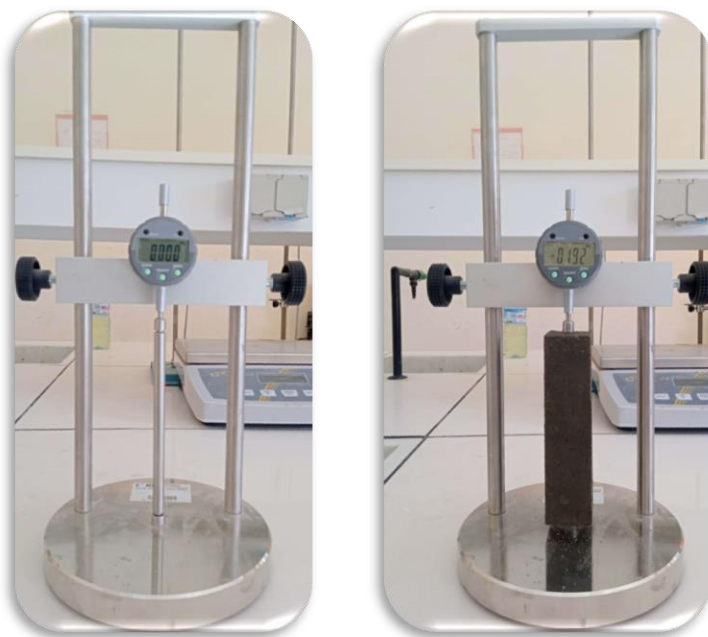


Figure II.44 : Essai de Retrait

Pour chaque éprouvette, la variation de longueur relative « d L » est calculée par différence entre la mesure initiale au démoulage et la mesure finale aux échéances spécifiées (7, 14 et 28 jours).

La variation dimensionnelle de l'éprouvette « Vd », est définie par la formule suivante :

$$V_d = \frac{dL}{L} \quad (\text{en } \mu\text{m/m})$$

Avec :

- dL : variation de longueur, exprimée en micromètres,

- L : longueur initiale entre les plots de mesure, exprimée en mètres.

Le retrait, à l'âge déterminé, est égal à la moyenne arithmétique, arrondie à la dizaine la plus proche, des valeurs mesurées sur chacune des trois éprouvettes.

II.6. Conclusion

Durant toutes les étapes de réalisation de ce travail, le respect du plan du mémoire et des normes des différents essais effectués.

La compréhension de ce sujet conduit à une division en deux volets distincts dans cette étude, dans un premier part les caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour la formulation des types du mortier élaboré. D'autre part (dans la deuxième partie) l'effet du traitement chimique est traitement par l'eau sur les propriétés physico-mécaniques : la masse volumique, l'absorption, la résistance à la flexion (traction) et à la compression.

CHAPITRE III : Interprétation et exploitation des résultats

CHAPITRE III : Interprétation et exploitation des résultats.

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter les différents résultats expérimentaux obtenus durant la période de la réalisation de ce projet de fin d'étude. Les essais ont été réalisés aux laboratoires de génie civil de l'université Hamma lakhdar à el-oued, laboratoire **nizoulabe** à el-oued, et laboratoire **ayati salah** à hassani abdelkrim.

Huit type mortiers ont été préparés avec un dosage de 450kg/m³ de ciment CRS, quatre sans traitement du granulat dont un mortier mélange témoin, et trois mortiers avec traitement chimique avec des différentes concentrations, et l'autre avec traitement du granulat par l'eau.

A partir des essais de caractérisation physique et mécaniques des huit mortiers, nous tentons par cette étude, en première étape d'interpréter les résultats obtenus pour caractériser les différents mortiers au 7, 14, 28 jours et en deuxième étape d'exploiter ces résultats pour en tirer des conclusions adéquates. On procèdera à des comparaisons du comportement des quatre mortiers utilisés au jeune âge aux règlements en vigueur en utilisant des corrélations entre leurs propriétés.

III.2. Influence de la composition et les traitements sur les propriétés du mortier :

III.2.1. Les propriétés physiques :

En vas commencer en premier lieu a étudié l'effet de la composition et les traitements du granulat sur les caractéristiques physiques du mortiers (Absorption, Porosité, Masse volumiques sèches et humides). Les différents résultats sont regroupés dans des tableaux et illustrés par des figures ci-dessous.

III.2.1.1. L'absorption par immersion totale :

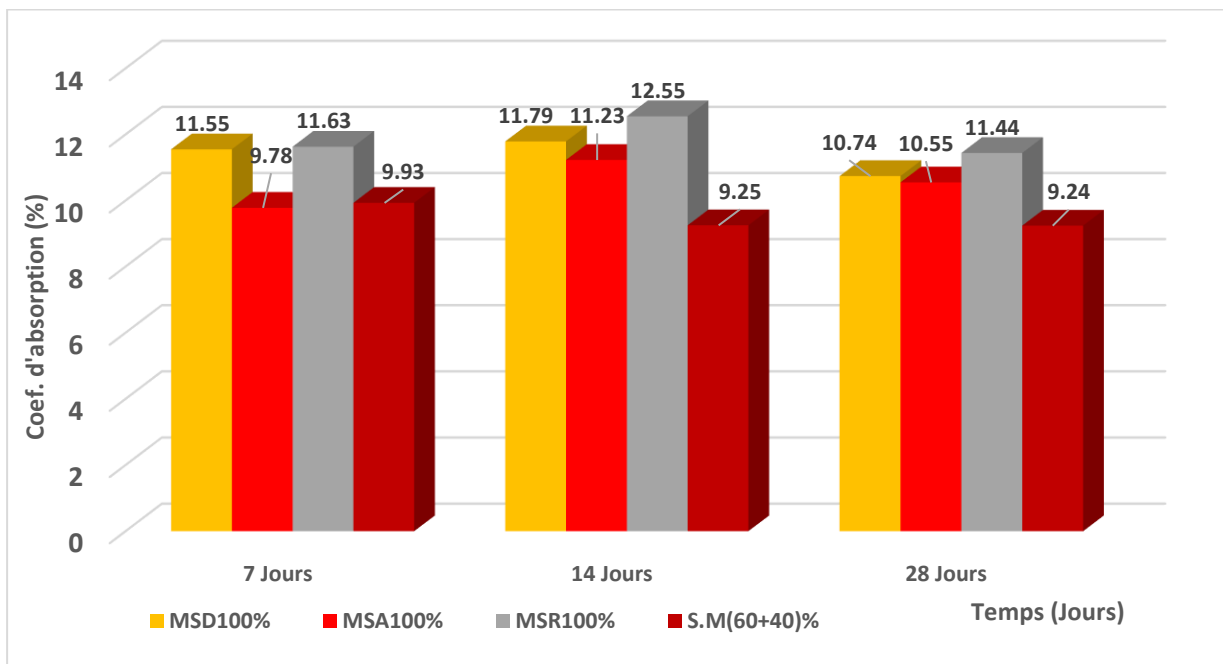


Figure III.1: L'évolution de l'absorption d'eau par immersion totale de mortiers non traité en fonction du temps

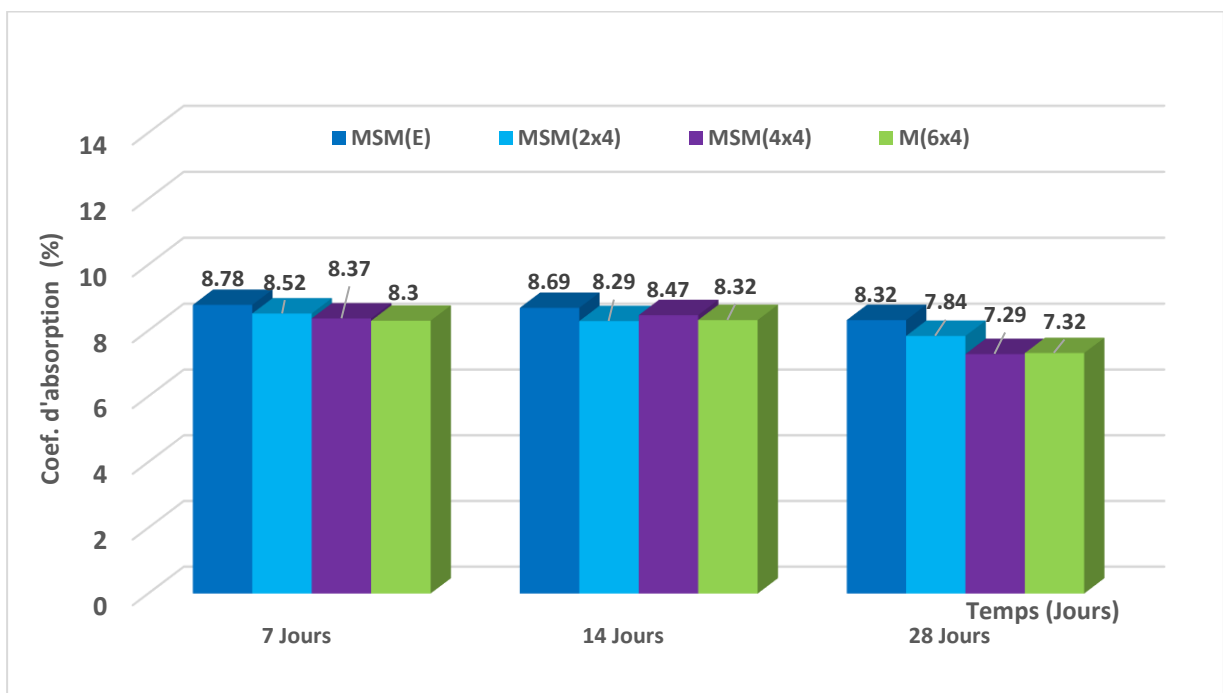


Figure III.2: L'évolution de l'absorption d'eau par immersion totale de mortiers traité en fonction du temps

Concernant l'évolution de l'absorption par immersion totale en fonction du temps, on remarque que l'absorption d'eau du mortier témoin MSA_{100%} à 28 jours a marqué des augmentations par rapport tous les mortier traité (MSM_(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) ; MSM_(6x4)) de (26.80%, 34.57%, 44.72%, 14.13%) respectivement, et a diminuée de (1.77%, 7.78%) pour MSD_{100%} ; MSR_{100%}.

On note également que plus le taux de traitement chimique des granulats est élevé, plus le taux d'absorption d'eau est faible.

Tout cela est dû au chevauchement des grains de sable des dunes et du sable recyclé, qui colmaté les pores et diminuée l'absorption d'eau.

III.2.1.2. L'absorption capillaire :

La cinétique d'absorption a été réalisée dans les conditions normale, pour tous les types de mortiers et pour chaque échéance (7 ; 14 et 28 jours) de mesure (t). L'influence du taux de substitution des sables recyclés sur l'absorption d'eau par capillarité de différents types de mortiers. Les résultats obtenus sont résumés dans les Figures III.3; III.4; et III.5.

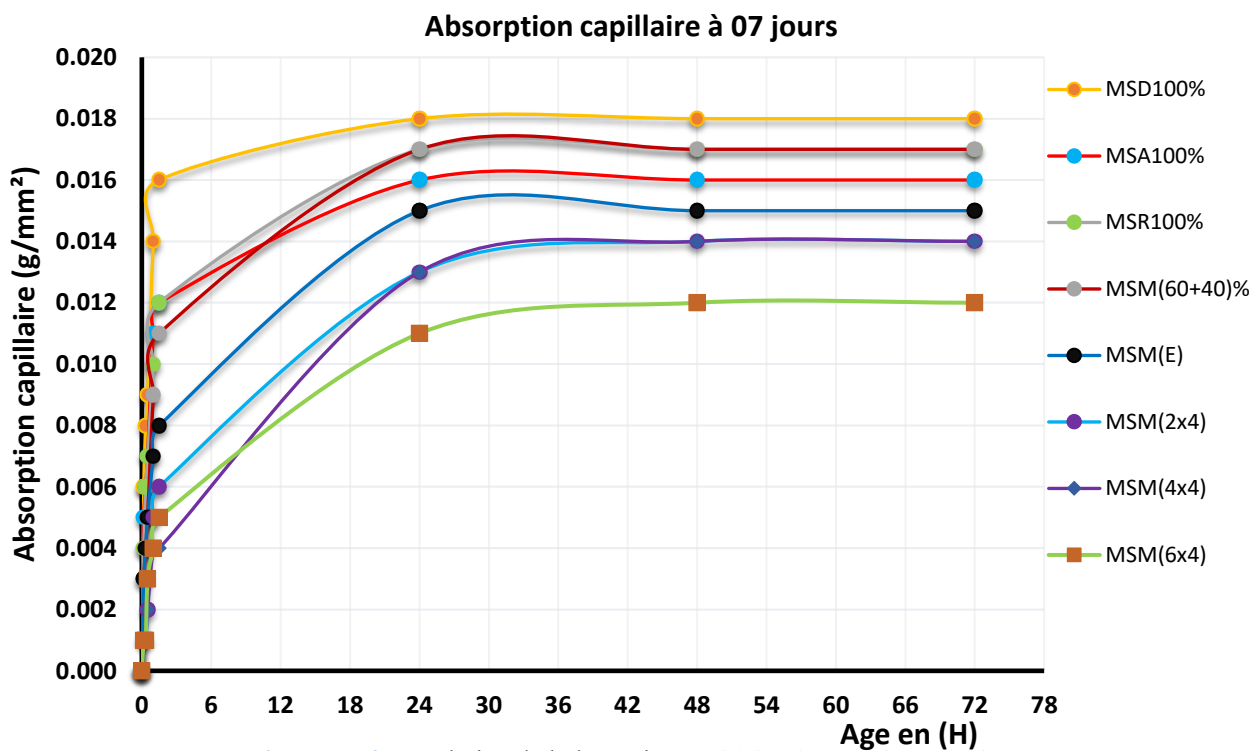


Figure III.3 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 07 jours

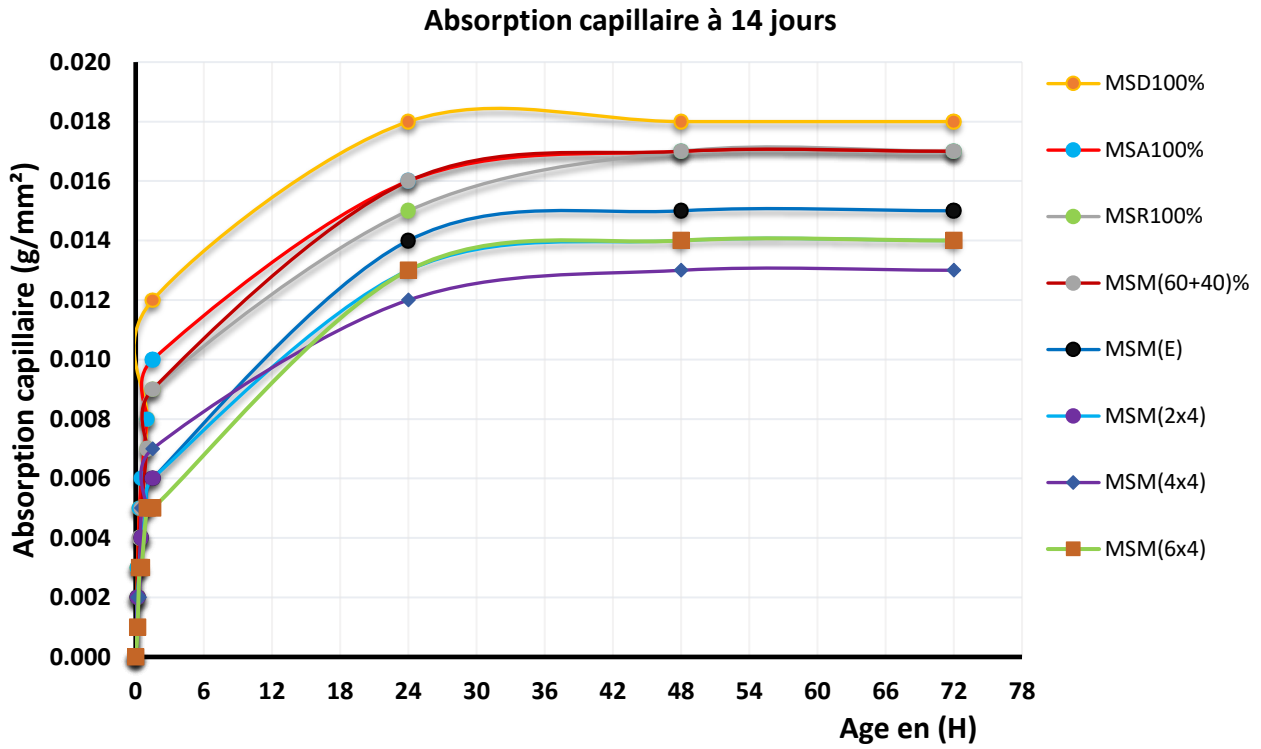


Figure III.4 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 14 jours

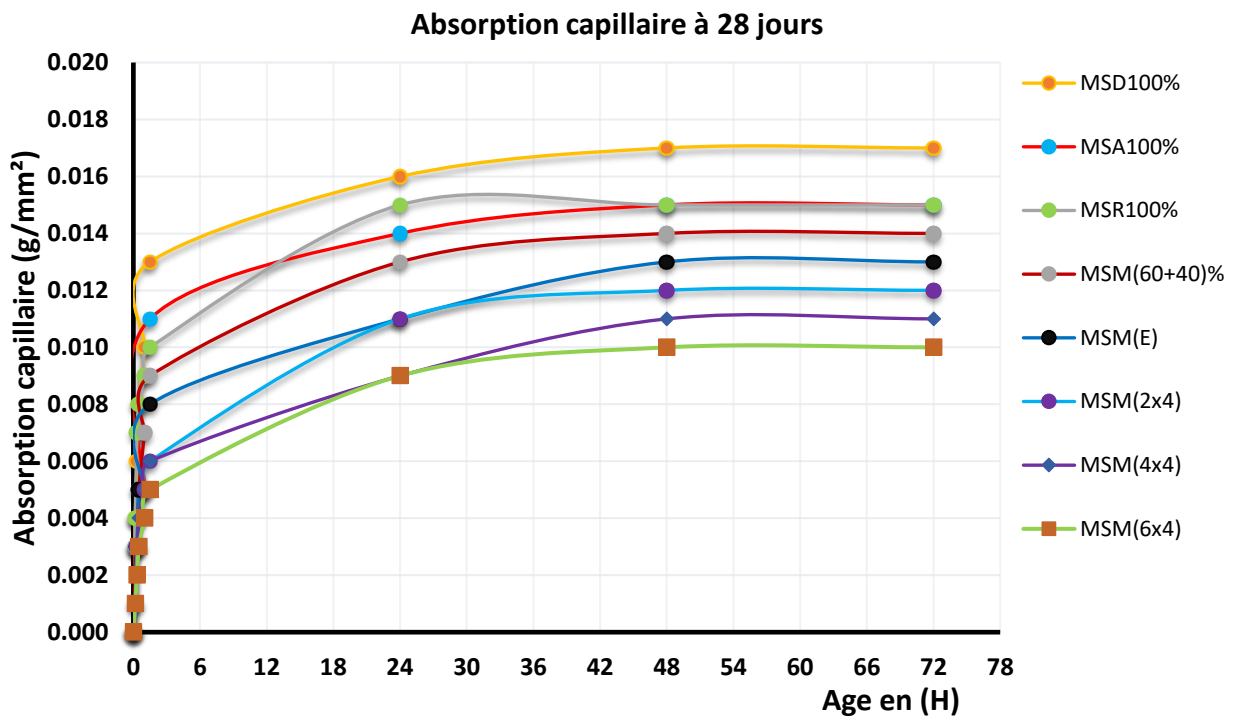


Figure III.5 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers à 28 jours

La courbe d'absorption capillaire montrent une augmentation de l'absorption d'eau dans le temps et ce pour tous les mortiers.

On remarque que le mortier témoin MSA_{100%} à 28 jours a marqué des augmentations par rapport tous les mortier traité (MSM_(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) ; MSM_(6x4)) de (15.38%, 25.00%, 36.36%, 50.00%) respectivement, et a diminuée de (11.76%, 0.00%) pour MSD_{100%} ; MSR_{100%}.

Tout cela est dû par la bonne distribution granulométrique des granulats et par le module de finesse de sable, qui colmaté les pores et diminuée l'absorption d'eau.

III.2.1.3. La porosité :

La porosité d'eau sont l'un indicateurs de la durabilité des mortiers, car ils traduisent la capacité des substances agressives qui pénétré et endommagé les mortiers. Les [figure III.6](#) et [figure III.7](#) regroupe l'ensemble des résultats obtenus de la porosité accessible à l'eau des mortiers testés.

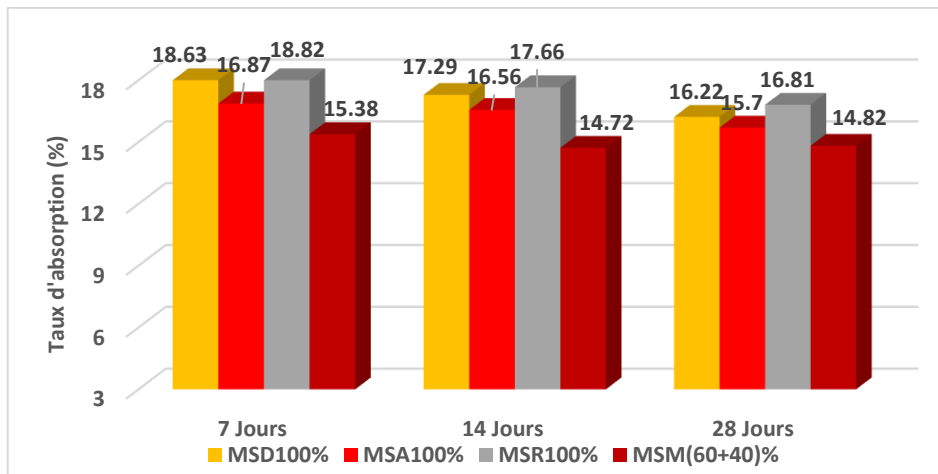


Figure III.06: L'évolution de la porosité de mortiers non traité en fonction du temps

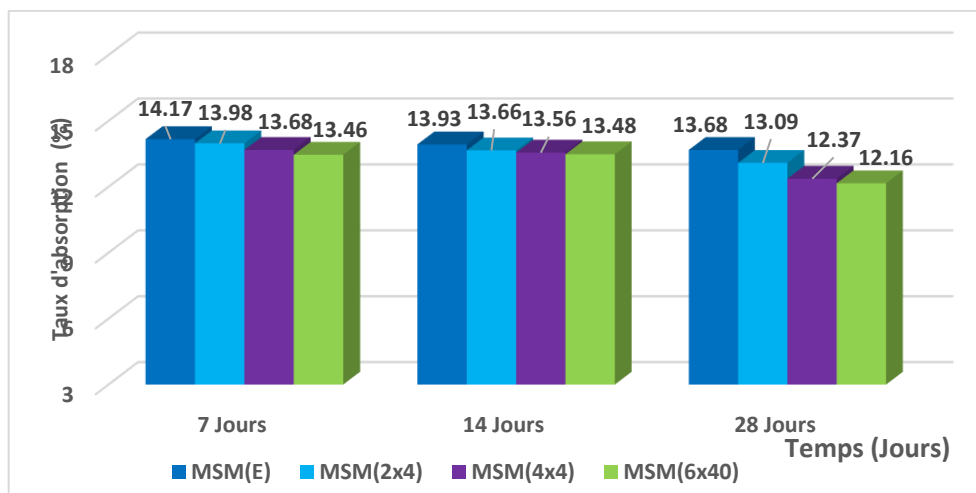


Figure III.07: L'évolution de la porosité de mortiers traité en fonction du temps

La porosité d'eau est l'un des indices indicateurs de durabilité, car ils traduisent la capacité des

substances agressives qui pénétré et endommagé les mortiers. Le figures III.6 et III.7 regroupe l'ensemble des résultats obtenus de la porosité accessible à l'eau des mortiers testés.

On remarque que le mortier témoin MSA_{100%} à 28 jours a marqué des augmentations par rapport tous les mortier traité (MSM_(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) ; MSM_(6x4)) de (14.77%, 19.93%, 26.92%, 29.11%) respectivement, et a diminuée de (3.20%, 6.60%) pour MSD_{100%} ; MSR_{100%}.

On note également que plus le taux de traitement chimique des granulats est élevé, plus le taux d'absorption d'eau est faible.

Tout cela est dû par la bonne distribution granulométrique des granulats et par le module de finesse de sable, et le traitement chimique qui colmaté les pores et diminuée l'absorption d'eau.

III.2.1.4. Les masses volumiques humides et sèches :

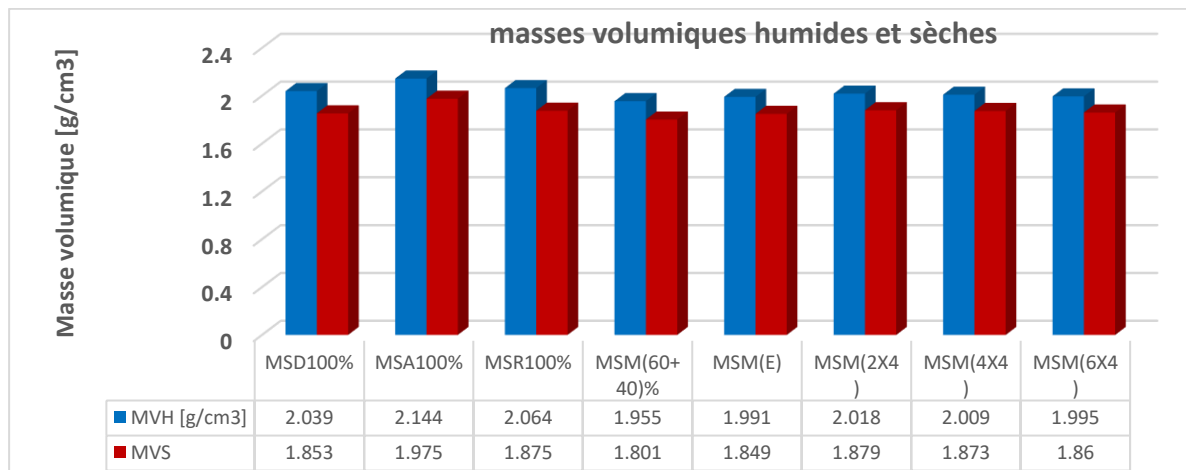


Figure III.08 : Evolution des masses volumiques en fonction de type de mortier à 07 jours

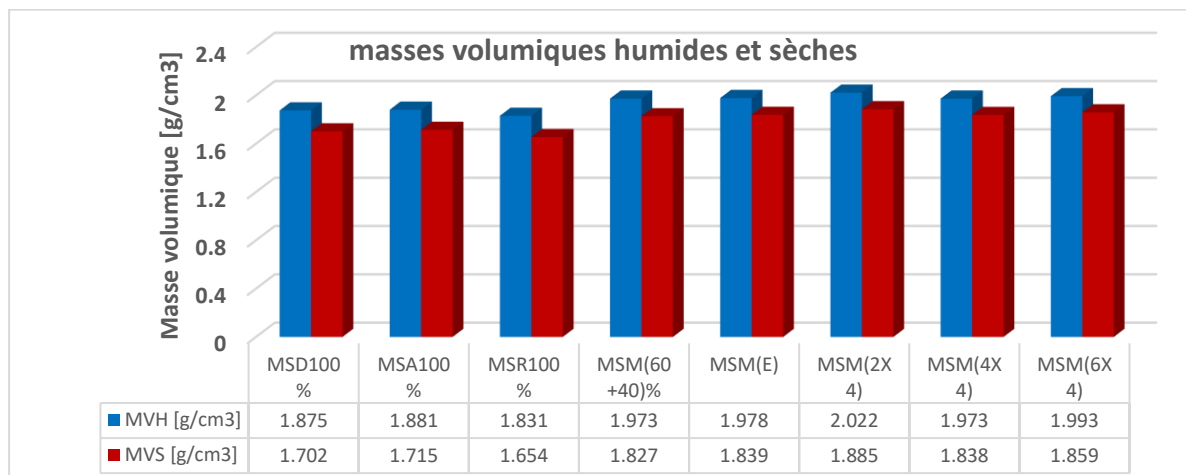


Figure III.09 : Evolution des masses volumiques en fonction de type de mortier à 14 jours

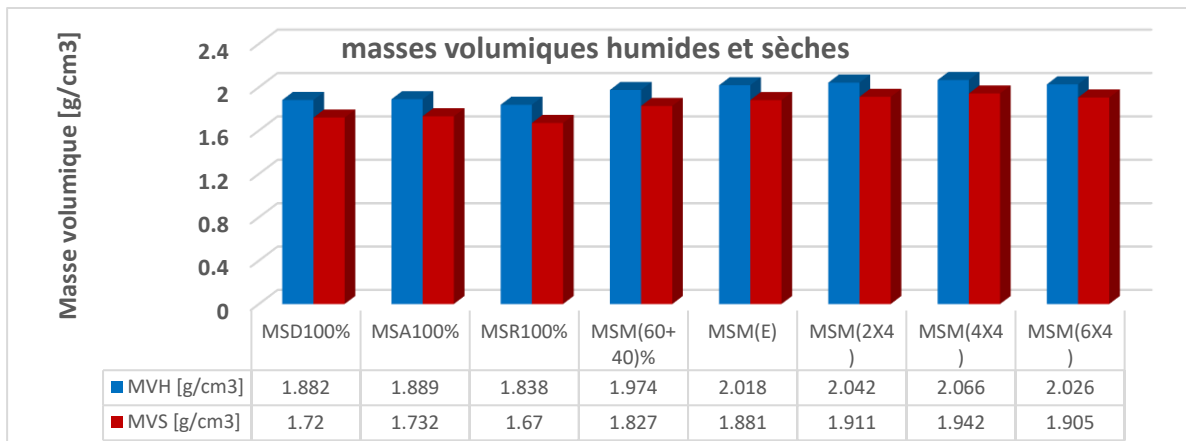


Figure III.10 : Evolution des masses volumiques en fonction de type de mortier à 28 jours

On remarque que le mortier témoin MSA_{100%} à 28 jours a marqué des diminutions par rapport tous les mortier traité (MSM_(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) ; MSM_(6x4)) de (7.09, 8.30, 9.48, 7.50)% respectivement, et une légère augmentation de (4.16%, 3.11%) pour MSD_{100%} ; MSR_{100%}.

Cela explique que plus le pourcentage de masse humide est faible, plus la résistance à la compression est élevée, car l'eau laisse des vides après évaporation qui affaiblissent la résistance à la compression.

III.2.2. Les propriétés mécaniques :

III.2.2.1. La résistance à la compression et à la flexion

La résistance à la compression est déduite de l'écrasement moyen de trois échantillons cubiques (40 x 40 x 40) cm³ pour différents types de mortier, c'est-à-dire à 7 j, 14 j et 28 j de cure dans les Figures. III.11.

La résistance à la flexion est déduite par moyenne de trois éprouvettes prismatiques de (4x4x16) cm³ pour chaque mortier, est soumis à un effort de flexion jusqu'à la rupture, soit à 7j, 14j et à 28 jours de cure. Les courbes de la figure III.12 présentent les résistances à la flexion des éprouvettes de différents mortiers en fonction du temps.

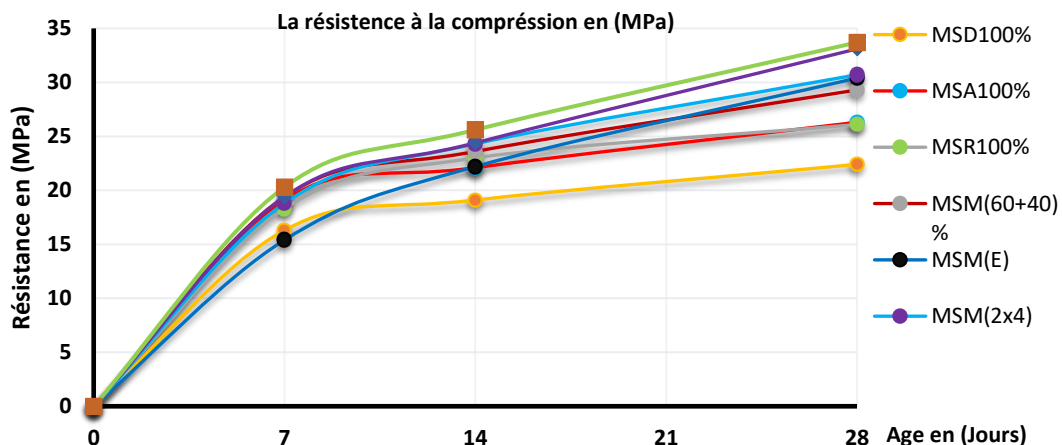


Figure III.11 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

Les courbes montrant que la résistance à la compression à 28 jours des mortiers traité (MSM_(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) ; MSM_(6x4)) a marqué des augmentations par rapport le mortiers témoin MSA_{100%} de (15.59%, 16.73%, 25.85%, 28.14%) respectivement, cette résistance variait de 30.40 à 33.70 MPa à 28 jours. Tout cela est dû par la bonne distribution granulométrique des granulats et par le module de finesse de sable qui réduit les vides entre les grains, et aux traitements chimique qui colmaté les pores, d'où une bonne résistance.

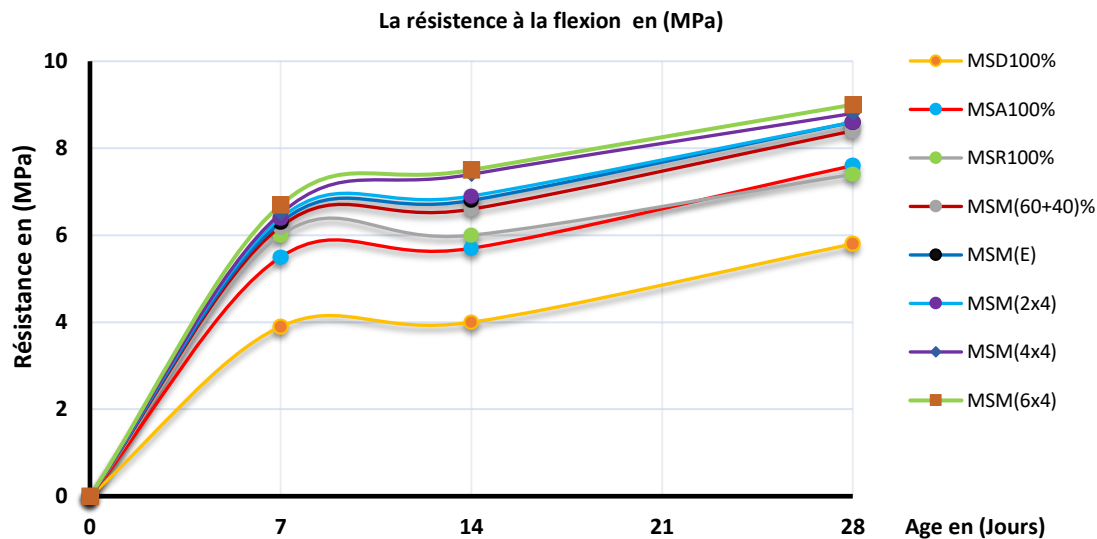


Figure III.12 : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps.

On remarque que tous les diagrammes de résistance à la flexion sont presque similaires pour tous les types de mortier, cette résistance sont limités entre 6 et 9 MPa en 7 à 28 jours, sauf pour le mortier MSD_{100%}, dont la résistance diminution de 4 à 6 MPa en 7 à 28.

Les résultats des mortiers traité (MSM_(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) ; MSM_(6x4)) a marqué des augmentations par rapport le mortiers témoin MSA_{100%} de (13.16%, 13.16%, 15.79%, 18.42%) respectivement. Les résultats du mortier traité toujours mieux que les mortiers non traités.

III.2.2.2. Vitesse ultrasonique :

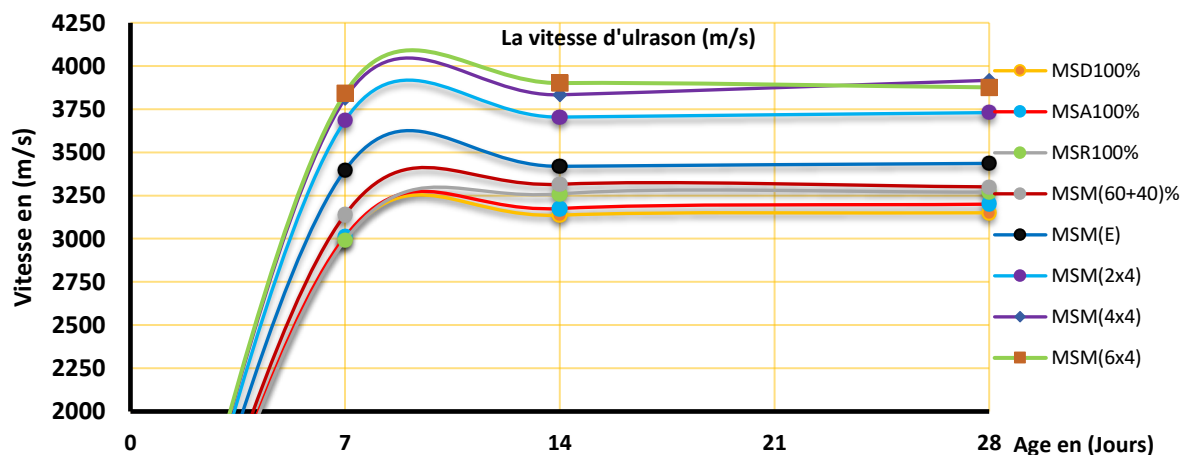


Figure III.13 : Evolution de la Vitesse ultrasonique en fonction du temps

On remarque que tous les diagrammes de la vitesse d'ultrason sont presque similaires pour tous les types de mortier, mais avec des valeurs différentes. Ces résultats sont en coordination avec ceux obtenus à partir des essais d'écrasement (figure III.11), et on constate que les mortiers traités ($MSM_{(E)}$; $MSM_{(2x4)}$; $MSM_{(4x4)}$; $MSM_{(6x4)}$) donnent la meilleure vitesse par rapport au mortier témoin $MSA_{100\%}$ de (7.37%, 16.56%, 22.40%, 21.12%) respectivement.

Cette constatation observée simultanément avec les essais mécaniques, compression et traction et les essais physiques.

III.2.3. Les propriétés rhéologiques

III.2.3.1. Le retrait des éprouvettes :

Le retrait du béton ou mortier correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise du béton ou mortier. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par un ferrailage approprié et par des joints, ces variations dimensionnelles engendrent l'apparition de fissures. Les fissures dues au retrait ne doivent pas être confondues avec les fissures liées à la fonctionnalité des ouvrages (dus à l'application d'efforts trop importants par exemple). Celles-ci étant maîtrisées par les règles de calcul du béton armé. Il existe 4 types de retrait dans le béton, Le retrait de séchage (encore appelé retrait de dessiccation), le retrait plastique, le retrait endogène (encore appelé retrait d'autodessiccation, ou retrait chimique d'hydratation du ciment) et Le retrait thermique. Ces 4 types de retrait peuvent se cumuler à l'échelle d'un même béton (on parle ainsi du retrait total comme la somme des différents retraits). Le retrait d'auto dessiccation et le retrait thermique intéressent la masse du béton, alors que les deux autres types de retrait concernent la surface libre de l'ouvrage en béton.

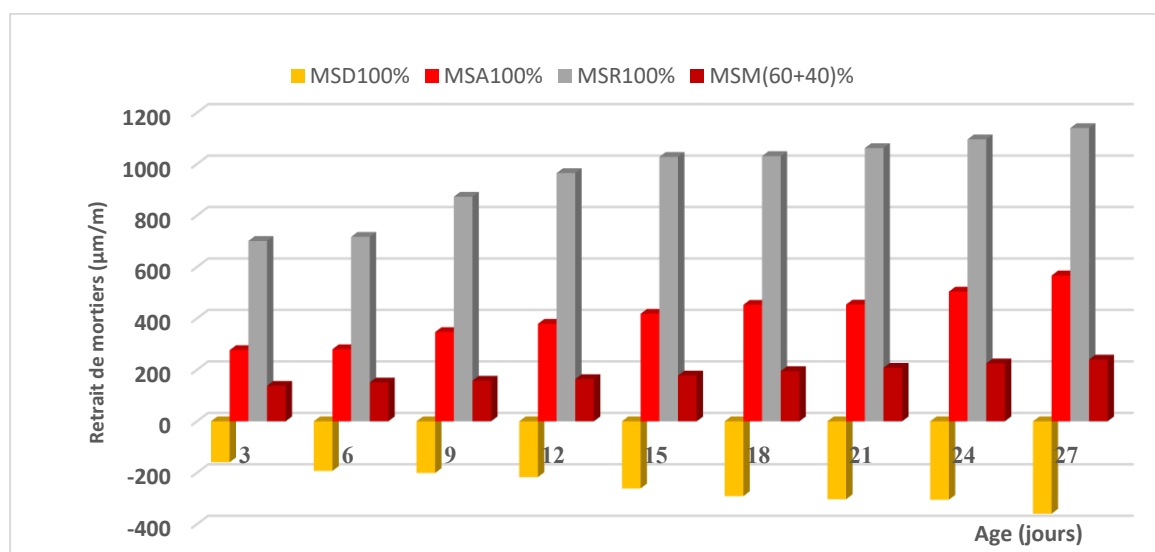


Figure III.14 : L'évolution de retrait de mortiers non traité en fonction du temps

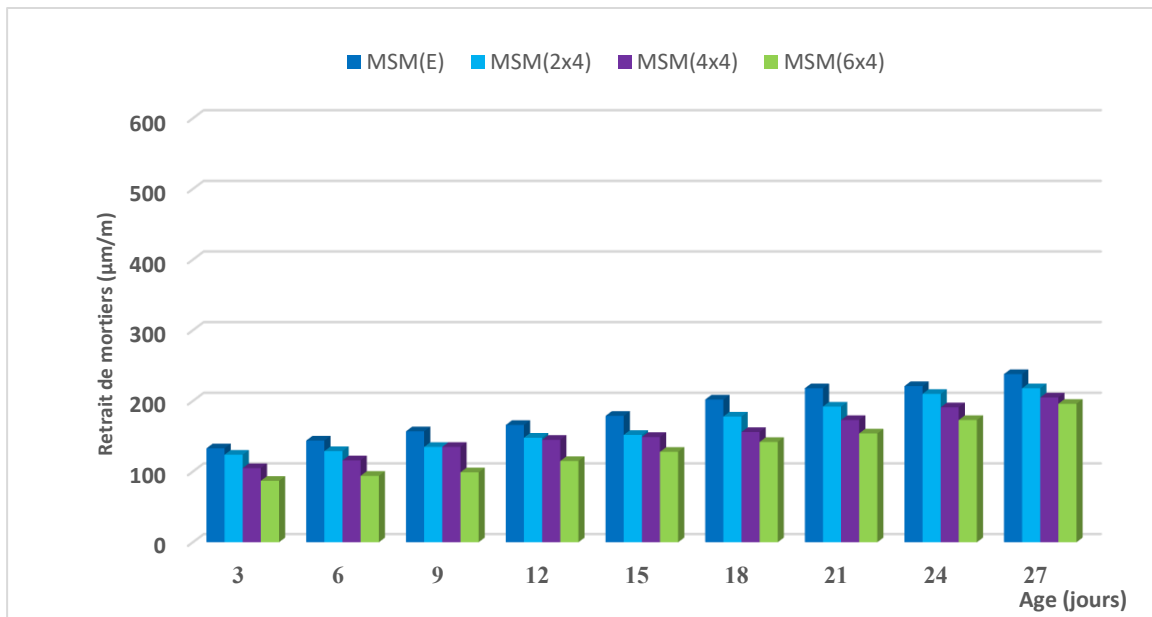


Figure III.15 : L'évolution de retrait de mortiers traité en fonction du temps

L'amélioration observée dans le retrait des échantillons de mortier traité par rapport au retrait du mortier MSA_{100%}, que nous considérons comme d'échantillon de référence comme nous les avons exposés dans le [figure III.14](#) , [III.15](#)

A l'âge de 3 et 27 jours, cette amélioration est due à la composition granulaire du sable de dune et recyclé avec des taux de traitement chimique, qui présente un large gradient granulaire, car plus le gradient granulaire a tendance à s'étendre et à s'étendre, plus la surface sur laquelle la pâte de ciment sera petite occupent, et puisque le retrait se situe dans la pâte de ciment intergranulaire, ce qui explique le taux d'amélioration du dégonflage.

Pour le mortier MSD_{100%} conservés à l'eau, les résultats obtenus c'était l'inverse. La raison en est peut-être la propreté du sable insuffisant.

Pour les autres mortiers mélange traité elle donnée bons résultats.

III.3. Conclusion

Après cette campagne d'évaluation (les résistances mécaniques, l'ultrason, l'absorption capillaire, l'absorption par immersion total, la porosité et le retrait) nous avons constaté que les mortiers traités chimiquement ont donné des résultats performants par rapport aux autres mortiers, surtout le mortiers MSM_(4x6).

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux de démolition et le sable de dune en tant que source de granulats pour confectionner des éprouvettes des mortiers. Dans ce contexte, l'intérêt économique et écologique sont extrêmement présents.

- Les résistances mécaniques, à la compression et à la flexion à tout âge à 28 jours, des mortiers à base du sable de dune substitution par granulats recyclés, sont très acceptables par rapport à celles des mortiers MSD_{100%} MSR_{100%}. Ces performances mécaniques mettent en évidence, que les granulats recyclés peuvent fournir des mortiers de résistance caractéristique à 28 jours en compression et en flexion dans les limites de 29 à 33 MPa et 8.5 à 9 MPa respectivement.
- L'absorption d'eau très élevée pour le mélange MSD_{100%} et MSR_{100%} par rapport les autres mélanges, par le suspecte d'avoir des conséquences néfastes sur la durabilité, on résume sur l'absorption capillaire à âge 28 jours le mortier MSM_(6x4) à enregistre la plus petite absorption, et donne la meilleure résistance mécanique, ce qui signifie un bon mélange et un bon traitement chimique.
- La porosité importante de composition à granulats recyclés MSR_{100%} a conduit à un fort taux d'absorption, qui a atteint 155% celui des mélanges traité et granulats de sable de dune MSD_{100%} ce qui a conduit à un fort taux d'absorption, qui a atteint 153% celui des mêmes mélanges, celui-ci a affecté le comportement rhéologique et physico-mécanique du mortier frais et durci qui compromettrait la durabilité de ces mortiers surtout s'ils étaient utilisés dans des milieux agressifs.
- Les mortiers M(E) ; MSM_(2x4) ; MSM_(4x4) et MSM_(6x4) permettent d'avoir une bonne compacité et un meilleur taux de diminution de retrait, cela passe notamment par l'augmentation du diamètre du granulat utilisé et un large gradient granulaire.
- On a pu mettre en évidence la faisabilité des granulats recyclés et sable de dune comme substitués aux granulats naturels, tant que sur le plan de l'exploitation des ressources naturels que sur celui de l'environnement et de l'économie.
- Enfin l'ajout de sable de dune ou la substitution du sable recycle par le sable de dune présente le double avantage d'une part augmenter les performances mécaniques des mortiers, d'autres part remplacer un matériau tarissable et surexploité (sable alluvionnaire) par un matériau abondant et sous-exploité.

Les perspectives et recommandations :

- Confronter les résultats obtenus en laboratoire avec ceux de chantier à grand échelle.
- Etude de la durabilité de ces mortiers.

ANNEXE



GICA BÉTON

GICA BÉTON CEM II A-L 42.5 N

Idéal pour la fabrication de mortiers et tous travaux de béton armé

[f](#) [in](#) [v](#) [t](#) /Groupe GICA www.gica.dz

COMPOSITION

Clinker	Ajout calcaire	Constituant secondaire
(80 à 94) %	Catégorie A (06 à 20) %	(De 0 à 5) %

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

	Temps de prise	Stabilité
VALEUR	≥ 60 minutes	≤ 10 MINUTES

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

	Résistance à la compression à 02 j	Résistance à la compression à 28 j
42.5 N	≥ 10.0 N / mm ²	≥ 42.5 (N / mm ²)
42.5 R	≥ 20.0 N / mm ²	≤ 42.5 (N / mm ²)

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUE S

Teneur en sulfates (SO3)	Teneur en chlorures (Cl)
≤ 4.0 %	≤ 0.10 %

PACKAGING

Sacs 50 kg / Disponible en sac & Vrac

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I : Étude Bibliographique

- [1] <http://193.194.86.69/facultes/ft/externe/departements/gc/cours/mortiers.pdf>
- [2] <https://elearning-facsct.univ->
- [3] <https://q=photo+Exemple+d%E2%80%99un+g%C3%A2chait+de+mortier&tbm=isch&source=iu&ictx=1&vet=1&fir=-BiMRQWFswLD2M%252Cn37a->
- [4] HEMIL Samir ; NOUGARI Ayoub Zakaria. « Effet combiné des billes du polystyrène et les fibres plastique sur les mortiers au ciment blanc », Thèse de Magister en Génie Civil, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA (2018), 99 p
- [5] <http://forum-btp.blogspot.com/2013/09/les-mortiers.html>
- [6] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/construction-maison-preparer-bonmortier-hourdage-1023/page/7/>
- [7] <https://www.pavebeton.fr/comment-faire-du-mortier/>
- [8] <https://www.constructionlabrique.com/le-mortier-et-son-utilite/>
- [9] NAILI Ahlem. « Effet du traitement des granulats plastiques et le type de sable sur les caractéristiques du mortier », Mémoire Master Académique, Université Mohamed Khider de Biskra (2020), 99 p
- [10] BOUGUERRA Anwar., BAHACHE fatma. « Effet de l'incorporation de l'entraineur d'air sur les caractéristiques du mortier à base de la poudre de verre et fibres métalliques », Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila (2021).
- [11] <https://blog.teralta-audemard.com/type->
- [12] KHACHBAT Mohamed ettahir - ARDJANI Kamel « caractérisation d'un mortier à base de sable de d'une avec caoutchouc », Mémoire Master, Université 8 Mai 1945 Guelma - (2020), 98 p
- [13] <https://www.calcairesregionaux.com/index.php/sables-et-melanges-a-beton/sablesiliceux-blanc-ivoire-lave>
- [14] https://www.midi-concassage.fr/blog/colas_product/02-concasse/
- [15] <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/les-dunes-gardent-une-distance-de-securite19686.php>
- [16] https://fr.freepik.com/photos-gratuite/plan-vertical-motifs-belles-dunes-sable-dansdesert_11354046.htm
- [17] https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_hab/3900

- [18] <https://fr.depositphotos.com/stock-photos/sable-noir.html>
- [19] <https://fr.dreamstime.com/photographie-stock-libre-droits-plante-verte-en-dune-sableblanche-image24612667>
- [20] <https://www.newmexico.org/listing/white-sands-national-monument/218/>
- [21] <https://pixnio.com/fr/nature-paysages/dunes-de-sable/grand-gris-des-dunes-de-sable-acote-de-la-riviere>
- [22] <https://q=Sable+de+dune+brune+photo&tbm=isch&source=iu&ictx=1&vet=1&fir=D119PN-R9B1Z7M%252CNfKW>
- [23] http://dune-littorale-aquitaine.n2000.fr/dunes_gi/pgcf/presentation
- [24] BELMECHERI Oum Habiba. « Etude d'un composite à base de sable de dune, Ciment et granulats en billes de polystyrène expansé », Mémoire Master Académique, Université Amar Telidji de Laghouat (2012), 161 p
- [25] ZERIG T, KIREM M. S., Etude de la possibilité de recyclage du béton de démolition avec l'incorporation de fines de marbre, thème de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020.

Chapitre II : Résultats expérimentaux

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE II

- [1] NA 2607(2005) : Norme Algérienne, CS 91.100.20, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, adopté le 08/10/2009 (Consulter le 5/5/2022)
- [2] NA 5113 (2008): Norme Algérienne, Granulats pour béton, adopté le 07/06/2009 (Consulter le 5/5/2022).
- [3] Dreux G., Festa J., (1998) : New concrete guide, ISBN 13: 978-2-212-10231-4 p 418 (Consulter le 4/3/2021).
- [4] NA 455(1999) : Norme Algérienne, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines - Equivalent de sable, adopté le 16/05/2006 (Consulter le 5/5/2022).
- [5] NA 442(2013) : Norme Algérienne N° édition : 3 Date : 2005 ICS : 91, 100, 10, ciment composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (Consulter le 5/5/2022).

[6] NA 1966(2009) : Norme Algérienne, Eau de gâchage pour bétons spécifications de processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton. Révisée le 2/5/2009 (Consulter le 6/5/2022).

[7] https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=.standards_regulations&page=list&art=search&id=CSTC86514 (Consulter le 6/3/2021).

[08] <https://hal-normandie-univ.archives-ouvertes.fr/hal-02181261/document>