

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université d'El-Oued**

**Faculté de Technologie**

**Département :**

Hydraulique et Génie Civil

**Mémoire**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Génie civil**

**Option : *matériaux en génie civil***

**THEME:** Résistance et microstructure d'un éco-béton produit à partir de déchets de verre comme substitut partiel du sable

**Dirigé par :**

Dr. Tarek Djedid

**Présenté par :**

Bahi Abdelhak

Alia Abdessabour

**Année universitaire**

2019/2020

## Remerciements

*En tout premier lieu, nous remercions le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que le courage pour dépasser toutes les difficultés.*

*Un grand merci à Monsieur Tarek Djedid, Professeur à l'Université d'El oued, mon Directeur de thèse, pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant d'être le Directeur de ce travail. Nous avons pu apprécier ses compétences scientifiques et il a su nous faire profiter de son expérience et de ses directives fructueuses.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche.*

*Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil qui ont participé à notre formation.*

*Des remerciements en particulier vont à Mr : Abdelhamid Sedira, Chef du Laboratoire L.G.C.R d'El oued, de nous avoir accueilli au sein de son établissement, à Mr : Saidi Ouellabi, Chef du Laboratoire NIZOLAB, qui nous ont mis leurs matériels à notre disposition et ses conseils objectifs.*

*Afin de n'oublier personne, nos vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui nous ont aidé à la réalisation de ce modeste mémoire.*

## Dédicaces

*Au nom de Dieu le Clément et le Miséricordieux louange à ALLAH le Tout  
Puissant*

*Nous dédions ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de  
remerciement :*

*A nos chers parents, A nos chers frères qui nous ont aidé de près et de loin.*

*A toutes mes chers amis  
Salim, Bachir, Oussama*

*A professeur de français  
Guemari Belgacem*

*A toute notre famille, qui porte le nom Bahi et Alia.*

*A tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste travail et tous ceux  
qui nous sont chers.*

## Résumé

La gestion des déchets devient un problème majeur pour les communautés du monde entier. Le verre, étant non biodégradable, ne peut pas être ajouté à la décharge et, à ce titre, les possibilités de recyclage doivent être étudiées. En raison de la consommation élevée de matériaux de l'industrie de la construction, l'utilisation de déchets de verre comme partiel d'agrégats fins dans le béton de structure est particulièrement intéressante.

Ce projet visait à déterminer le niveau optimal de remplacement du verre pour obtenir des bonnes caractéristiques mécaniques. Cinq échantillons de béton ont été testés à 7, 14, 28 et 90 jours, pour des proportions de remplacement du verre de 10, 20, 30 et 40%. Les résultats affirment que le béton de 40% de grains fins de verre de dimension  $< 0.315$  mm gagne des grandes résistances mécaniques à la traction et à la compression

Quelques indicateurs de durabilité ont été testés : absorption capillaire, variation de masse, pourcentages des vides (porosité), et ils ont indiquent généralement que le béton M4 (contient le même pourcentage) gagne des meilleurs résultats

**Mots clés :** Déchets de verre, Granulats fins, Résistance à la compression, Résistance à la traction fendue.

## Abstract

Waste management is becoming a major problem for communities around the world. Glass, being non-biodegradable, cannot be added to the landfill and, as such, the possibilities of recycling must be studied. Due to the high consumption of materials from the construction industry, the use of glass waste as a part of fine aggregates in structural concrete is of particular interest.

This project aimed to determine the optimal level of glass replacement to persist in good mechanical characteristics. five concrete samples were tested at 7, 14, 28 and 90 days, for glass replacement proportions of 10, 20, 30 and 40%. The results affirm that the concrete of 40% of fine grains of glass of dimension  $<0.315$  mm gains great mechanical strengths in tension and compression

Some durability indicators have been tested: capillary absorption, mass variation, voids percentages (porosity), and they generally indicate that M4 concrete (contains the same percentage) gains better results.

**Keywords:** Waste glass, Fine Aggregates, Compressive strength, Split tensile strength.

## ملخص

أصبحت إدارة النفايات مشكلة رئيسية للمجتمعات حول العالم. لا يمكن إضافة الزجاج، لأنه غير قابل للتحلل الحيوي، إلى مكب النفايات، وعلى هذا النحو، يجب دراسة إمكانيات إعادة التدوير. نظرًا للاستهلاك العالي للمواد من صناعة البناء، فإن استخدام نفايات الزجاج كجزء من الركام الناعم في الخرسانة الإنشائية له أهمية خاصة.

يهدف هذا المشروع إلى تحديد المستوى الأمثل لاستبدال الزجاج للاستمرار في الخصائص الميكانيكية الجيدة. تم اختبار خمس عينات خرسانية في 7 و14 و28 و90 يومًا لنسب استبدال الزجاج بنسبة 10 و20 و30 و40%. تؤكد النتائج أن خرسانة 40% من حبيبات الزجاج ذات الأبعاد  $>0.315$  ملم تكتسب قوة ميكانيكية كبيرة في التوتر والضغط.

تم اختبار بعض مؤشرات المتانة: الامتصاص بالخاصية الشعرية الشعرية، الاختلاف الكتلي، نسب الفراغات (المسامية)، وتشير بشكل عام إلى أن الخرسانة M4 (تحتوي على نفس النسبة المئوية) تحقق نتائج أفضل.

**الكلمات المفتاحية:** نفايات الزجاج، الركام الناعم، قوة الانضغاط، مقاومة الشد.

## TABLE DES MATIÈRES

|   |      |
|---|------|
| Remerciements.....  | i    |
| Dédicaces.....  | ii   |
| Résumé.....   | iii  |
| Abstract.....   | iv   |
| الملخص.....   | v    |
| Table des matières.....   | vi   |
| Liste des figures.....  | viii |
| Liste des tableaux.....   | x    |
| INTRODUCTION GENERALE.....  | 1    |
| <b>CHAPITRE I : Synthèse bibliographique</b>                      |      |
| I.1. Introduction.....  | 3    |
| I.2 le béton et le sable.....                                     | 3    |
| I.2.1 Généralité sur le béton .....                               | 3    |
| I.2.2 Les compositions du béton.....                              | 4    |
| I.2.3 le sable .....  | 5    |
| I.2.4 L'influence la manque de sable sur l'environnement.....     | 6    |
| I.3 le verre.....   | 6    |
| I.3.1 Historique.....   | 6    |
| I.3.2 La structure de verre.....                                  | 7    |
| I.3.3 le déchet.....  | 7    |
| I.3.3.1 Les déchets de verre .....                                | 7    |
| I.3.4 Le verre en génie civil.....                                | 7    |
| I.4 Avantages économique et techniques « du béton de verre »..... | 8    |

|  |    |
|--|----|
| I.4 le verre dans le béton.....  | 9  |
| I.4.1 Les méthodes d'utilisation de verre dans le béton.....             | 9  |
| I.4.2 Les études précédentes.....  | 10 |
| I.5 Conclusion .....   | 13 |
| <b>CHAPITRE II : MATERIAUX, MATERIELS ET ESSAIS</b>                      |    |
| II.1 Introduction.....   | 14 |
| II.2 Matériaux utilisés.....   | 14 |
| II.2.1 Granulats.....  | 14 |
| II.2.2 Ciment.....   | 23 |
| II.2.4 Eau de gâchage.....   | 25 |
| II.3 Essais réalisés à l'état frais.....                                 | 25 |
| II.3.1 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams.....                         | 25 |
| II.3.2 Essai de la masse volumique à l'état frais.....                   | 26 |
| II.4 Essais réalisés à l'état durci.....                                 | 26 |
| II.4.1 Essais mécaniques.....  | 28 |
| II.4.1.1 Résistance à la compression et à la traction.....               | 24 |
| II.4.2 Essai ultrasonique.....   | 25 |
| II.4.3 Essais de durabilité.....   | 26 |
| II.4.3.1 Essai d'absorption par capillarité.....                         | 29 |
| II.4.3.2 Variation de masse.....   | 30 |
| II.4.3.3 Essai de porosité.....  | 30 |
| II.5 Conclusion.....   | 31 |
| <b>CHAPITRE III : PROTOCOLE EXPERIMENTALE ET RESULTATS ET DISCUSSION</b> |    |
| III.1 Introduction.....  | 32 |

|  |    |
|--|----|
| III.2 Procédure Expérimentale.....   | 32 |
| III.2.1 la formulation du béton .....  | 32 |
| III.2.2 Protocol et suivis.....  | 33 |
| III.3 Résultats et discussion.....   | 34 |
| III.3.1 Effet de la substitution sur les propriétés du béton frais.....  | 34 |
| III.3.2 Effet de la substitution sur les propriétés du béton durci .....                                       | 36 |
| III.4 Les corrélations.....  | 42 |
| III.4.1 Relation de corrélation entre la résistance en traction et la vitesse d'impulsion ultrasonique.....    | 43 |
| III.4.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique..... | 40 |
| III.4.3 Relation de corrélation entre la résistance en compression + en traction et la porosité.....           | 43 |
| III.4.4 Relation de corrélation entre l'affaissement et la densité.....  | 44 |
| III.4.5 Relation de corrélation entre la porosité et le coefficient d'absorption.....                          | 45 |
| III.5 Conclusion.....  | 47 |
| Conclusion générale et perspectives.....   | 48 |
| Références bibliographiques.....   | 50 |
| Annexes.....   | I  |

## LISTE DES FIGURES

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| <b>I.1</b>   | Représentation schématique de la structure du verre de silice  | 08 |
| <b>II.1</b>  | Sable de Djamaa  | 14 |
| <b>II.2</b>  | Gravier 3/8  | 14 |
| <b>II.3</b>  | Gravier 8/15   | 14 |
| <b>II.4</b>  | les agrégats de verre  | 14 |
| <b>II.5</b>  | Analyse granulométrique des granulats étudiés                  | 17 |
| <b>II.6</b>  | Analyse granulométrique de sable avec 10% de verre             | 18 |
| <b>II.7</b>  | Analyse granulométrique de sable avec 20% de verre             |    |
| <b>II.8</b>  | Analyse granulométrique de sable avec 30% de verre             | 18 |
| <b>II.9</b>  | Analyse granulométrique de sable avec 40% de verre             | 19 |
| <b>II.10</b> | Appareillage pour essai au bleu                                | 20 |
| <b>II.11</b> | Le ciment utilisé (MATINE)                                     | 22 |
| <b>II.12</b> | Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams                      | 24 |
| <b>II.13</b> | Essais de la compression et de traction par fendage            | 26 |
| <b>II.14</b> | Photo de l'essai d'absorption par capillarité                  | 27 |
| <b>II.15</b> | Pesé hydrostatique   | 29 |
| <b>III.1</b> | les résultats d'affaissement des bétons                        | 33 |
| <b>III.2</b> | les résultats de la masse volumique des bétons                 | 34 |
| <b>III.3</b> | les résultats de la résistance à la compression des bétons     | 35 |
| <b>III.4</b> | les résultats de la résistance à la traction des bétons        | 36 |
| <b>III.5</b> | les résultats de vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons   | 37 |
| <b>III.6</b> | les résultats de coefficient d'absorption des bétons           | 38 |
| <b>III.7</b> | les résultats de la valeur de la variation de masse des bétons | 39 |
| <b>III.8</b> | les résultats des pourcentages des pores des bétons            | 40 |

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| <b>III.9</b>  | Corrélation entre la résistance à la traction et la vitesse d'impulsion ultrasonique à 90jours | 41  |
| <b>III.10</b> | Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique        | 42  |
| <b>III.11</b> | Corrélation entre la résistance à la compression + à la traction et les porosités des bétons   | 43  |
| <b>III.12</b> | Corrélation entre l'affaissement et la densité   | 43  |
| <b>III.13</b> | Corrélation entre la porosité et le coefficient d'absorption                                   | 44  |
| <b>A.1</b>    | les courbes référentielles des granulats   | I   |
| <b>A.2</b>    | les résultats de coefficient d'absorption des bétons aux 7 et 14 jours                         | II  |
| <b>A.3</b>    | les résultats de la valeur de la variation de masse des bétons aux 7 et 14 jours               | III |

## LISTE DES TABLEAUX

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| <b>II.1</b> | Propriétés physico-mécanique de granulats utilisés              | 23 |
| <b>II.2</b> | la masse volumique du béton avec différent pourcentage de verre | 26 |
| <b>A.1</b>  | les différentes proportions des matériaux utilisés              | I  |
| <b>A.2</b>  | la module de finesse des mélanges de sable                      | II |

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Introduction générale

L'avantage de l'utilisation des déchets de verre comme substitut des granulats naturels dans le béton offre une solution environnementale prometteuse au problème croissant d'une gestion efficace des déchets de verre dans les pays en développement. Le verre est un matériau indispensable à l'homme et l'un des plus anciens matériaux fabriqués par l'homme sur terre. En raison de ses propriétés, le verre peut prendre de nombreuses formes, notamment le verre plat, le verre à bulbe, le verre pour récipient ou en bouteille et le verre à tube cathodique (en plus d'être produit dans de nombreuses couleurs). Cependant, le verre a une durée de vie limitée dans les formes sous lesquelles il est produit [1]. De plus, sur la base des compositions chimiques, le verre peut être classé en différentes catégories, le type de verre le plus utilisé et le plus facilement disponible étant le verre sodo-calcique [2, 3].

Ces dernières années, la quantité de déchets de verre produits a augmenté progressivement en raison de l'utilisation croissante des produits verriers. Cela a conduit à d'immenses déchets de verre déversés dans des décharges ou des déchetteries [4]. De plus, l'Environmental Protection Agency des États-Unis (US EPA) a déclaré que 11,5 millions de tonnes de déchets de verre sont produites chaque année aux États-Unis [5]. D'où la nécessité de réutiliser ou de recycler les déchets de verre afin de prévenir les nuisances environnementales causées par le stockage ou le déversement des déchets de verre dans les décharges ou déchetteries. Contrairement aux autres déchets solides, le verre est considéré comme un matériau non biodégradable et constitue donc une menace pour l'environnement par une élimination sans discrimination.

Le verre est théoriquement un matériau 100% recyclable, ce qui signifie que les déchets de verre peuvent être recyclés à l'infini sous forme de calcin dans la production de verre sans aucune perte de pureté et de qualité. Cependant, [6] ont rapporté qu'en comparant le recyclage du verre avec ceux d'autres déchets solides, le recyclage du verre se fait moins dans les pays en développement. En outre, une étude réalisée par [7] a déclaré que, bien que des efforts croissants aient été déployés ces derniers temps pour recycler les déchets de verre, plus de 50% des déchets de verre collectés dans certaines parties du monde sont toujours éliminés dans des décharges. Aux États-Unis, par exemple, 11 480 milliers de tonnes de déchets de verre ont été générées en 2014 et seulement 26% ont été recyclées, le reste étant mis en décharge [5]. Certains des défis qui limitent son recyclage comprennent le mélange à la source de verres de couleurs différentes.

En outre, d'autres défis incluent le coût opérationnel et l'élimination des contaminants et des résidus du flux de verre usagé.

Les déchets de verre offrent des options alternatives égales en tant que matériau de remplacement pour les granulats conventionnels dans le béton et l'incorporation de déchets de verre granulaire concassé comme agrégats dans le béton profite non seulement à l'environnement mais réduit également le besoin d'extraire les matières premières. Plusieurs recherches ont été menées sur le recyclage et la réutilisation des déchets de verre comme substitut à l'utilisation d'agrégats naturels dans le béton.

Une étude de [8] a observé que la poudre de verre pouvait être utilisée comme substitut des granulats ou du ciment dans le béton jusqu'à 30% sans aucun effet négatif à long terme sur le béton. D'autres travaux ont fait le pourcentage de remplacement et la dimension du verre. Alors que ces pourcentages variaient entre 0% et 75% pour le sable et 0% à 50% pour le ciment.

Notre contribution vise principalement l'influence de la substitution de sable par les déchets de verre sur les propriétés : du béton frais, de la résistance mécanique, de la durabilité. De ce fait, la présente thèse a pour titre : Résistance et microstructure d'un éco-béton produit à partir de déchets de verre comme substitut partiel du sable

Pour cela cette thèse s'articule en trois chapitres

Le premier chapitre est divisé en trois volets, le premier volet aborde le béton et le sable d'une façon générale. Le deuxième volet identifie d'abord le verre en générale. Puis, les déchets de verre. Après, l'utilisation de verre dans le domaine du génie civil, et en dernier volet de ce chapitre, Les méthodes d'utilisation de verre dans le béton et Les études précédentes.

Le deuxième chapitre expose les différentes caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés, ainsi que les différents essais exécutés durant cette longue période d'investigation. Ces essais fournissent des connaissances sur l'état du béton frais et durci.

Le troisième chapitre est consacré d'abord à la formulation du béton. Ensuite, résultats et discussion. Enfin Les corrélations.

Cette campagne d'évaluation a été achevée par une conclusion générale et des perspectives qui peuvent prendre en compte à la suite de ce propre travail.

# CHAPITRE I :

# SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 Introduction

La plupart des pays en développement du monde sont confrontés à d'énormes problèmes de gestion de leurs déchets solides. L'élimination des déchets solides se pratique principalement par le déversement de déchets sur des sites ouverts (décharges) et l'incinération sans aucune forme de contrôle ou de restriction. Ces pratiques affectent l'environnement en polluant l'eau, l'air et la terre avec une grande répercussion sur la santé de la société. Par conséquent, l'accent est mis sur la création d'un processus durable qui pourrait entraîner une réduction de la production de déchets solides par le recyclage et la réutilisation des déchets. Selon, la réutilisation des déchets dans l'industrie de la construction est parmi les options les plus intéressantes pour utiliser les déchets car une quantité importante de ces déchets peut être consommée par l'industrie du béton sans exiger des conditions de qualité très élevées. Des recherches sont en cours sur de nouvelles façons innovantes de produire du béton durable et respectueux de l'environnement à partir de déchets en dehors des ressources naturelles traditionnelles qui ne sont pas considérées comme écologiquement durables dans un avenir proche. On estime que la production annuelle de béton consomme environ 1,5 milliard de tonnes de ciment, 9 milliards de tonnes d'agrégats et 1 milliard de tonnes d'eau pour le malaxage [9]. Cela a un impact énorme sur l'environnement en raison de l'épuisement des ressources naturelles, de la consommation intensive d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre [10]. En outre, la demande de béton devant augmenter d'ici à 2050 pour atteindre environ 18 milliards de tonnes en raison de l'augmentation des activités de construction, on peut en déduire que le béton aurait une grande importance dans un avenir proche [11]. Encore une fois, on craint de plus en plus que les considérations environnementales soient primordiales dans le choix des matériaux de construction. Ces derniers temps, des chercheurs ont investi des efforts pour étudier les propriétés des déchets de verre en tant que substitut des agrégats dans le béton. Le verre est un matériau amorphe et non biodégradable et un problème majeur pour l'exploitation des décharges. Des études ont étudié l'effet sur le développement de la résistance du béton contenant du granulats de verre concassé en remplacement partiel du granulats naturel.

### I.2 le béton et le sable

#### Généralité sur le béton

Le mot béton veut dire durcir. Il est introduit en 1753 dans la langue française et désigne un matériau composite utilisé largement dans le monde de la construction [12].

Il est constitué par de matériaux granulaires (sables, graviers) enrobés par un liant hydraulique comme par exemple le ciment ou le bitume. Nous traitons ici uniquement des bétons de ciment portland à base de calcaire. Le matériau béton se fabrique donc à partir d'éléments chimiquement actifs (ciments, additifs, adjuvants, eau) et d'éléments mécaniques (sables, gravillons, air) [13].

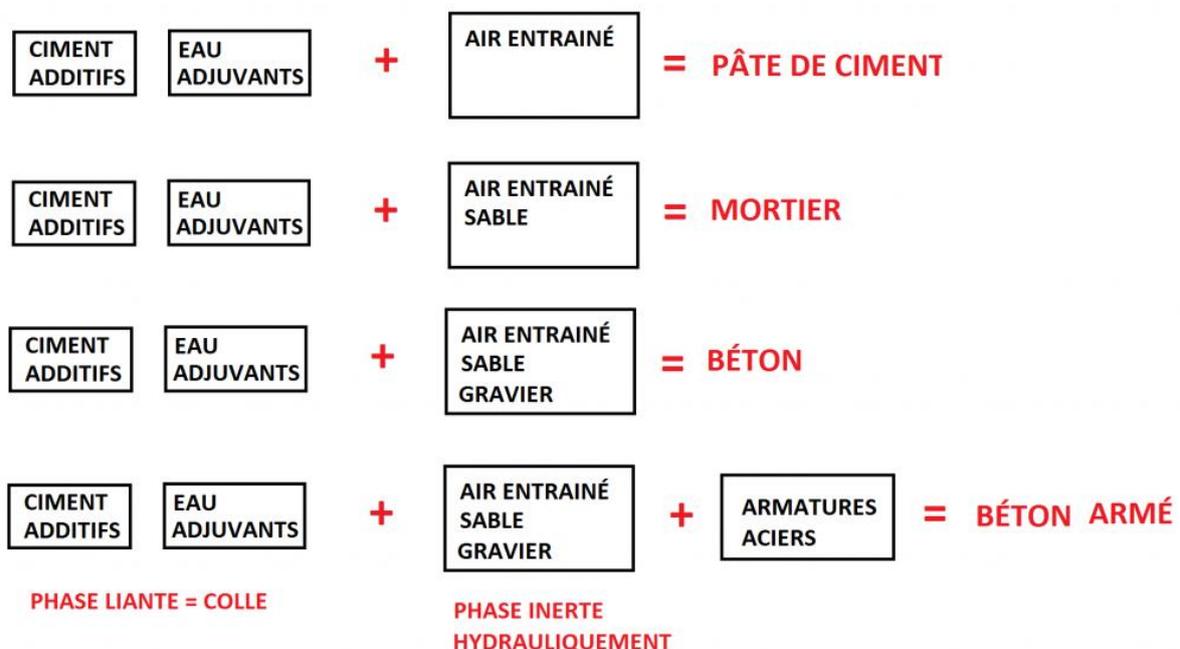
Le béton typique standard à une masse volumique variant de 2000 kg / m<sup>3</sup> à 2600 kg / m<sup>3</sup> pour une résistance variant de 15 à 80 MPA.

### Exigences des concepteurs

Le béton est utilisé comme matériaux de structure (béton armé ou précontraint) ou de remplissage (génie civil) et même comme élément décoratif (parements, mobilier). A ce titre les normes établissent les différents critères de qualités minimums requis. Les exigences sont :

- De structure (Résistance a 28 jours et a cours terme)
- De durabilité (Retrait / Fissuration / Respect de l'environnement)
- D'esthétique (Teinte / Bullage)

### Les constituants du béton



### Les différentes classes de béton

- Bétons ordinaires : (BO) Entre 20 et 50 MPA

- Bétons Haute performance : (BHP) Entre 50 et 100 MPA
- Bétons à ultra haute performance (BFUHP) 150 MPA
- Bétons expérimentaux 600 Mpa

### Les différents types de béton

- Béton a prise lente (avec retardateur de prise)
- Béton a prise rapide (avec accélérateurs de prise)
- Béton auto plaçant (avec fluidifiant)
- Bétons avec entraîneurs d'air

### I.2.3 Le sable

#### I.1.2.3.1 Définition :

Le sable, dans le domaine de la construction, avant d'être un matériau qu'on prend à la pelle ou à la truelle, fait l'objet de description et de prescriptions normatives. Pour la confection de mortiers, bétons et enduits, le sable est un granulat, qui doit être conforme à la norme NF EN 12620+A1 de juin 2008. Pour cette norme, le sable est une désignation des classes granulaires pour lesquelles D (dimension maximum) est inférieur ou égal à 4 mm. Le sable peut résulter de l'altération naturelle de roches massives ou meubles et/ou de leur concassage ou du traitement des granulats.

#### I.1.2.3.2 les types de sables

Le sable est avant tout un matériau naturel, issu du quartz ou du silex, largement utilisé dans le domaine de la construction. Le sable est constitué de grains plus ou moins fins, dont la dimension varie de 0,15 mm à 4,76 mm. En fonction de la taille des grains, on parle de sable fin, de gros sable ou de sable graveleux. Il existe ainsi différents types de sables, qui auront différentes utilisations en construction [14].

#### A. Sables naturels

- **Sable des rivières** : ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

- **Sable de carrière** : extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière.
- **Sable de mer** : qui provient de roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences.
- **Sable de feuilles** : est un sable fin, comportant de nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux.

### **B. Sables artificiels**

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé.

### **L'influence de manque de sable sur l'environnement**

Juste après l'eau, le sable est la seconde ressource minérale exploitée par l'homme. Il entre notamment dans la composition du béton, son premier consommateur. L'impact environnemental est majeur.

Inévitablement associé dans la conscience collective aux plages de nos vacances, le sable fait pourtant l'objet de convoitises bien au-delà du tourisme. Juste après l'eau, il constitue la seconde ressource minérale exploitée par l'homme !

Résultat de l'altération d'une roche mère par des agents le plus souvent météoriques – l'eau, le vent, l'action des cycles de gel et dégel – sa nature dépend donc de sa source : il existe autant de sables différents que de roches sur la planète ! Trois critères relatifs à ses grains permettent de le caractériser : la nature (minérale ou organique), la forme (morphoscopie) et les dimensions (granulométrie). Ces deux dernières dépendent de la durée du transport et de ses agents de transport : le vent et l'eau, laquelle peut être pluviale, fluviale ou marine.

Omniprésent dans notre quotidien même si nous l'ignorons, le sable entre notamment dans la composition du béton, son premier consommateur. Or l'exploitation et l'utilisation de cette ressource ne sont pas sans conséquences environnementales, économiques, sociales et culturelles.

### **I.3 le verre**

#### **Généralité sur le verre**

Le verre est un des plus anciens matériaux de l'humanité, on peut le trouver à l'état naturel dans certaines roches d'origine volcanique ou météorique. Sa fabrication par l'homme remonte à la plus haute antiquité, la date de naissance du verre n'est pas facile à fixer avec précision, car elle varie avec le degré de sévérité adopté pour définir le verre, d'après MOREY. Les plus anciennes pâtes vitreuses étaient connues depuis environ 1200 ans avant Jésus-Christ, le verre pur date de 7000 ans avant Jésus-Christ. Les verres ont été trouvés en Egypte et ils ont été probablement ramenés d'Asie [15].

A l'occident, la fabrication du verre était dispersée sur des sites isolés après la chute de l'empire romain, mais elle était connue à Byzance et plus tard au moyen orient par les arabes. En l'année 1300, Venise devenait le lieu de la naissance de l'industrie du verre en Europe, le progrès dans les techniques du verre et ses applications par la suite était rapide [15].

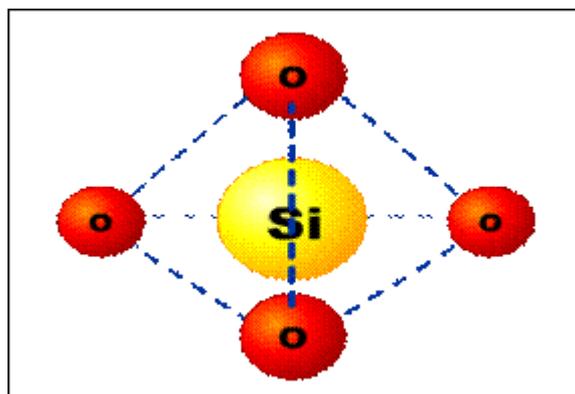
Le début de l'industrie artisanale du verre qui correspondait à l'utilisation de soufflage se situe au début de notre 15<sup>ème</sup> siècle. Au 17<sup>ème</sup> siècle avec le développement des connaissances dans le domaine de l'optique, sont apparus les premiers instruments d'observations utilisant le verre (lunette télescope ...). L'industrie verrière pour la fabrication de bouteilles et de verres à vitres a commencée aux Etats Unis au début du 18<sup>ème</sup> siècle. En 1879, Monsieur Thomas Edison a inventé l'ampoule incandescente qui a changé les vies des millions de personnes tout autour du monde. C'est une application typique qui n'est possible sans l'utilisation de verre qui lui seul satisfait les propriétés nécessaires pour le fonctionnement : dureté, transparence, tenir le vide et résister aux températures élevées en même temps. Avec le progrès technologique, le champ d'application du verre n'a cessé de s'étendre surtout dans l'optique pour la fabrication des composants optiques tels que : les lentilles, les prismes, miroirs...etc. Son large spectre d'utilisation, la rendue indispensable dans des applications fines de haute précision. Pour cette raison il a été classé comme « matériau noble » par la communication scientifique [15].

## Définition du verre

Le verre est défini comme étant une substance dure homogène, généralement transparente, amorphe, isotrope, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion. Il est facile à modeler, peut prendre de nombreuses formes.

## Structure du verre

Dans tout solide, il existe entre les éléments constituant un certain arrangement qui détermine sa structure. Il en est ainsi pour le verre, les éléments constitutifs du verre de silice sont les tétraèdres  $\text{SiO}_4$  qui sont assemblés par les sommets par des ions  $\text{O}^{2-}$  figure (I.1). Dans le cas de la structure cristalline (quartz) l'angle  $\text{Si-O-Si}$  est constant et égale à  $140^\circ$ , alors qu'il peut varier dans le cas de silice vitreuse autour d'une valeur moyenne de  $145^\circ$ . Cela suffit pour que le réseau de silice vitreuse soit désordonné



**Figure. I.1 :** Représentation schématique de la structure du verre de silice.

## Le déchet

Un déchet est un objet en fin de vie ou une substance ayant subi une altération physique ou chimique, qui ne présente alors plus d'utilité ou est destiné à l'élimination.

## Les déchets de verre

Les déchets de verre non dangereux, ne présentant pas de risque chimique, toxique ou infectieux doivent donc suivre la filière normale de traitement du verre, via une collecte séparée.

## **Le verre en génie civil**

Le verre est employé couramment dans beaucoup de secteurs par les produits manufacturés tels que le verre à vitres, les bouteilles, la verrerie, et la tuyauterie de vide. Toutes expériences et essais avec le verre ont prouvé que c'est un matériel idéal pour la réutilisation ce qui va aider à économiser d'énergie. Une de ses contributions significatives est au champ de construction et génie civil où le verre a été réutilisé pour la production du béton.

### **I.4 Avantages économique et techniques « du béton de verre**

Beaucoup de recherches et d'études ont prouvé que le verre peut efficacement être employé comme un remplacement de granulats fins sans changement substantiel de force ce qui nous donne une bonne option en cours d'avoir le béton vert. L'incorporation du verre dans le secteur de construction est très avantageuse et utile.

#### **I.4.1 Les avantages techniques**

- Ce type de béton léger fournit de faible densité ce qui réduit les charges dans les constructions, en plus la bonne conductivité thermique est l'une des caractéristiques qui aide à avoir des éléments d'enveloppe de bâtiment et d'isolation thermique efficace et durable.
- Le béton léger fait à partir des granulats de verre faits en incorporant ces granulats dans la matrice cimentaire possède un niveau d'absorption d'eau fondamentalement nulle. Ce type de béton est considéré l'un des matériaux les plus durables et avec l'emphase courante sur la longévité du béton à rendement élevé, il est seulement normal de compter sur ces ingrédients extrêmement durables.
- Pour un certain nombre de raisons, les granulats en verre améliorent les propriétés d'écoulement du béton frais de sorte que des résistances très hautes puissent être obtenues même sans utilisation des super plastifiants.
- L'excellente dureté du verre donne le béton une résistance d'abrasion qui peut être atteinte seulement avec peu d'agrégats en pierre normaux ou avec l'addition des fines métalliques.

### **I.4.2 Avantages économiques**

- L'application de ce type de béton dans la construction réduit les coûts du bâtiment, décharge la construction et contribue de façon considérable dans le processus d'incorporer des matériaux de construction verts dans des projets de génie civil.
- La quantité de verre de rebut a graduellement augmentée au cours des années dues à une utilisation toujours croissante des produits de verre. La plupart des verres de rebut ont été vidés dans les emplacements de remblayage qui sont indésirables parce qu'ils ne sont pas biodégradables. En raison de ceci il y a un potentiel énorme pour l'usage du verre de rebut dans le secteur de construction.
- Le potentiel esthétique du verre offre de nombreuses nouvelles applications avec une grande amélioration au niveau du parement.
- L'utilisation du verre en béton ouvre un vaste marché afin de produire une variété de produits de spécialité ou dans des opérations de construction et de bétonnage locales.

## **I.4 Le verre dans le béton**

### **I.4.1 Les méthodes d'utilisation de verre dans le béton**

On peut utiliser le verre dans le béton sous des formes suivantes :

- a. Poudre : généralement utilisé comme substitution du ciment.
- b. Granulats : utilisé pour remplacer complètement ou partiellement de sable ou gravier (agrégats).
- c. Fibre : utilisé comme renfort.

### **I.4.2 Les études précédentes**

D'après des recherches, on a conclu les notes suivantes :

(Oluwarotimi M) [16] a indiqué que les déchets de verre recyclé ont été dosés en niveaux de 25, 50, 75 et 100% en poids pour remplacer le sable dans le béton en utilisant un rapport de mélange de 1 : 2 : 4 (ciment : sable : gravier) à un rapport E / C de 0,5 ciblant une force de 20 MPa à 28 jours. Des tests, qui incluent la fluorescence X (XRF), ont été effectués sur les déchets de verre et de ciment ; un essai d'affaissement a été effectué sur le béton fraîchement préparé à différents pourcentages de teneur en verre. Des essais de résistance à la compression et à la traction ont été effectués sur 60 échantillons après 3, 7, 28 et 90 jours de durcissement. La microstructure du béton a été examinée au microscope électronique à balayage (MEB). Les

résultats ont montré que l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton produit diminuaient avec l'augmentation de la teneur en verre usé. Cependant, le béton contenant 25% et 50% de déchets de verre a montré une amélioration significative de la résistance, mais il est recommandé que la teneur optimale en verre soit de 25% pour la production d'éco-béton durable.

(R. Hamid et M. A. Zubir) [17] ont constaté que les résistances à la compression des échantillons de béton avec du verre recyclé sont supérieures à celles des échantillons témoins à tous les âges de 7, 28, 56 et 90 jours. À 60 jours, le gain de résistance des échantillons de témoins ne montre aucun incrément significatif, mais les deux échantillons qui incluent du verre recyclé présentent toujours un incrément significatif de résistance. On constate que le verre recyclé donne de meilleurs résultats lorsqu'il est utilisé à une taille de 300 microns et moins. La force enregistrée du témoin, échantillon 2 et 3 à 90 jours est de 47, 61 et 55 MPa.

(M. Adaway et Y. Wang) [18] ont constaté que ce projet visait à déterminer le niveau de remplacement du verre résultant en une résistance optimale à la compression. Trois échantillons de béton ont été testés à 7 et 28 jours, pour des proportions de remplacement du verre de 15, 20, 25, 30 et 40%. La résistance à la compression s'est avérée augmenter jusqu'à un niveau de 30%, moment auquel la résistance développée était de 9% et 6% supérieure à celle du témoin après 7 et 28 jours respectivement. Cela démontre que le béton contenant jusqu'à 30% d'agrégats de verre fin présente un développement de résistance à la compression plus élevé que le béton traditionnel.

(Ali Mardani) [19] a constaté que la réduction maximale de la résistance a été observée dans les échantillons contenant 60% d'agrégats de verre recyclés. De plus, l'augmentation de la teneur en granulats de béton recyclé a entraîné une diminution de la valeur UPV et une augmentation de l'absorption d'eau, de la profondeur de pénétration de l'eau sous pression, de la pénétration des ions chlorure et de la sorptivité de l'eau du mélange de béton. Cependant, dans le mélange contenant des agrégats de verre recyclé, la valeur UPV a augmenté et les propriétés de transport ont été améliorées avec l'augmentation de la teneur en agrégats de verre recyclé.

(Zainab Z. Ismail & Enas A. AL-Hashmi) [20] ont constaté que les résultats ont prouvé 80% d'activité de résistance pouzzolanique donnée par les déchets de verre après 28 jours. La résistance à la flexion et la résistance à la compression des échantillons contenant 20% de verre usé étaient respectivement de 10,99% et 4,23% supérieures à celles de l'échantillon témoin à 28

jours. Les tests des barres de mortier ont démontré que les déchets de verre finement broyés ont contribué à réduire l'expansion de 66% par rapport au mélange témoin.

(M. Mageswari & B.Vidivelli) [21] ont constaté que le sable naturel a été partiellement remplacé (10%, 20%, 30%, 40% et 50%) par SGP. La résistance à la compression, la résistance à la traction (cubes et cylindres) et la résistance à la flexion jusqu'à 180 jours d'âge ont été comparées à celles du béton fabriqué avec des granulats fins naturels. Le module de finesse, la gravité spécifique, la teneur en humidité, l'absorption d'eau, la densité apparente, le% de vides, le% de porosité (lâche et compact) pour le sable (S) et le SDA ont également été étudiés. Les résultats des tests indiquent qu'il est possible de fabriquer du béton contenant de la poudre de verre en feuille (SGP) avec des caractéristiques similaires à celles du béton de granulats de sable naturel à condition que le pourcentage de SGP sous forme de granulats fins soit limité à 10-20%, respectivement.

(Mahmoud Nili) [22] a indiqué que le recyclage est la meilleure solution à la crise résultant des énormes volumes de déchets et comporte des avantages économiques et environnementaux. Dans le présent travail, des déchets de verre (WG) ont été utilisés pour remplacer partiellement les granulats fins jusqu'à 0, 10, 20 et 30%, tandis que les granulats de béton recyclé ont été utilisés comme remplacement pour les granulats grossiers à 0%, 20%, 35% et 50% (en poids d'agrégat grossier). Les résultats montrent que la présence de RCA et de WG dans les mélanges de béton a amélioré la résistance à la compression et la résistance électrique des échantillons. En outre, une réduction de la capacité d'absorption d'eau des échantillons RCA-WG a été atteinte.

(W.K. Kupolati, W.T. Mbadie) [23] ont constaté que le recyclage et la réutilisation des déchets restent une option majeure pour la réduction des déchets, préservant les ressources naturelles de l'épuisement et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre contribuant ainsi à un environnement vert durable. Dans cette étude, l'accent a été mis sur la réutilisation des déchets de verre sodocalcique broyés en granulats grossiers comme substitut du granulats naturels grossiers dans le béton normal. Les variables de cette étude sont des agrégats grossiers tandis que le rapport ciment, sable et eau-ciment est resté constant. Le verre broyé a varié de 0 à 100% pour 25% en poids pour remplacer l'agrégat grossier dans le mélange de béton. Des mélanges de béton ont été préparés en utilisant une proportion de mélange de 1 : 2 : 4 (ciment : sable : granit) à un rapport eau-ciment de 0,5 visant une résistance nominale de 20 MPa. Des essais d'affaissement ont été effectués sur des mélanges de béton frais et des essais ont également été effectués sur un nombre total de 60 éprouvettes de cube en béton de taille 150 x 150 x 150 mm

et 60 éprouvettes de cylindre en béton de dimension 100 mm de diamètre sur 200 mm de hauteur après 3, 7, 28 et 90 jours de durcissement. Les résultats des tests d'affaissement montrent une diminution de l'ouvrabilité du béton à mesure que la teneur en verre augmente. Les résultats des tests ont également indiqué que la résistance à la compression et à la rupture du béton durci diminue avec l'augmentation de la teneur en verre usé par rapport au témoin. Cependant, le mélange de béton composé de 25% de déchets de verre se compare bien au contrôle et peut être adopté de manière appropriée pour la production de béton normal.

### **I.5 Conclusion**

Ce chapitre est un aperçu général de verre et ses utilisations ainsi que les valorisations de verre dans le domaine du génie civil, passant par le béton et le sable. Ensuite, nous avons parlé du verre puis du verre dans le béton, enfin nous avons terminé ce chapitre par les études précédentes.

CHAPITRE II :  
MATERIAUX, MATERIELS ET  
ESSAIS

## II.1 Introduction

L'objectif principal de cette partie est d'exposer un premier temps les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et microstructurale des matériaux utilisés au cours de ce travail. De plus, dans un deuxième temps, nous expliquons les essais normalisés et les méthodes à suivre pour atteindre notre but, qui est l'effet engendré par le remplacement de sable avec des pourcentages de verre sur la résistance, la durabilité et la microstructure du béton.

## II.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette expérimentation sont : les granulats (le sable, le verre, les graviers), le ciment, et l'eau.

### II.2.1.1 Granulats

#### **Le sable :**

Le sable utilisé dans notre travail expérimental est le sable de « Djamaa ».

#### **Les graviers :**

Deux types de gravier ont été utilisés au cours de cette expérimentation, le premier est un gravier 3/8, et le deuxième est un gravier 8/15.

Le gravier utilisé dans notre travail expérimental est le gravier de « Ain Touta ».

#### **Les agrégats de verre :**

Les agrégats de verre est un déchet (ou un verre volontairement broyé) qui a au cours des âges connu divers usages.

Les agrégats de verre utilisé dans notre travail sont de couleur transparent et de diamètre < 315 mm proches de ceux du sable.



Figure.II.1 :Sable de Djamaa



Figure.II.2 :Gravier 3/8



Figure.II.3 :Gravier 8/15



Figure. II.4 : Les agrégats de verre

### II.2.1.2 Essais sur les granulats :

#### II.2.1 Equivalent De Sable (NF P 18 598) :

##### II.2.1.1. But de 'essai :

L'essai de l'équivalent de sable est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables.

Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le granulat des éléments sableux plus grossier. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté.

#### II.2.1.1 Mode opératoire d'essai :

L'essai se déroule sur un échantillon (sable) qui a été passé au tamis afin d'obtenir une fraction de 0-2mm.

- ❖ L'éprouvette est remplie d'une solution floculante normalisée
- ❖ Puis, on verse environ 120 g du matériau sec
- ❖ Après un petit intervalle d'attente, le mélange est soumis à 90 cycles de 20 cm d'amplitude en 30 secondes (norme).
- ❖ Vu qu'on ne dispose pas de l'appareillage nécessaire, l'agitation est entamée manuellement. On laisse la solution se décanter. Le sable vrai se dépose dans le fond de la burette jus- qu'à un niveau h2. Au-dessus du sable, se dépose le floccula gonflé par la solution. On distingue un deuxième niveau h1 qui sépare le liquide contenant le flocculat du liquide transparent de solution lavante décanter.

On calcule par la suite l'équivalent de sable :

$$ES = \frac{H1}{H2} * 100$$

#### II.2.2. La Masse Volumique (NF P18-301) :

La masse volumique absolue et apparente permet le passage de la masse au volume des différentes classes granulaires, elle est souvent très nécessaire.

##### II.2.2.1. La masse volumique absolue :

###### Définition :

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

###### Mode opératoire d'essai :

Mettre dans une éprouvette un volume V1 d'eau.

Lire de nouveau le volume V2.

Le volume absolu est  $V = V2 - V1$

MV abs : Masse volumique absolue.

MS : Masse des grains solides.

V1 : volume de l'eau.

V2 : volume total (grains solides+ eau).

#### **II.2.2.2. La Masse Volumique Apparente (NFP 94-064) :**

##### **Définition :**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

##### **Mode opératoire de l'essai :**

Prendre l'échantillon dans les deux mains. Verser l'échantillon toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône, raser à la règle et peser le contenu.

Calculer la masse volumique apparente à partir de la formule suivante :

Avec :

M0 : La masse du récipient de mesure vide.

MT : La masse du récipient avec l'échantillon.

V : le volume du récipient de mesure.

#### **II.2.3. Analyse Granulométrique Par Tamisage (NFP 18-560) :**

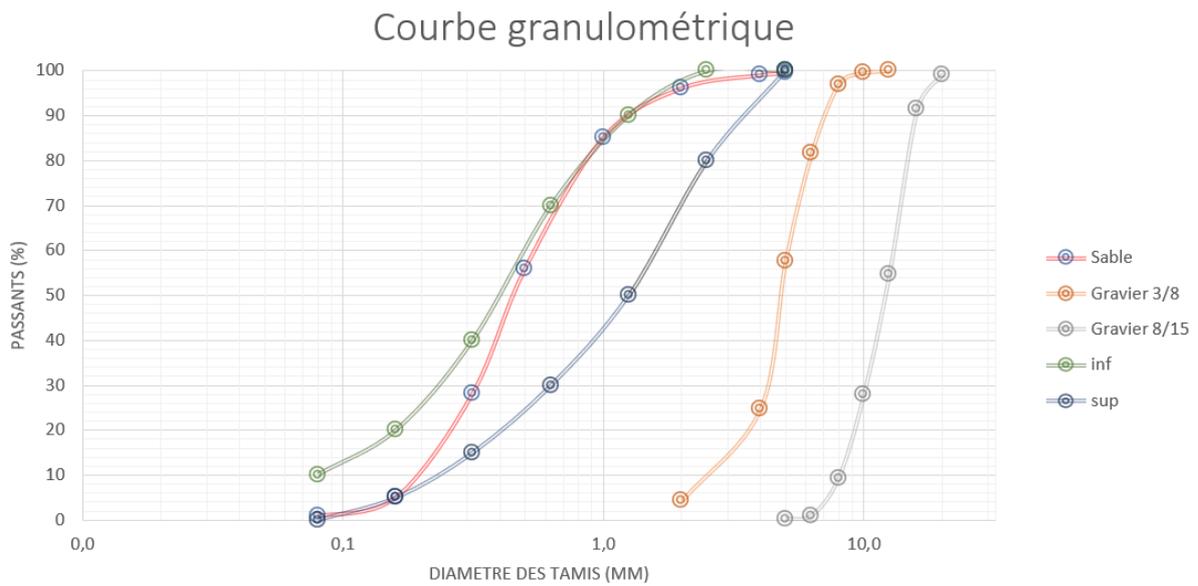
L'analyse Granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite la Courbe Granulométrique, courbe exprimant les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.

**\*Module De Finesse :**

C'est un module qui nous permet de caractériser la finesse des différents types de sable par la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis de série suivant : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 (mm).

\* Il convient également de noter que le sable présente une distribution de taille de particules continue allant de 0,08 à 5 mm avec une fraction de grains inférieure à 0,08 mm est environ de 1% (figure II.5).

\*Aussi il convient également de noter que le sable mélangé avec chacun des pourcentages de verre (10%,20%,30% et 40%) présente environs la même courbe avec le sable mais avec une très petite augmentation des fines (figure II.6, 7, 8 et 9).



**Figure II.5 :** Analyse granulométrique des granulats étudiés

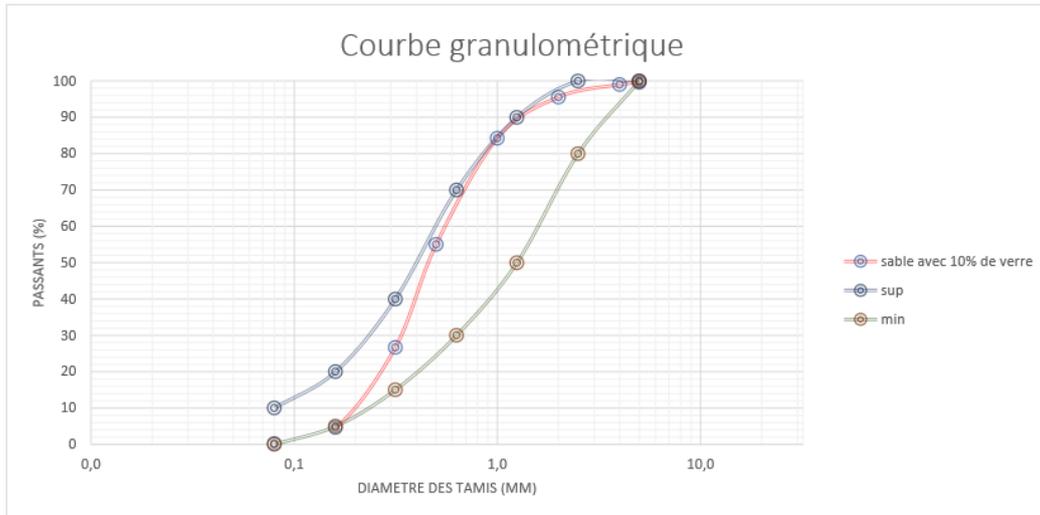


Figure II.6 : Analyse granulométrique de sable avec 10% de verre

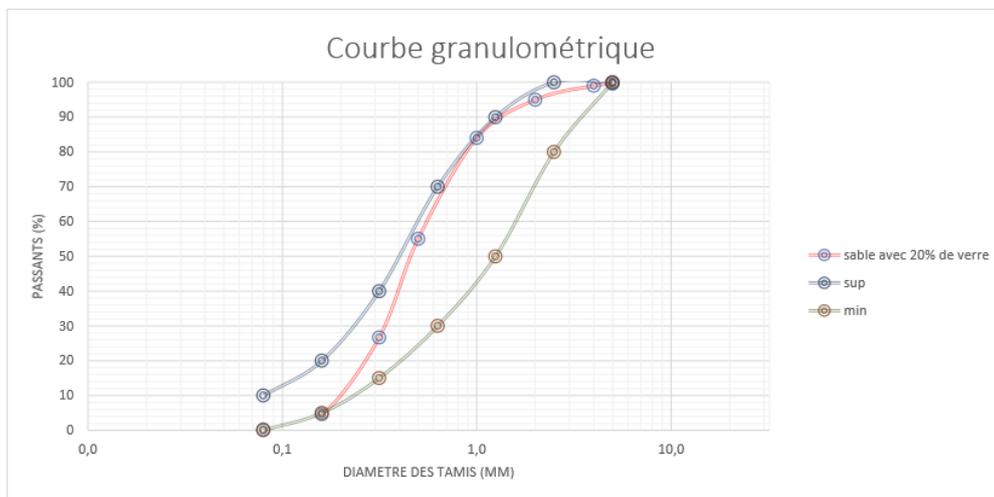


Figure II.7 : Analyse granulométrique de sable avec 20% de verre

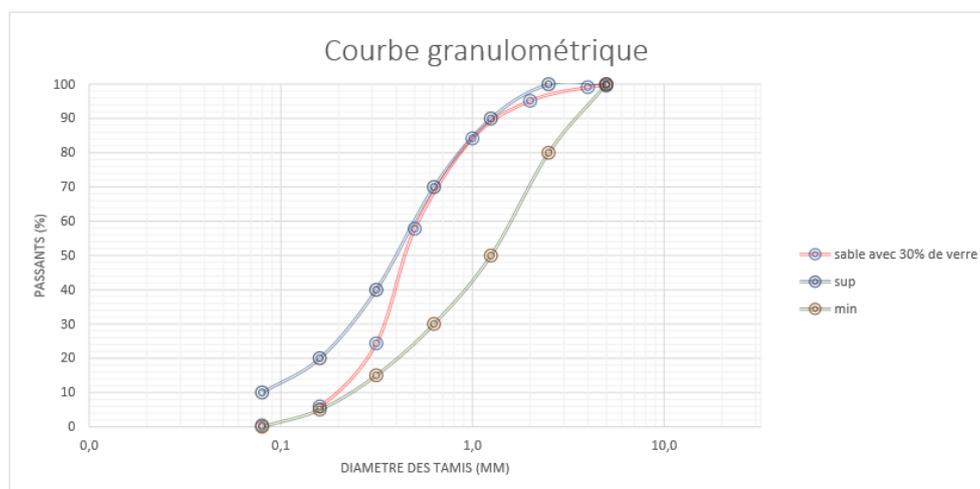
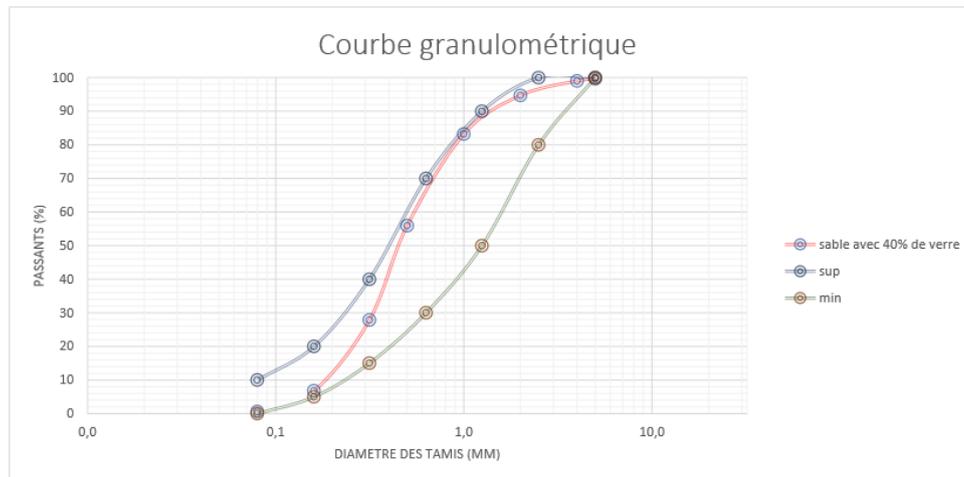


Figure II.8 : Analyse granulométrique de sable avec 30% de verre



**Figure II.9 :** Analyse granulométrique de sable avec 40% de verre

#### II.2.4. Essai au Bleu de Méthylène NF P 18- 592 :

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

La valeur de bleu du sol est donnée par :

$$VBS = \frac{B}{Ms} \times C \times 100$$

B : masse de bleu introduire (solution à 10 g/l).

Ms : masse sèche de la prise d'essai.

C : proportion du 0/5 mm (soumis à l'essai) dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.



**Figure.II.10 :** Appareillage pour essai au bleu

### **II.2.5. Propreté superficielle NF P 18-591 :**

#### **Définition et But de l'essai :**

Les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons. Contrairement aux sables, les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. Ainsi, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage.

#### **Mode opératoire :**

- ❖ Peser un kg de gravier soit  $M_0$  et le placer dans le tamis,
- ❖ Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis soit claire, Matériel utilisé. Tamis de maille 0.5 mm et un sceau d'eau.
- ❖ Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit  $M_1$ .
- ❖ Calculer la propreté :

$$P (\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} * 100$$

### **II.2.6. Le coefficient d'absorption NF P 18-555 :**

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF P 18-555.

### **II.2.7. Teneur en eau NF P 18-555 :**

La norme définit les masses volumiques réelle et réelle imbibée, le coefficient d'absorption, la teneur en eau. L'exécution de l'essai consiste en un certain nombre de pesées de l'échantillon dans diverses conditions d'humidités. ... Cette norme remplace la norme NF P 18-555.

### **II.2.8. Coefficient d'aplatissement NF P 18-561 :**

Norme expérimentale publiée par l'AFNOR, remplace la norme NF P 18-561 d'octobre 1978 (DIRR 108514). La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50mm.

### **II.2.9. Los Angeles NF P 18-573 :**

#### **Définition et But de l'essai :**

Ce mode opératoire est issu de l'essai américain défini par la norme ASTM C.131.55

L'essai (N.F. P18.573) permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

- Propriétés physico-mécaniques de granulats utilisés sont afficher dans le tableau (II.1)

| <b>Caractéristiques physico-mécanique</b>      | <b>Sable</b> | <b>Verre</b> | <b>Gravier 3/8</b> | <b>Gravier 8/16</b> | <b>Normes</b>      |
|--|--------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )   | <b>2.50</b>  | <b>2.44</b>  | <b>2.60</b>        | <b>2.63</b>         | NF P 18-554<br>555 |
| Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | <b>1.59</b>  | /            | <b>1.35</b>        | <b>1.34</b>         | NF P 18-554<br>555 |
| Module de finesse                              | <b>1.88</b>  | /            | /                  | /                   | NF P 18-540        |
| Propreté superficielle                         | /            | /            | <b>99.11</b>       | <b>99.85</b>        | NF P 18-591        |
| Equivalent du sable (visuel)                   | <b>78.32</b> | /            | /                  | /                   | NF P 18-598        |
| Equivalent du sable (piston)                   | <b>81</b>    | /            | /                  | /                   | NF P 18-598        |
| Coefficient d'absorption (%)                   | /            | /            | <b>2.85</b>        | <b>1.25</b>         | NF P 18-554<br>555 |
| Coefficient d'aplatissement (%)                | /            | /            | <b>13</b>          | <b>17</b>           | NF P 18-561        |
| Teneur en eau (%)                              | <b>0.45</b>  | /            | <b>0.3</b>         | <b>0.1</b>          | NF p 18-555        |
| Essai au bleu de Méthylène                     | <b>1.8</b>   | /            | /                  | /                   | NF P 18- 592       |
| Los Angeles                                    | /            | /            | <b>15.32</b>       | <b>24.22</b>        | NF P 18-573        |

**Tableau II.1** : Propriétés physico-mécanique de granulats utilisés

**D'après le tableau :**

La masse volumique (absolue et apparente) de tous les agrégats est acceptables pour faire un béton dans la norme.

Le module de finesse de sable est dans le domaine du sable est à majorité de grains fins.

Coefficient d'aplatissement de graviers utilisés est dans le domaine bien à moyen et los Angeles aussi.

Equivalent du sable utilisé est donne un sable très propre.

## II.2.2 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, il se présente sous l’aspect d’une poudre très fine, qui mélangée avec de l’eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps, il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un ou des ajout(s) minéraux actifs (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément.

Le ciment utilisé dans ce travail est “ CIMENT MATINE “ NA442 CEM II/A-L 42,5 N



Figure.II.11 : Le ciment utilisé (MATINE)

### Caractéristiques techniques :

| <i>Analyse chimique</i>                     | <i>Valeur</i> |
|---|---------------|
| <i>Perte au feu (%) (NA5042)</i>            | 8.0±2         |
| <i>Teneur en sulfates (so3) (%)</i>         | 2.5±0.5       |
| <i>Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)</i> | 1.7±0.5       |
| <i>Teneur en chlorures (NA5042) (%)</i>     | 0.02-0.05     |

| <i>Temps de prise à 20°(NA 230)</i> | <b>Valeur</b> |
|-------------------------------------|---------------|
| <i>Début de prise (min)</i>         | 150 ± 30      |
| <i>Fin de prise (min)</i>           | 230 ± 50      |

| <i>Résistance à La compression</i> | <b>Valeur</b> |
|------------------------------------|---------------|
| <i>2 jours (MPa)</i>               | ≥ 10.0        |
| <i>28 jours (MPa)</i>              | ≥ 42.5        |

| <i>Propriétés physiques</i>   | <b>Valeur</b> |
|---|---------------|
| <i>Consistance normale (%)</i>  | 26.5 ± 2.0    |
| <i>Finesse suivant la méthode de Blaine (cm<sup>2</sup>/g)(NA231)</i> | 3700 - 0      |
| <i>Retrait à 28 jours (µm/m)</i>                                      | ≥ 1000        |
| <i>Expansion (mm)</i>   | ≥ 3.0         |

| <i>Composition minéralogique du clinker</i> | <b>Valeur</b> |
|---|---------------|
| <i>C3S (%)</i>                              | 60 ± 3        |
| <i>C3A (%)</i>                              | 7.5 ± 1       |

## II.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de différents bétons est une eau potable de robinet ayant une température environ  $20 \pm 2$  °C. Sa qualité est conforme aux prescriptions de la norme P18-303.

## II.3 Essais réalisés à l'état frais

### II.3.1 Essai d'ouvrabilité au cône d'Abrams

Cet essai est réalisé suivant la recommandation de la norme EN 12350-2 (EN 12350-2,1999), Il s'agit de donner l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Le béton est introduit dans le moule en 3 couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen d'une tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage comme la montre la figure II.4.

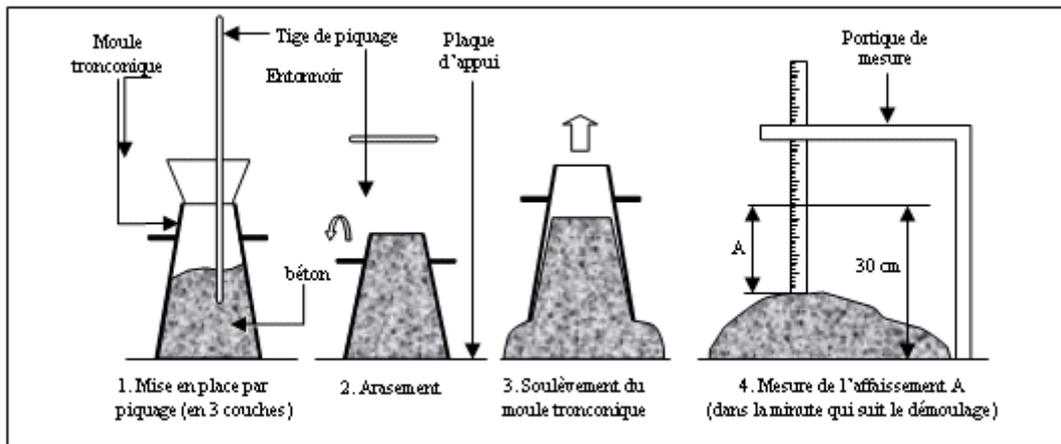


Figure II.12 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

### II.3.2 Essai de la masse volumique à l'état frais

Le béton frais est compacté à l'aide d'une barre dans un conteneur rigide et étanche de volume de 5 l et de masse connue, suivant la spécification de la norme EN12350-6 (EN 12350-6,1999). La quantité du mélange est répartie en deux couches et doit soumettre à au moins 25 coups par couche. Pour éliminer les poches d'air piégé, après le compactage de chaque couche, on a tapoté les parois du conteneur de manière intelligente avec le maillet jusqu'à ce que les grosses bulles d'air cessent d'apparaître à la surface et que les dépressions laissées par la tige ou la barre de compactage soient éliminées. Finalement la densité est calculée à partir de la formule :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{v} \quad (\text{II.1})$$

Où

$m_1$  : est la masse du conteneur, en kilogrammes ;

$m_2$  : est la masse du conteneur plus la masse de l'échantillon du béton dans le conteneur, en kilogrammes ;

$V$  : est le volume du conteneur, en mètres cubes.

| Le béton frais                       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Le pourcentage de verre              | 0%    | 10%   | 20%   | 30%   | 40%   |
| La masse volumique (m <sup>3</sup> ) | 2.430 | 2.412 | 2.407 | 2.391 | 2.390 |

Tableau II.2 : la masse volumique du béton avec différents pourcentages de verre

### II.4.1 Essais mécaniques

### II.4.1.1 Résistance à la compression et à la traction

L'essai de compression uniaxiale est réalisé suivant la norme EN 12390-3 « Essai pour béton durci – Résistance à la compression des éprouvettes ». Les extrémités des éprouvettes sont rectifiées par surfaçage avec une rectifieuse. L'éprouvette est placée et centrée sur une presse hydraulique de marque UTEST de 2000 kN puis soumise à un taux de chargement de 0,6 kN.s<sup>-1</sup> jusqu'à la rupture (Figure II.5). La charge maximale qui provoque la rupture de l'éprouvette permet de calculer la résistance en compression comme suit :

$$R_c = F / a^2 \quad (\text{II.2})$$

Avec

F : la charge maximale en N,

a : dimension de la section (a=100 mm).

L'essai de traction par fendage est exécuté selon la norme EN 12390-6 « Essai pour béton durci – Détermination de la résistance en traction par fendage des éprouvettes ». Il consiste à appliquer suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique, un effort de compression sur une zone étroite (Figure II.5). Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction. Celles-ci fournissent l'intensité de la résistance à la traction par fendage. Les éprouvettes sont centrées sur la presse hydraulique UTEST de 2000 kN. L'effort est appliqué à travers des bandes de chargement et un taux de chargement de 0,6 kN.s<sup>-1</sup>. La charge maximale qui provoque la rupture de l'éprouvette permet de calculer la résistance en traction par fendage suivant la formule :

$$F_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad (\text{II.3})$$

Avec  $f_{ct}$  la résistance à la traction par fendage en MPa, F la charge maximale en N, L la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette en mm et d la dimension transversale nominale en mm.

Pour chacun de ces essais et pour chaque formulation de béton, trois éprouvettes cubiques 10 x 10 x 10 cm pour la compression et trois autres éprouvettes cylindriques 10 x 20 cm pour la traction par fendage sont également testées, afin de contrôler sur une longue période les résistances à la compression et à la traction de différents types de béton formulés. Ces essais sont réalisés à plusieurs échéances : 7, 14, 28 et 90 jours.



Figure II.13 : Essais de la compression et de traction par fendage

#### II.4.2 Essai ultrasonique

Le matériel utilisé est l'appareil à ultrasons « MATEST C372N » (figure II.8). 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 béton sous test. Après avoir parcouru une longueur de chemin connue dans le béton, 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 cylindriques 11x 22cm séchées jusqu'à masse constante dans l'étuve à 70°C. Pour chaque trois éprouvettes sont utilisées pour chaque formulation de béton (pourcentage du verre). Ces mesures sont faites aux échéances 7,14,28 et 90 jours.

Après la mesure du temps, on 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

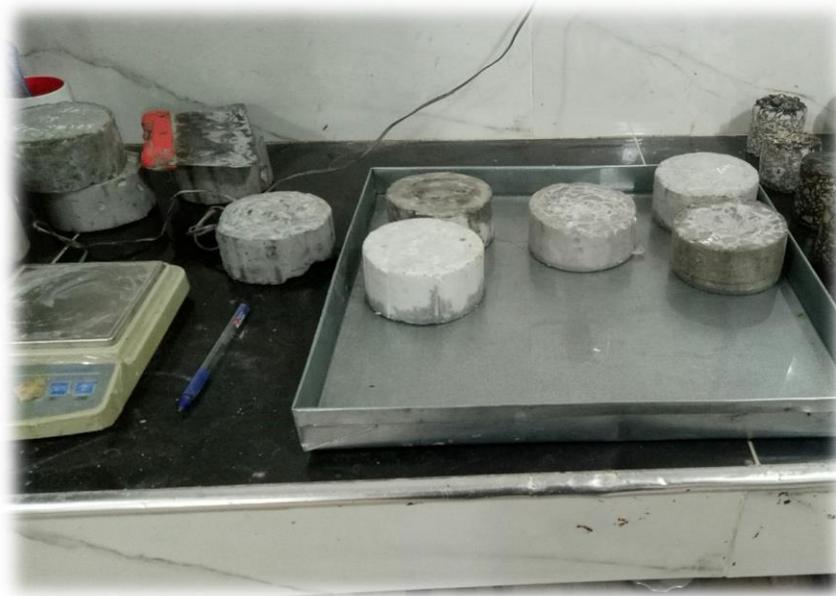
T : temps nécessaire à une impulsion ultrasonore pour se déplacer du transducteur émetteur au transducteur récepteur

### II.4.3 Essais de durabilité

#### II.4.3.1 Essai d'absorption par capillarité

Des échantillons de béton de formes cylindriques de 100\*50 mm de côté ont été sciés à partir des éprouvettes cylindriques 100\*200 mm (figure II.9). 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. □ 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 toutes les faces extérieures des échantillons sauf la face qui sera étudiée.
- ❖ Laisser sécher la paraffine pendant 24 h dans la température ambiante.
- ❖ 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'échantillon dans le temps (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90) min, 24h, 48h, 72h.
- ❖ Déterminer la quantité d'eau absorbée et la sorptivité.



**Figure II.14:** Photo de l'essai d'absorption par capillarité

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

$$C_t = \frac{Mt - M_0}{A} \quad (II.5)$$

où :

- $C_t$  est le coefficient d'absorption à l'échéance t (g/cm<sup>2</sup>).
- A est la section de l'éprouvette (cm<sup>2</sup>).
- $M_t$  est la masse à une échéance t (g).
- $M_0$  est la masse initiale de l'éprouvette (g).

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

#### II.4.3.2 Variation de masse

D'après la procédure de la norme ASTM C 267 (ASTM C 267, 2001), les éprouvettes sont retirées de la zone de conservation et nettoyées trois fois avec de l'eau douce pour éliminer les contaminants, puis on les laisse à l'air libre pendant 30 mn pour sécher superficiellement ensuite on a procédé à la pesée. Cette opération est effectuée à chaque échéance (7,14,28 et 90).

La variation de la masse de chaque éprouvette est calculée à partir de la formule suivante :

$$\Delta M (\%) = \left[ \frac{M_t - M_i}{M_i} \right] * 100$$

Avec

$\Delta M$  : variation de la masse en (%) ;

$M_t$  : la masse de l'éprouvette à chaque échéance en (gramme) ;

$M_i$  : la masse de l'éprouvette avant de le mettre à l'eau en (gramme) ;

Notons que pour chaque échéance la valeur de  $\Delta M$  est la moyenne de trois mesures.

#### II.4.3.3. Porosité : ASTM - C642

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la porosité du béton. Parmi cette méthode, la norme ASTM désignation C642.

Le but de cette méthode est de déterminer pourcentage de volume des pores contenus dans l'éprouvette, afin de connaître l'influence de la structure interne du béton sur l'interconnexion des pores.

Mode d'essai :

- ❖ Séchage l'étuve a 105°C de l'échantillon, pendant au moins 24 heures, jusqu' a obtention d'une masse constante, afin de faire évaporer toute la quantité d'eau évaporable. Cette masse est noté A.
- ❖ Émersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24.
- ❖ Chauffage jusqu' à ébullition pendant 5 heures, puis pesage de l'échantillonage l'air (soit C ce point) puis pesage a l'eau (pesée hydrostatique, soit D ce point).



Figure.II.15: Pesé hydrostatique

### Calcul de la porosité

Calculer par la formule :

$$V_P = \frac{C-A}{C-D} * 100$$

V<sub>p</sub> : volume des vides.

A : poids de l'échantillon après étuvage (g).

C : poids à l'air immersion et ébullition (g).

D : poids à l'eau immersion et ébullition (g).

### II.5. Conclusion

Ce chapitre. Nous avons fait et d'identification des matériaux utilisés dans ce projet suivant les normes en vigueur. Les résultats obtenus sont conformes à des matériaux pouvant être introduits dans la composition des bétons.

CHAPITRE III :

PROTOCOLE EXPERIMENTALE  
ET RESULTATS ET DISCUSSION

### III.1 Introduction

Ce chapitre présente l'effet de la substitution sur les propriétés du béton frais et durci, Le début est la formulation du béton, puis l'ensemble des résultats expérimentaux du comportement à l'état frais, et à l'état durci des différents mélanges réalisés, enfin les corrélations entre les résultats des essais.

### III.2 Procédure Expérimentale

#### III.2.1 la formulation du béton

La méthode employée pour cette formulation est la méthode graphique de Dreux Gorise (Dreux G., Jean FESTA.,1998). La composition utilisée est celle du béton normal de classe C 30/37 préparé selon la norme NF P18-405 (NF P18-405.,1981). Cinq différents mélanges ont été utilisés M<sub>0</sub>, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> et M<sub>4</sub> de pourcentage de substitution de verre respectivement :(0, 10, 20, 30, 40) %.

L'application de la méthode :

$$F_{c28} = 37 \text{ MPa}$$

Affaissement de A= 7cm et le béton ; vibration normale.

Le ciment utilisé est présenté au chapitre 2

Le dosage en ciment est de 400 kg/m<sup>3</sup>.

Les granulats concassés, sont caractéristiques présenté au chapitre 2 (tableau II.1).

La courbe granulométrique des granulats combinés est présentée au chapitre 2 (figure II.5).

La valeur de E/C est 0.45

Traçage de la courbe granulaire OAB, les courbes référentielles des granulats sont présentés au l'Annex (figure A.1).

D'après la courbe granulométrique on a déterminé les pourcentages des granulats nécessaires pour notre mélange sont comme suites :

Le sable : 30%.

Le gravier 3/8 : 10%.

Le gravier 8/15 ; 60%.

La valeur de compacité est  $\gamma = 0.805$

La calcule des volumes :

- La volume absolu du ciment :  $C = 129.03 \text{ l/m}^3$
- La volume absolu des granulats :  
La volume absolu du sable =  $207.3 \text{ l/m}^3$   
La volume absolu de gravier 3/8 =  $69.1 \text{ l/m}^3$   
La volume absolu de gravier 8/15 =  $414.6 \text{ l/m}^3$

Dosage pondéral des granulats (pour 1 m<sup>3</sup> de béton) :

Sable =  $518.5 \text{ kg/m}^3$       Gravier3/8 =  $179.66 \text{ kg/m}^3$       Gravier8/15 =  $1090.39 \text{ kg/m}^3$

Les proportions des autres mélanges sont trouvées dans l'annexe.

Après l'élaboration des éprouvettes, elles sont conservées dans l'eau potable jusqu'à le jour de l'essai.

### III.2.2 Protocol et suivis

Dans cette recherche, nous avons mené plusieurs essais principaux, suivant un plan de travail, et ces essais sont les suivants :

La résistance à la compression : on a fait trois éprouvettes cubiques de 10\*10 cm pour chaque pourcentage (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) de substitution des fines de verre (< 0.315 mm) par le sable. Les éprouvettes cubiques sont soumises jusqu'au jour d'écrasement à quatre délai (7.14.28.90) d'investigation.

La résistance à la traction : on a fait trois éprouvettes cylindriques de 10\*20 cm pour chaque pourcentage (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) de substitution des fines de verre (< 0.315 mm) par le sable. Les éprouvettes cylindriques sont soumises jusqu'au jour d'écrasement à quatre délai (7.14.28.90) d'investigation.

La mesure de la vitesse ultrasonique : les mêmes trois éprouvettes cylindriques de la résistance à la traction, mais on a mesuré la vitesse ultrasonique avant de faire l'écrasement fendage. Les éprouvettes cylindriques sont soumises jusqu'au jour de la mesure à quatre délai (7.14.28.90) d'investigation.

La mesure de l'absorption par capillarité : une seule éprouvette cylindrique de 10\*20 cm pour chaque pourcentage (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) de substitution des fines de verre (< 0.315

mm) par le sable, mais on a divisé l'éprouvette de 3 pièces de 5\*10 cm pour faire cet essai. Les éprouvettes cylindriques sont soumises jusqu'au jour de la mesure à quatre délai (7.14.28.90) d'investigation.

La mesure de la variation de masse : on a mesuré la masse des trois éprouvettes cylindriques après le décollage et après la conservation, puis on a calculé la variation de masse. Les éprouvettes cylindriques sont soumises jusqu'au jour de la mesure à quatre délai (7.14.28.90) d'investigation.

La mesure de la porosité : on a fait trois éprouvettes cubiques de 15\*15 cm pour chaque pourcentage (0%, 10%, 20%, 30%, 40%) de substitution des fines de verre (< 0.315 mm) par le sable, Les éprouvettes sont conservés jusqu'au jour de la mesure (90 jours).

### III.3 Résultats et discussion

#### III.3.1 Effet de la substitution sur les propriétés du béton frais

##### Effet de la substitution sur l'affaissement :

La figure III.1 présente la diminution de l'affaissement au cône d'Abrams en fonction des différents mélanges utilisés :

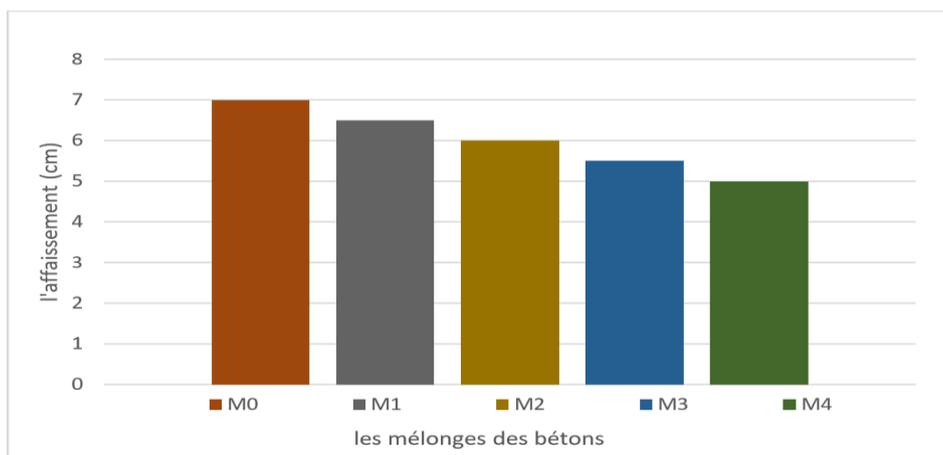


Figure III.1 : les résultats d'affaissement des bétons.

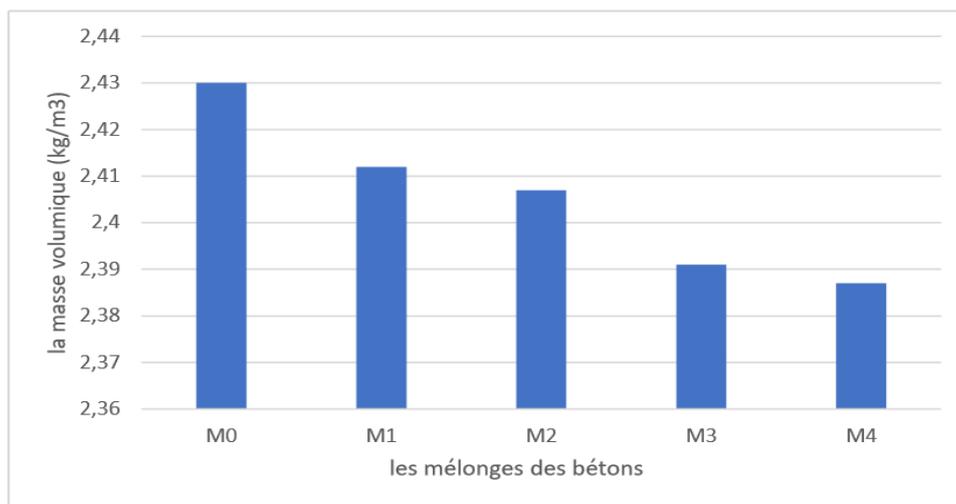
La figure 1 montre que les différents types des bétons sont dans le domaine plastique (5 – 9 cm), le béton M4 (avec 40% de verre recyclé) présente l'affaissement le plus faible, ce qui représente une réduction de 29% par rapport à l'affaissement du mélange référentiel. Alors que l'affaissement de M0 jusqu'à M4 baisse d'une suite arithmétique d'une raison égale 0,5 cm.

On a vu que la diminution de l'affaissement lorsque la substitution des fines de verre par le sable est augmentée, cela est dû au fait que le mélange de béton sec lorsque le pourcentage de verre qu'il contient augmente, lorsque on augmente le pourcentage des fines de verre dans le sable, on a un module de finesse moins.

Nos résultats sont en accord avec les résultats de la recherche appliquée par [24] le béton avec 30% de verre recyclé de taille 300 microns présentant le plus faible affaissement, soit une réduction de 29% par rapport à l'affaissement du mélange de contrôle et l'affaissement du béton avec 15% de taille 300 microns + 15% de verre concassé réduit de 7% par rapport au contrôle. Cela est dû à la forte absorption d'eau du verre broyé plus fin, qui en retour a réduit le rapport eau par ciment du mélange.

#### Effet de la substitution sur la masse volumique :

La figure III.2 présente la masse volumique en fonction des bétons avec différents pourcentages des fines de verre utiliser :



**Figure III.2 :** les résultats de la masse volumique des bétons.

La figure 2 montre que le béton M0 (avec 0% de verre recyclé) a une masse volumique plus élevée. Mais M4 (avec 40% de verre recyclé) présente la masse volumique la plus faible c'est-à-dire la plus légère. Ce qui représente une réduction de 1.76% par rapport à la masse volumique du mélange témoin. Alors chaque augmentation de substitution de verre baisse la valeur de la masse volumique à l'état frais. Tout cela, est due que la masse volumique de verre est plus légère que la masse volumique du sable.

(M. Adaway & Y. Wang) [25] ont constaté que Le remplacement du sable par des déchets de verre a un effet mesurable sur la densité à l'état frais et à l'état durci, avec une réduction de la

valeur résultant de l'ajout croissante de verre au mélange. À un niveau de remplacement du verre de 40%, cela aboutit à une variance de 2,4% et 2% respectivement des densités fraîches et sèches, par rapport au témoin. Cela peut être attribué à la gravité spécifique plus légère de l'agrégat de verre, qui était 5,4% plus légère que le sable utilisé. Cependant, cet effet a été légèrement compensé par la diminution du rapport entre les granulats fins et grossiers dans chaque mélange résultant.

Ces résultats sont en accord avec les recherches obtenues par [26] qui ont conclu que le poids absolu du béton est réduit lorsque on remplace les granulats fins naturels par du verre.

### II.3.2 Effet de la substitution sur les propriétés du béton durci :

#### Effet de la substitution sur la résistance de compression :

L'évolution de la résistance en compression des différents bétons avec les fines de verre en fonction de l'âge présentée sur la figure suivante :

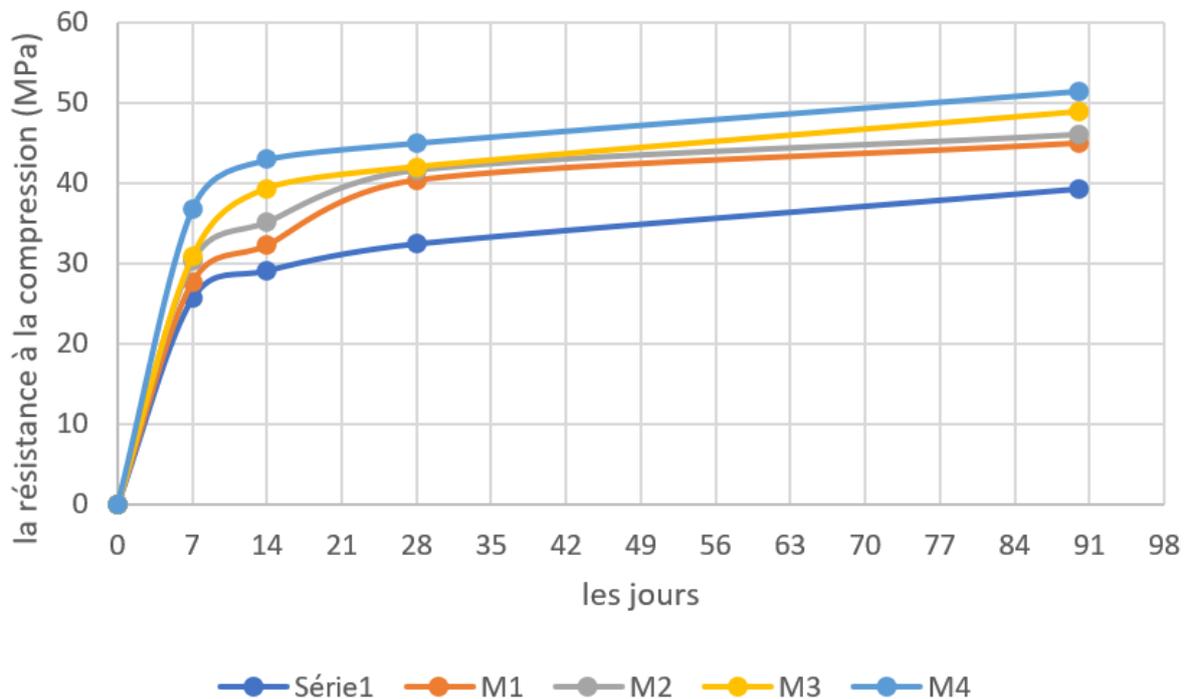


Figure III.3 : les résultats de la résistance à la compression des bétons.

La figure 3 montre les résultats de la résistance à la compression aux échéances suivantes (7,14,28,90) :

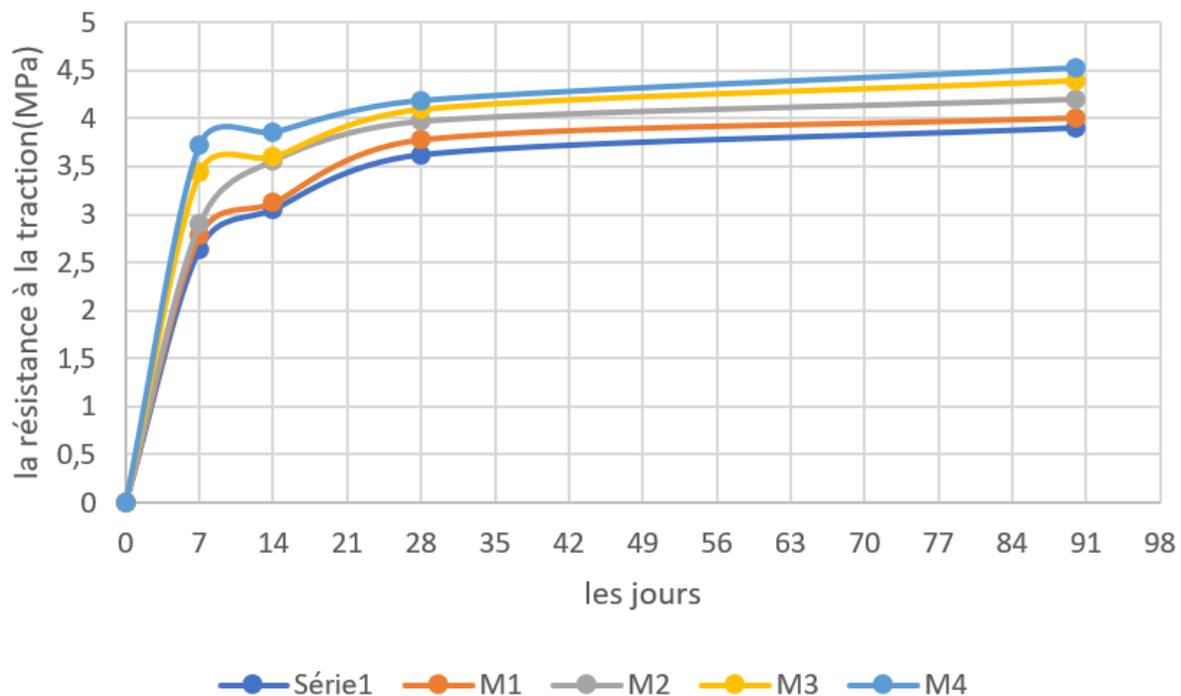
D'après la figure, on peut dire qu'il y a une augmentation de la résistance à la compression avec tous les bétons, avec une augmentation de l'âge. Comme le béton M4(contient 40% des fines

de verre) a donné la résistance la plus élevée à chaque échéance et le béton M0(contient 0% des fines de verre) a donné la résistance la plus faible.

La résistance à la compression du béton M4(40% des fine de verre) aux jours 28 et 90 a donné 45.01 MPa et 51.47 MPa, ce qui était supérieur au béton témoin M0(0% des fines de verre) par 38.48% et 30%, respectivement.

**Effet de la substitution sur la résistance de traction :**

L'évolution de la résistance à la traction des différents bétons avec les fines de verre en fonction de l'âge présentée sur la figure suivante :



**Figure III.4 :** les résultats de la résistance à la traction des bétons.

La figure 3 montre les résultats de la résistance à la traction aux échéances suivantes (7,14,28,90) :

D'après la figure, on peut observer qu'il y a une augmentation de la résistance à la traction avec tous les bétons, avec une augmentation de l'âge. Comme le béton M4(contient 40% des fines de verre) a donné la résistance la plus élevée à chaque échéance et le béton M0(contient 0% des fines de verre) a donné la résistance la plus faible.

On a observé aussi que l'évolution de la résistance à la traction de M4 par rapport M0 à l'âge de 28 et 90 jours est 15.46% et 15.89%, respectivement.

D'après les résultats de la résistance à la traction et la résistance à la compression on peut voir que la substitution de sable avec les fines de verre (<0.315mm) donne un bon résultat, donc on conclut que L'augmentation de la résistance mécanique par rapport au celle du témoin peut être attribuée à la nature angulaire de l'agrégat de verre, qui a une plus grande surface spécifique que les particules de sable naturellement arrondies. Cette surface permet une meilleure adhérence avec la pâte de ciment, conduisant à une matrice de béton plus solide, aussi les fines de verre ont contribué à colmater les petits pores dans le corps du béton.

Nos résultats de la résistance à la compression sont en accord avec la recherche appliqué par [27], où la résistance à la compression du béton après (7, 14, 28, 90) jours de durcissement s'est avérée augmenter avec l'ajout de verre, bien qu'à des niveaux de remplacement plus faibles. Mais contrairement, la résistance à la traction, nos résultats ne sont pas en accord avec la recherche appliquée par [28], qu'ils indiquent clairement que l'augmentation de la proportion de sable de verre contenu dans les mélanges de béton a conduit à la diminution de la résistance à la rupture du béton, qui peut être attribuée à la diminution de la force d'adhérence du béton de sable de verre comme la proportion de la teneur en verre augmente.

#### Effet de la substitution sur la vitesse ultrasonique :

L'évolution de la vitesse d'impulsion ultrasonique des différents bétons avec les fines de verre en fonction de l'âge présentée sur la figure suivante :

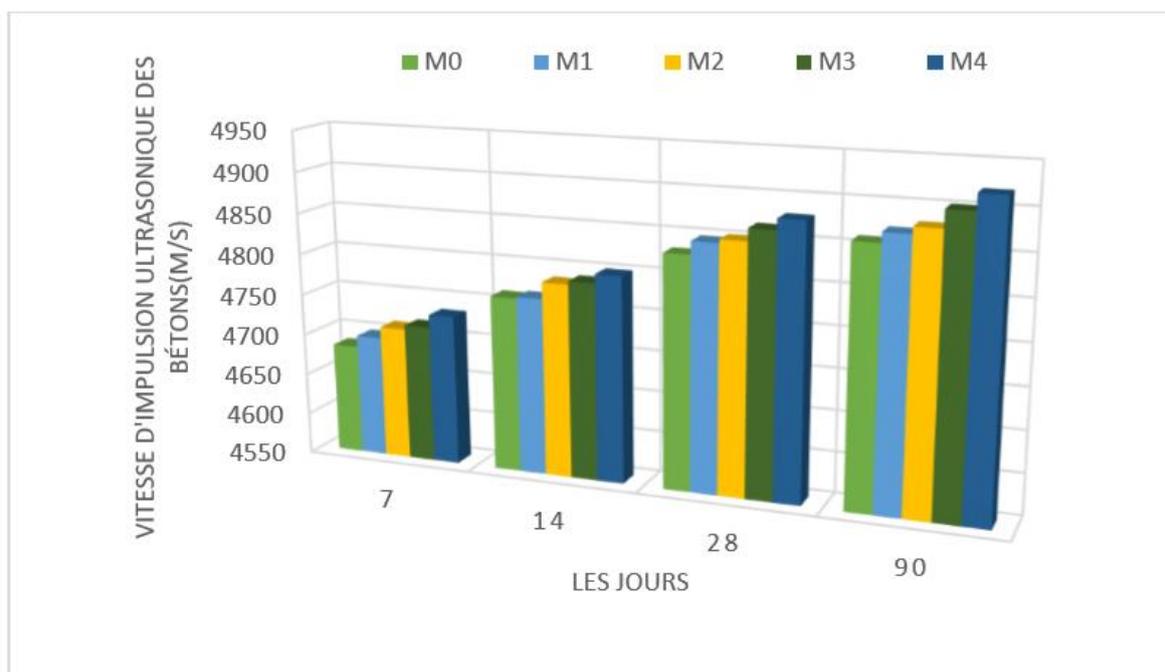


Figure III.5 : les résultats de vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons.

D'après la figure, on peut dire qu'il y a une augmentation de la vitesse d'impulsion ultrasonique avec tous les bétons, avec une augmentation de l'âge. Comme le béton M4 (contient 40% des fines de verre) a donné la vitesse la plus élevée à chaque échéance et le béton M0 (contient 0% des fines de verre) a donné la vitesse la plus faible.

La vitesse d'impulsion ultrasonique du béton M4 (contient 40% des fines de verre) est la meilleure que le béton témoin. Et aussi elle est supérieure à la vitesse d'impulsion ultrasonique du béton M0 de 0.99% et 1.23%, respectivement aux échéances 28 et 90 jours.

Nous traduisons l'augmentation de la vitesse d'impulsion ultrasonique que les fines de verre remplacées par du sable colmatent les pores et diminuent la porosité. Nos résultats sont dans le même sens que la recherche appliquée par [29] ; La valeur de la vitesse d'impulsion ultrasonique a augmenté et les propriétés de transport ont été améliorées avec l'augmentation de la teneur en agrégats de verre recyclé.

#### Effet de la substitution sur l'absorption par capillarité :

L'augmentation du coefficient d'absorption des différents bétons avec les fines de verre en fonction de l'âge présentée sur la figure suivante :

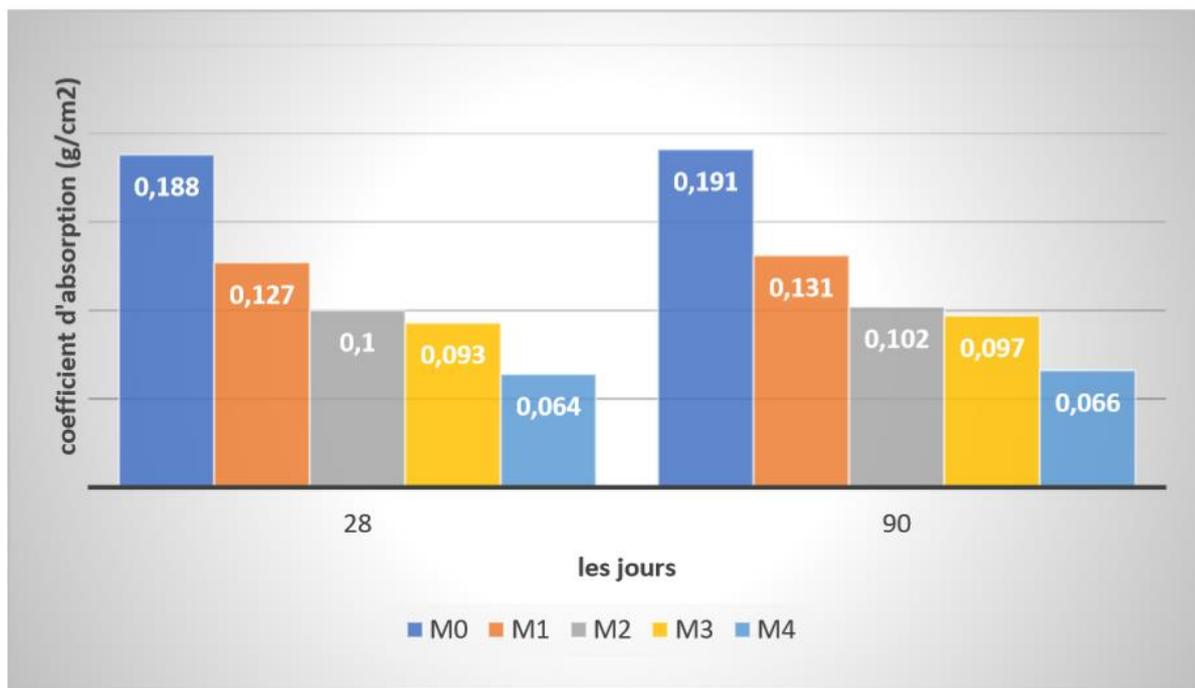


Figure III.6 : les résultats de coefficient d'absorption des bétons.

La figure III.6 montre les résultats du coefficient d'absorption des bétons dans les jours 28 et 90, et les autres figures de 7 et 14 jours sont dans l'Annex (figure A.2).

D'après la figure on peut voir qu'il y'a une augmentation dans le coefficient d'absorption dans la série des bétons consultées, le béton M0 (contient 0% des fines de verre) gagne le coefficient le plus élevé d'absorption par rapport aux autres types des bétons, le coefficient d'absorption diminue à mesure que le pourcentage des fines de verre remplacé par du sable augmente dans le béton jusqu'à ce que la substitution atteigne 40%.

La moindre valeur d'absorption capillaire est aboutie chez la formulation M4, une réduction de 65.83% et 65.2%, respectivement du taux d'absorption capillaire de M4 par rapport M0 aux 28 et 90 jours de suite

Donc on conclut que l'existence des fines crée un bon arrangement des grains entre eux c'est qui minimise la circulation d'eau à l'intérieur du corps du béton incorporé des verres.

L'augmentation de l'absorption capillarité d'eau à 90jours par rapport à 28 jours est probablement à l'origine de la continuité d'hydratation de ciment.

#### Effet de la substitution sur la variation de masse :

L'augmentation de la variation de masse des différents bétons avec les fines de verre en fonction de l'âge présentée sur la figure suivante :

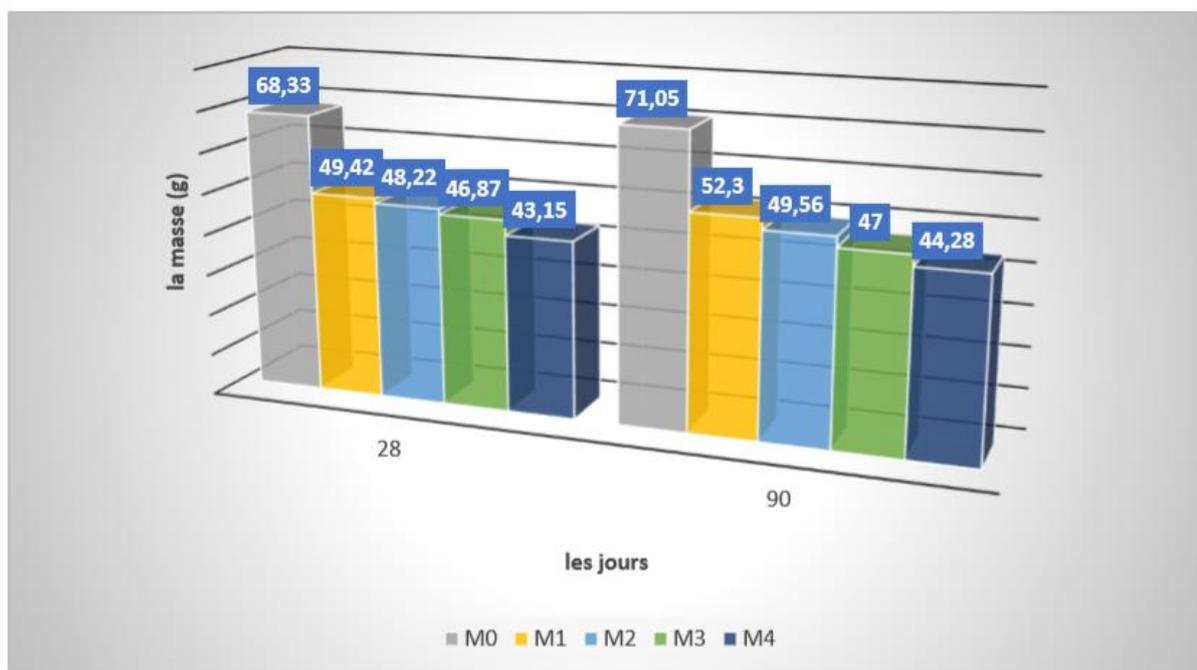


Figure III.7 : les résultats de la valeur de la variation de masse des bétons.

Les résultats du test valeur de la variation de masse sont présentés sur la figure III.7. Chaque valeur présentée est la moyenne de trois mesures dans des échéances (28 et 90 jours), les autres figures dès les échéances 7 et 14 jours sont dans l'Annex.

D'après la figure, on a vu qu'il y'a un gain de masse pour les différents types de béton depuis le jour 28 jusqu'au jour 90. Dans ces échéances, le béton M0 (contient 0% des fines de verre) a une variation plus élevée que les autres bétons, et le béton M4 (contient 40% des fines de verre) a une variation moins élevée que les autres aussi (M1, M2 et M3). Alors, la valeur de la variation de masse diminue à mesure que le pourcentage des fines de verre remplacé par du sable augmente dans le béton jusqu'à ce que la substitution atteigne 40%.

La valeur de la variation de masse de béton M4 (contient 40% des fines de verre) est le meilleur que le béton témoin. Et aussi, il est moins que la valeur de la variation de masse du béton M0 aux jours 28 et 90 dans le taux de 36.85% et 37.67%, respectivement.

Donc, on conclut que la raison de la diminution de la variation de masse par l'augmentation du pourcentage de substitution est l'existence des fines qui ont colmaté les pores dans le corps du béton.

#### Effet de la substitution sur la porosité :

La figure III.8 présente la porosité en fonction des bétons avec différents pourcentages des fines de verre utilisées :

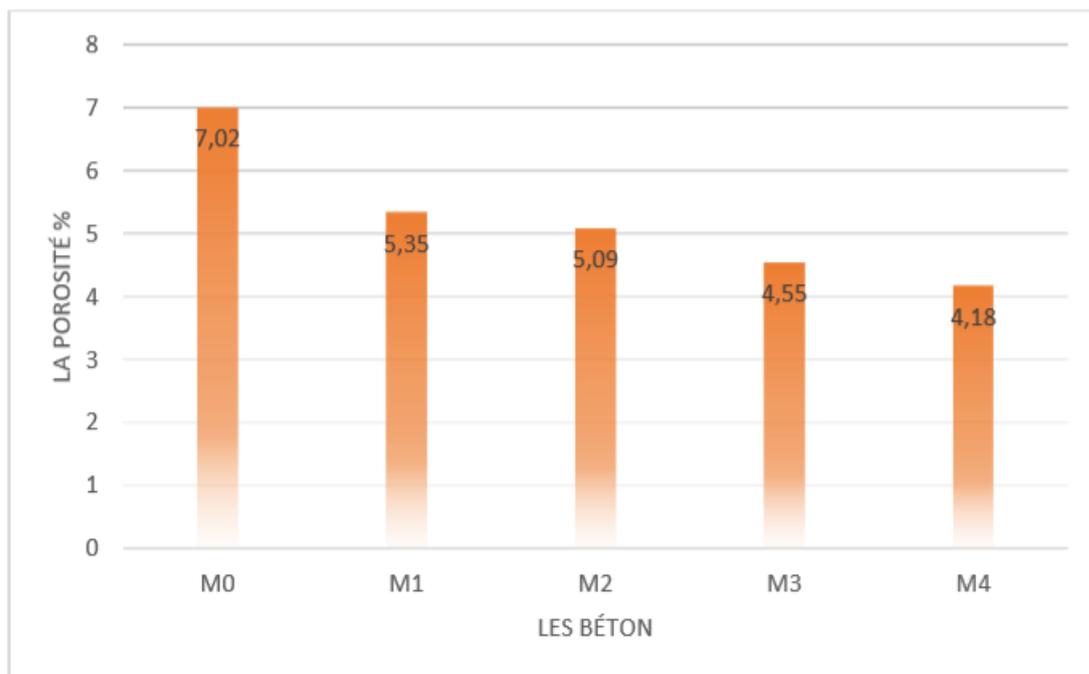


Figure III.8 : les résultats des pourcentages des pores des bétons.

Les résultats de porosité des bétons sont présentés sur la figure 11, ces résultats sont 90 jours après la conservation.

D'après la figure, on a observé qu'il y'a une diminution du pourcentage de pores, de M0 à M4. Nous pouvons voir que le béton M0 (0% de verre) a un rapport de pores plus élevé que les autres bétons, et le béton M4 (40% de verre) a un rapport de pores moins élevé, soit une diminution de 40.45%.

Le béton M4 a un meilleur résultat que les autres bétons parce qu'il contient un rapport de pores le moins élevé et tout cela parce que les fines des verres servent à colmater les espaces entre les grains, ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par le test d'absorption.

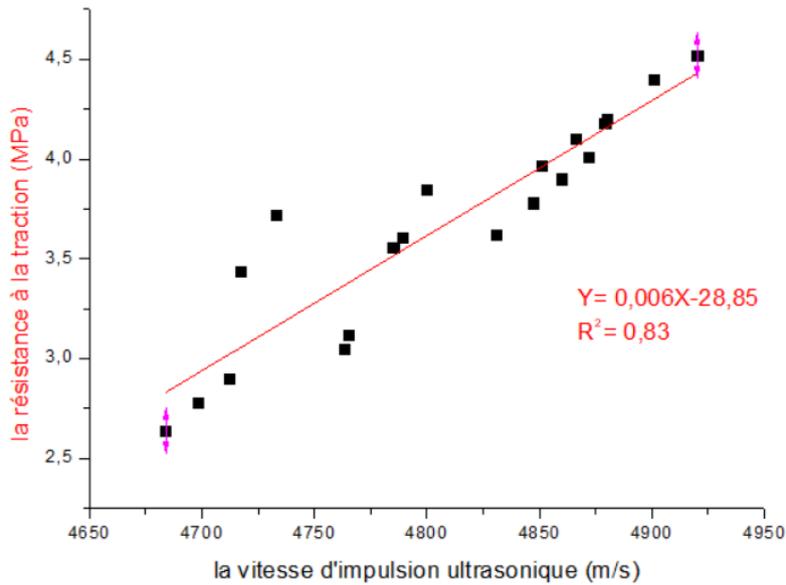
### III.4 Les corrélations

La corrélation est une notion couramment utilisée dans toutes les applications statistiques. Elle permet d'étudier la liaison que l'on rencontre fréquemment entre deux variables dans toutes les sciences humaines ou appliquées. Toutefois, la définition statistique de la corrélation est plus précise que le sens courant du terme : elle ne concerne que des variables statistiques quantitatives, c'est-à-dire dont on peut calculer les moyennes.

#### III.4.1 Relation de corrélation entre la résistance en traction et la vitesse d'impulsion ultrasonique

Pour la relation de corrélation entre les résultats des essais destructive (essai de traction) des éprouvettes et celles issues du contrôle non destructif (ultrasonique) le choix est une fonction linéaire de forme :  $F_{tj} = A * UPV + B$  ou A et B sont des constants

L'augmentation de la résistance à la traction en fonction de la vitesse d'impulsion ultrasonique aux 28 et 90 jours est présentée sur la figure III.9



**Figure III.9 :** Corrélation de 20 points entre la résistance à la traction et la vitesse d'impulsion ultrasonique aux tous échéances (7, 14, 28 et 90).

On peut remarquer que :

La vitesse d'impulsion ultrasonique est un essai qui pourra donner une bonne corrélation entre les résultats de l'essai destructif des éprouvettes et ceux issus de l'essai de non destructifs comme notre cas puisque le coefficient de corrélation  $R^2$  est = 0.83 pour tous les types de béton.

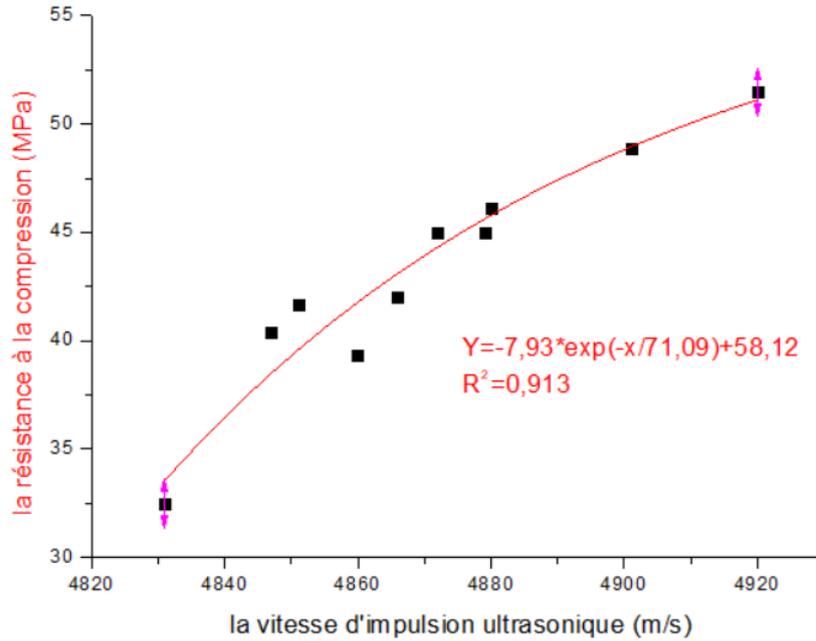
### III.4.2 Relation de corrélation entre la résistance en compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique

Une corrélation importante des propriétés des matériaux, qui est souvent appliquée afin de mettre une relation entre la résistance à la compression du béton ( $f_c$ ) et la vitesse de l'impulsion ultrasonique (UPV). Pour la plupart des travaux de recherche rapportés sur ce sujet, il a été estimé que la relation  $f_c$ -UPV, pour les bétons suivait une fonction exponentielle, bien que dans certains cas elle fût considérée comme linéaire, parabolique ou potentielle. Notre fonction est exponentielle de forme :

$$F_{c_j} = A e^{\left(\frac{-x}{t}\right)} + B$$

Ou A, B et T sont des constants

L'augmentation de la résistance à la compression en fonction de la vitesse d'impulsion ultrasonique est présentée sur la figure III.10



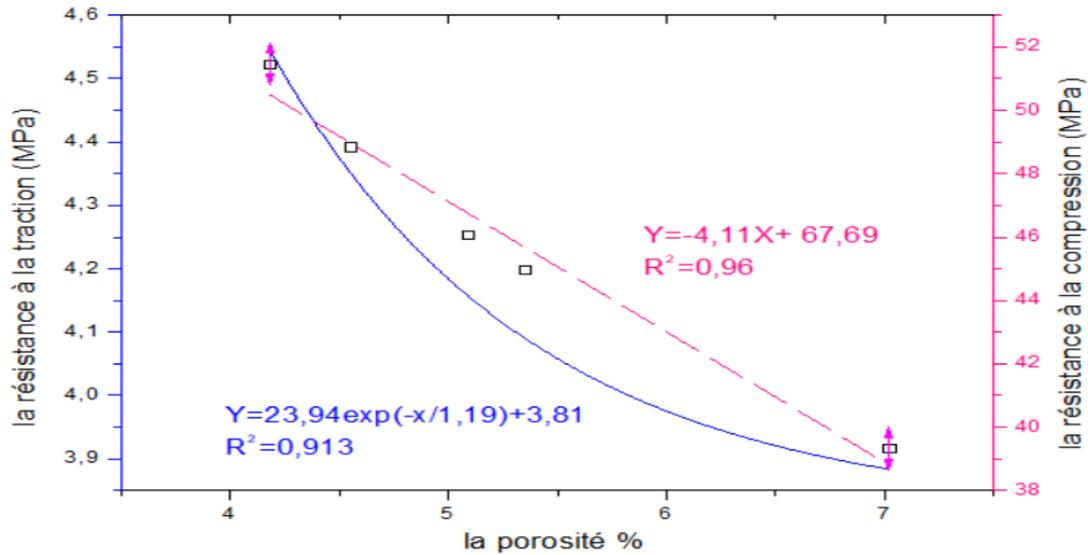
**Figure III.10 :** Corrélation de 10 points entre la résistance à la compression et la vitesse d'impulsion ultrasonique aux 28 et 90 jours.

On peut remarquer que :

La vitesse d'impulsion ultrasonique est un essai qui pourra donner une bonne corrélation entre les résultats de l'essai destructif des éprouvettes et ceux issus de l'essai de non destructifs comme notre cas puisque le coefficient de corrélation  $R^2$  est  $> 0.91$  pour tous les types de béton.

### III.4.3 Relation de corrélation entre la résistance en compression + en traction et la porosité

La figure III.11 présente la relation de corrélation entre la résistance en (compression, traction) et la porosité du béton



**Figure III.11** : Corrélation entre la résistance à la compression + à la traction et les porosités des bétons.

D'après la figure, on a vu qu'il y'a deux courbes qui sont comme suites :

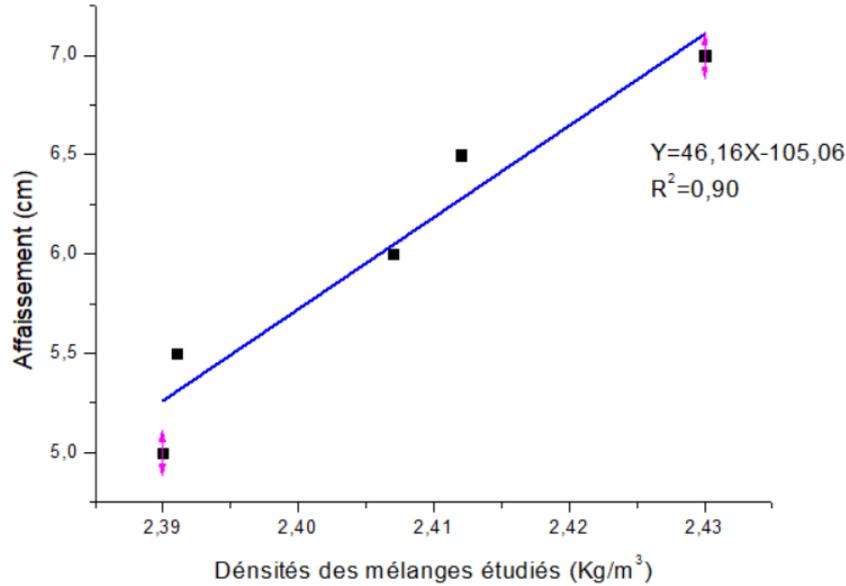
**1<sup>er</sup>** courbe (rose) : La courbe est une fonction linéaire qui relie la résistance à la compression avec la porosité des bétons dont sa fonction est comme suit :  $Y = A X + B$ , et le coefficient de corrélation  $R^2$  est = 0.96 pour tous les types de béton.

**2<sup>émé</sup>** courbe (bleu) : La courbe est une fonction exponentielle qui relie la résistance à la traction avec la porosité des bétons de forme :  $F_{cj} = A e^{(-\frac{x}{t})} + B$ , et le coefficient de corrélation  $R^2$  est = 0.913 pour tous les types de béton.

On note que plus il y a de porosité, moins il y a de résistance à la compression et à la traction.

#### III.4.4 Relation de corrélation entre l'affaissement et la densité

La figure III.12 présente la relation de corrélation entre l'affaissement et la densité



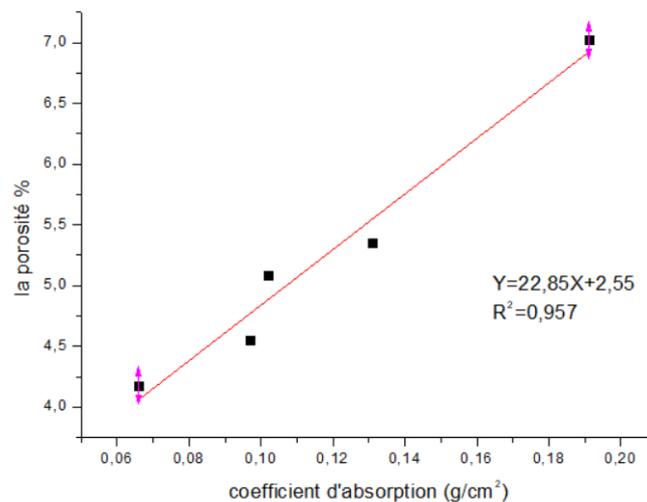
**Figure III.12 :** Corrélation entre l'affaissement et la densité.

La figure montre qu'il y'a une relation linéaire entre l'affaissement et les densités des mélanges en fonction de forme :  $Y = A X + B$ , et le coefficient de corrélation  $R^2$  est = 0.90 pour tous les types de mélange.

Nous avons vu que la relation entre l'affaissement et la densité est directe, plus la densité est élevée, plus l'affaissement est élevé.

### III.4.5 Relation de corrélation entre la porosité et le coefficient d'absorption

La figure III.13 présente la relation de corrélation entre la porosité et l'absorption



**Figure III.13 :** Corrélation entre la porosité et le coefficient d'absorption.

La figure montre qu'il y'a une relation linéaire entre la porosité et le coefficient d'absorption des bétons en fonction de forme :  $Y = A X + B$ , et le coefficient de corrélation  $R^2$  est = 0.957 pour tous les types de béton.

Nous avons vu que la relation entre la porosité et l'absorption est directe, plus l'absorption est élevée, plus la porosité est élevée.

### **III.5 Conclusion**

Ce chapitre a présenté l'effet de la substitution sur les propriétés du béton frais et durci, le début est la formulation du béton, puis l'ensemble des résultats expérimentaux du comportement à l'état frais, et à l'état durci des différents mélanges réalisés, enfin des corrélations entre les résultats des essais.

CONCLUSION GENERALE  
ET  
PERSPECTIVES

## Conclusion générale

Cette étude a été menée pour évaluer l'effet de la substitution du sable par les fines de verre <0.315mm sur les comportements mécaniques, l'ouvrabilité, les caractéristiques de durabilité du béton. Pour atteindre notre but, deux objectifs essentiels ont été sélectionnés. Le premier objectif concerne le choix d'un seuil approprié de substitution afin de passer au deuxième objectif qui représente un diagnostic proprement dit sur l'influence de ce taux optimal de substitution sur les caractéristiques mécaniques, la durabilité, en se référant au béton témoin.

A travers les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- L'affaissement des échantillons de béton fraîchement produits diminue à mesure que le pourcentage de déchets de verre augmente (les fines de verre <0.315mm), jusqu'à 40% de substitution la maniabilité est dans la domaine plastique. Ce qui suggère que les mélanges frais présentent une tendance décroissante en ouvrabilité à mesure que la teneur en verre usé augmente.
- Une meilleure densité à l'état frais améliorée de la part du béton de 40% de substitution comparé aux autres compositions.
- Le béton produit avec des teneurs en fines de verre de 40% comme substitut direct du sable présente une bonne amélioration de la résistance à la compression supérieure à celle du témoin aux tous les échéances (7, 14, 28, 90) jours d'âge de durcissement. Le pourcentage optimal avec la valeur de résistance à la compression la plus élevée est de 40%. Il atteint plus de 30% que le béton témoin.
- Augmentation notable de la résistance à la traction du béton de verre jusqu'à 40% du remplacement. Il atteint plus de 15% que le béton témoin.
- Evolution de la vitesse d'impulsion ultrasonique avec l'augmentation du pourcentage de la substitution, le béton de 40% de substitution donne la meilleure vitesse.
- La corrélation entre les résultats des essais étudiés donne une bonne relation avec des différents équations, son coefficient de corrélation de chaque relation est toujours  $R^2 > 0,90$ .

Dans chaque étape de cette recherche, on peut noter que 40% de substitution les fines de verre < 0.315mm par de sable présente une optimisation remarquable par rapport au béton témoin. Le fruit de cette contribution peut être considéré comme un appel à l'exploitation des déchets de verre. L'usage de ce déchet participe fortement à la réduction et la limitation d'utilisation de sable, ce qui protège notre environnement.

Les résultats de cette recherche confirment que l'utilisation des déchets de verre comme matériau de remplacement d'agrégats fins dans le béton est efficace et peut être utilisée à l'avenir. L'effet des déchets de verre dans le béton est plus évident à l'âge avancé de 7 jours. Le pourcentage optimal de déchets de verre qui donne les valeurs maximales des caractéristiques mécaniques et physiques est de 40%. Cette étude visait à trouver des moyens efficaces de réutiliser les déchets de verre comme granulats fins dans le béton. Les données présentées dans cette recherche montrent qu'il existe un potentiel prometteur pour l'utilisation des déchets de verre dans le béton ; de plus amples recherches pourraient être envisagées concernant son effet à long terme sur les propriétés du béton.

Après cette recherche qui a dégagé de nouvelles interrogations concernant l'emploi des déchets de verre comme matériau alternatif avec le sable dans le béton. Ces questions pourraient conduire à de nouvelles recherches sur ce sujet et son effet sur la durabilité et la morphologie de la microstructure des ouvrages en béton armé, on cite notamment :

- Résistance et microstructure d'un éco-béton produit à partir des déchets de verre comme substitut partiel du ciment.
- L'effet de la substitution d'un pourcentage entre (40-60) % du sable par les fines de verre (<0.315mm) sur la durabilité de béton.
- L'effet de la substitution du sable par les fines de verre dans le béton conservé dans les eaux remontées de la nappe phréatique.
- Impact de l'utilisation combinée de poudre de verre dépoli et d'agrégats de verre concassé sur certaines propriétés du béton de ciment Portland.
- Déchets de verre comme matériau de ciment supplémentaire dans le béton.

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

**Références bibliographiques**

[1] Ali, E. E., & Al-Tersawy, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785–791. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117 (2012)

[2] Shi, C., & Zheng, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 234–247. (2007)

doi: 10.1016/j.resconrec.2007.01.013

[3] Siddique, R. Waste glass. Chap. 4 in *Waste materials and by-products in concrete*. Springer. (2008)

doi:10.1007/978-3-540-74294-4

[4] Rashad, A. M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. *Construction and Building Materials*, 72, 340–357. (2014)

doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.092

[5] United States Environmental Protection Agency. *Advancing sustainable materials management: Facts and figures report*. Retrieved from <https://www.epa.gov/smm/advancing-sustainable-materials-management-facts-and-figures> (2014)

[6] Tan, K. H., & Du, H. Use of waste glass as sand in mortar. Part I. Fresh, mechanical and durability properties.”. *Cement and Concrete Composites*, 35, 109–117. (2013)

doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028

[7] Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Material*, 117, 263 –272. (2016).

doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072

[8] Shayan, A., & Xu, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete, a field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36, 457–468. (2006).

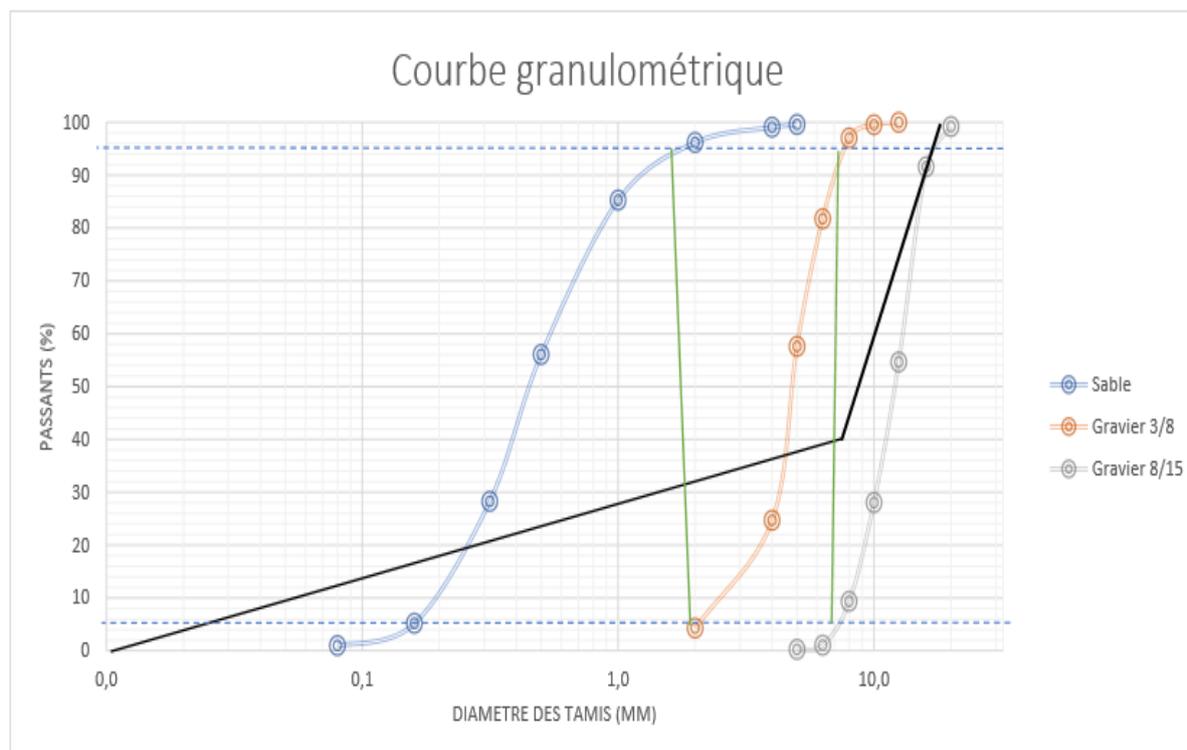
doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.012

[9] K.P. Mehta, P.J.M. Monteiro. *Concrete: microstructure, properties, and materials*, third ed., McGraw-Hill, New York, 2006.

- [10] C. Meyer. The greening of the concrete industry. Cem. Concr. Compos.31 (2009) 601–5.
- [11] Z. Li. Advanced concrete technology. First ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.
- [12] <http://www.geniecvl.com/introduction-le-materiau-beton/>
- [13] T. Djedid, A. Guettala ; study of the workability and mechanical strength of concrete in the face of upwelling (case of the el oued region of algeria).P 369.
- [14] DJEDID Tarek : Effet de la substitution du sable de rivière par du sable de carrière sur la durabilité des bétons à base de différents ciments algériens dans des environnements chimiques. P 02.
- [15] La Chimie chez Dr Sahar mardi 5 août 2014  
<http://chimiedrsahar.blogspot.com/2014/08/generalites-sur-les-verres.html>
- [16] Oluwarotimi M. Olofinnade, Anthony N. Ede, Julius M. Ndambuki, Ben U. Ngene, Isaac I. Akinwumi and Olatokunbo Ofuyatan : Strength and microstructure of eco concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand.
- [17] R. Hamid, and M. A. Zubir: Compressive Strength of Concrete with Recycled Glass as Partial Aggregate Replacement.
- [18] M. Adaway & Y. Wang : Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength.
- [19] Ali Mardani-Aghabaglou • Murat Tuyan • Kambiz Ramyar : Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates.
- [20] **Zainab Z. Ismail & Enas A. AL-Hashmi.** Recycling of Waste Glass as A Partial Replacement for Fine Aggregate in Concrete. Journal of Waste Managem. (2008)
- [21] **M. Mageswari & Dr. B.Vidivelli.** The Use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete. Journal of The Open Civil Engineering. (2010)
- [22] **Mahmoud Nili, Mahdi Hoseinian, Nader Biglari Joo, & Siavash Ahmadi.** Assessing the Influences of Waste Glass and Recycled Concrete Aggregate on Properties of Concrete. Fib Symposium Prague. Topic 2: Poster Session.2011) )
- [23] **W.K. Kupolati, W.T. Mbadie, J.M. Ndambuki, R. Sadiku.** Environmental greening through utilization of glass waste for production of concrete.

- [24] **R. Hamid, a and M. A. Zubir:** Compressive Strength of Concrete with Recycled Glass as Partial Aggregate Replacement. P23
- [25] **M. Adaway & Y. Wang:** Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength.
- [26] **Józsa and Nemes :** Strength of Lightweight Glass Aggregate Concrete.
- [27] **Oluwarotimi M. Olofinnade and Anthony N. Ede:** Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand. **P 9-12**
- [28] **Oluwarotimi M. Olofinnade and Anthony N. Ede:** Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand. **P 12-13**
- [29] **Ali Mardani-Aghabaglou:** Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates.

# ANNEXES



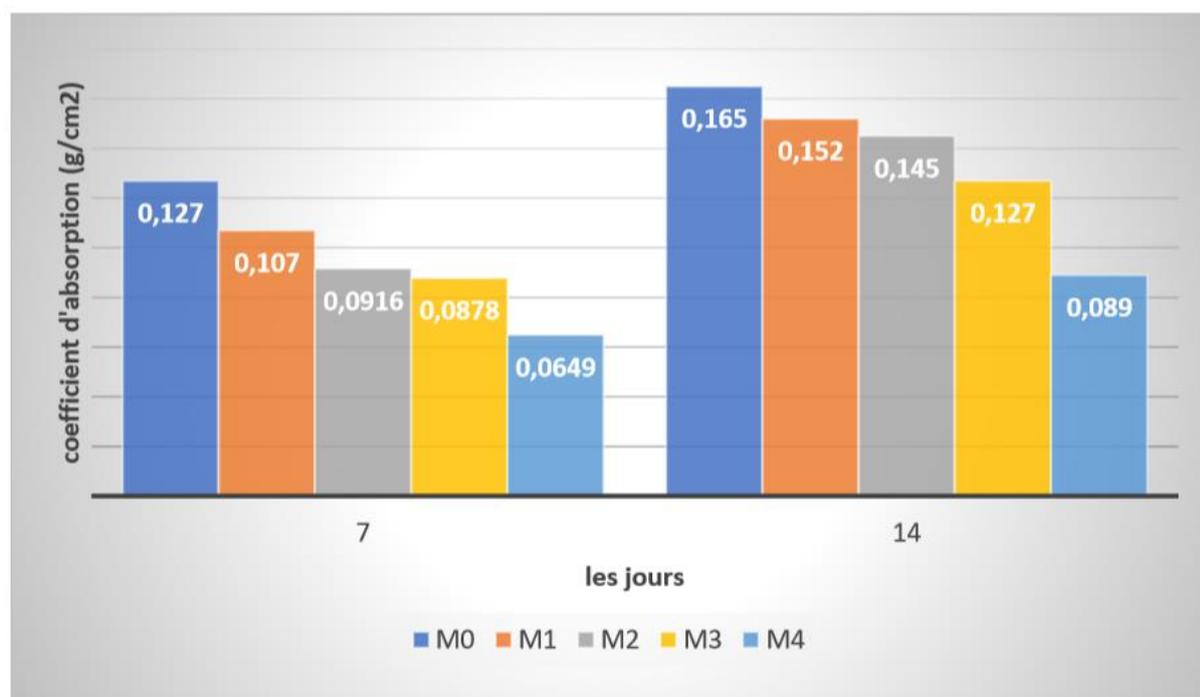
**Figure A.1** : les courbes référentielles des granulats.

| Type du béton  | E/C% | Ciment Kg/m <sup>3</sup> | E L/m <sup>3</sup> | S % | V% | G1 % | G2 % | S Kg/m <sup>3</sup> | V Kg/m <sup>3</sup> | G1 Kg/m <sup>3</sup> | G2 Kg/m <sup>3</sup> |
|----------------|------|--------------------------|--------------------|-----|----|------|------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| M <sub>0</sub> | 0.45 | 400                      | 180                | 30  | /  | 60   | 10   | 518.15              | /                   | 1090.39              | 179.66               |
| M <sub>1</sub> | 0.45 | 400                      | 180                | 27  | 3  | 60   | 10   | 466.335             | 51.815              | 1090.39              | 179.66               |
| M <sub>2</sub> | 0.45 | 400                      | 180                | 24  | 6  | 60   | 10   | 414.52              | 103.63              | 1090.39              | 179.66               |
| M <sub>3</sub> | 0.45 | 400                      | 180                | 21  | 9  | 60   | 10   | 362.705             | 155.445             | 1090.39              | 179.66               |
| M <sub>4</sub> | 0.45 | 400                      | 180                | 18  | 12 | 60   | 10   | 310.89              | 207.26              | 1090.39              | 179.66               |

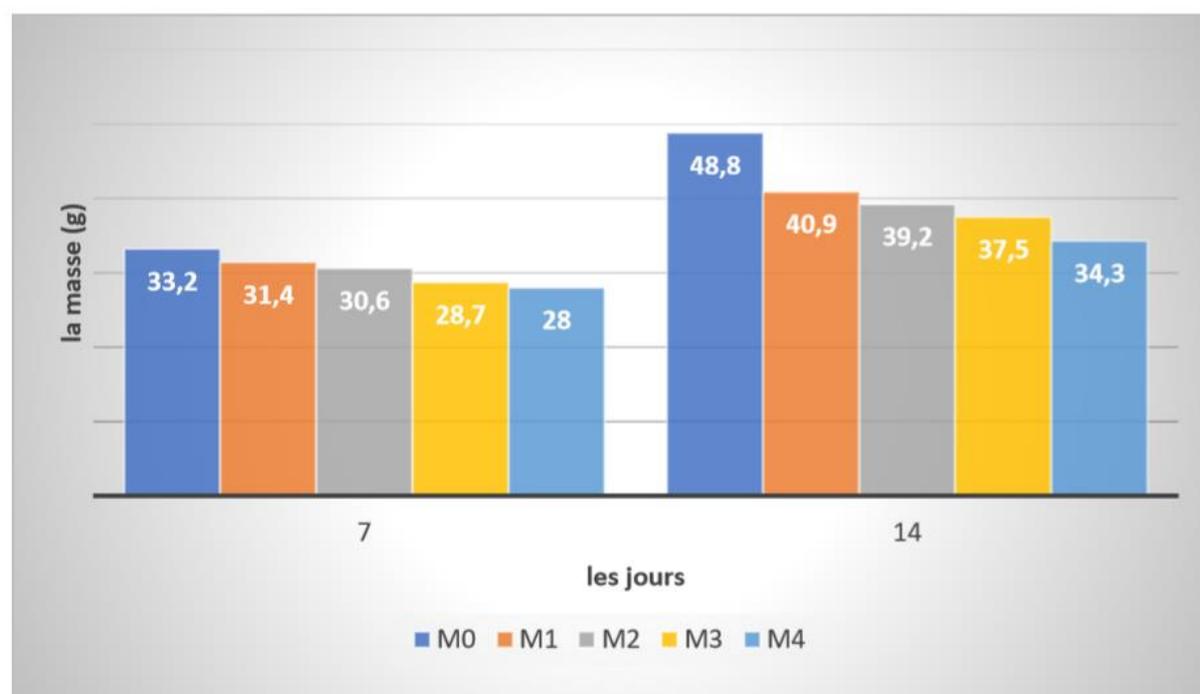
**Tableau A.1** : les différentes proportions des matériaux utilisés.

| Les différents pourcentages de verre | sable avec 0% de verre | sable avec 10% de verre | sable avec 20% de verre | sable avec 30% de verre | sable avec 40% de verre |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Module de finesse                    | 1.88                   | 1.85                    | 1.81                    | 1.79                    | 1.78                    |

**Tableau A.2 :** la module de finesse des mélanges de sable.



**Figure A.2 :** les résultats de coefficient d'absorption des bétons aux 7 et 14 jours



**Figure A.3 :** les résultats de la valeur de la variation de masse des bétons aux 7 et 14 jours