



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et de la géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : valorisation des ressources minérales

FORMULATION ET CARACTERISATION D'UN MATERIAU CIMENTAIRE A BASE DE DECHET DE VERRE

Présenté et soutenu par

BRAKNI Karima

Devant le jury:

Grade	Etablissement		
Président :	AMIRCH Abdelkrim	MCB	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Encadreur :	LARABA Mohammed	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs :	KRIM Mansour	MAA	Université Larbi Tebessi - Tébessa
Examineurs :	BOUZENZANA Abdellali	MCA	Université Larbi Tebessi - Tébessa

Promotion 2021-2022

لَهُمْ صَلَواتٌ مِّنْ رَبِّكَ
وَإِنَّكَ لَعَلَّاهُ تَنبِئُ

بِالَّذِينَ هُمْ يُعْبَدُونَ
لَهُمْ أَجْرٌ كَثِيرٌ
وَلَهُمْ فِيهَا مَنَازِلُ مُتَجَلِّدِينَ
فِي الْغَلَقِ أَزْمِنًا لَّهُمْ فِيهَا
مَنَازِلُ مُتَجَلِّدِينَ فِي الْغَلَقِ
أَزْمِنًا لَّهُمْ فِيهَا مَنَازِلُ
مُتَجَلِّدِينَ فِي الْغَلَقِ



UNIVERSITE DE TEBESSA



REMERCIEMENTS

- لقوله عزوجل "ولان شكرتم لازيدنكم" سورة ابراهيم(7)
- لقوله صلى الله عليه وسلم "من لم يشكر الناس لم يشكره الله"

Nous remercions Dieu par-dessus tout Puissant pour nous donner l'esprit et les moyens d'en arriver là

La connaissance, parce qu'elle nous a donné à tous la capacité physique et morale de Fais cet humble travail

Alors je vous remercie beaucoup

À tous les professeurs qui m'ont aidé à atteindre ce niveau « BENZIAT Hamza ; BOUZNZNA Abdelellali ; KRIM Mansour ; AOUATI Mourad Salim ; AMIRACH Abdelkrim ; Laraba Muhammad »

À : **Mr Laraba Muhammad** pour sa supervision et Disponibilité et écoute. Ainsi que pour ses conseils et son aide très précieuse

Et son soutien et moi avons eu un certain bien et soutien tout au long de la période de réalisation de ce travail malgré sa préoccupation et à tous les professeurs de valorisation des ressources minérales

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à **mes parents, ma famille** en particulier et mes proches en général pour leur soutien

Je remercie également **le personnel de la Fondation CETIM** pour leur aimable accueil et leur aide pendant la période d'attente,

Je tiens à remercier sincèrement tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils leur ont fait

Accepter le jugement pour ce travail. Leurs commentaires et critiques et

Toutes les questions sont encourageantes pour continuer ce travail.

Merci pour votre précieuse amitié aux étudiants en génie minier spécialisé dans valorisation des ressources minérales »: **Karima Brakni, Abdel wahhab Seddiki, Moussa Takoua, Oussama Ghoul, Ala Atmania, Bouras Amin. Lot 2022/2021.**

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaborer:

MERCI





Dédicaces

Je suis très heureuse de dédier cet humble travail à mes proches:

Source de mes efforts ; Mes parents que j'adore. Et mes fidèles compagnons à chaque instant et mes merveilleux frères (Oussama, Bahaa Eddine, Aziz) mes bien-aimés et mes compagnons (Meriem ; Assia : Afaf ; Kawthar ;....Etc.)

Ma chère famille, des plus grands aux plus jeunes (grands-parents, oncles, tantes, tantes, oncles et leurs enfants ...etc.)
tous ceux que ma mémoire a portés et qui n'ont pas porté mon journal

RESUME

- Dans cette étude, des matériaux cimentaires ont été élaborés à partir de déchets de verre en remplaçant 5% ,10% et 20% de sable et en le remplaçant par l'équivalent de poudre de déchets de verre. Et étudier les propriétés de ce béton par rapport à un béton de référence

Mots clés : matériaux cimentaires ; déchets de verre.

ABSTRACT

- In this study, cementations materials were made from glass waste by replacing 5%, 10% and 20% sand and replacing it with the equivalent of glass waste powder. And study the properties of this concrete compared to a reference concrete.

Key words: cementations materials; glass waste.

نبذة مختصرة

- في هذه الدراسة تم تصنيع المواد الإسمنتية من مخلفات الزجاج باستبدال 5% و 10% و 20% رمل واستبدالها بما يعادل مسحوق مخلفات الزجاج ودراسة خصائص هذه الخرسانة مقارنة بالخرسانة المرجعية

كلمات مفتاحية : المواد الاسمنتية ; مخلفات الزجاج .



**la table des
matières.**

La table des matières.

la table des figures

La table des tableaux

Introduction générale.....	1
Objectif de la présente étude.....	2

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

I.1Introduction.....	3
I.2 Le ciment	3
I.2.1. Définition	
I.2.2. procédé fabrication du ciment.....	3
a. Extraction et concassage.....	3
b. Préparation de cru	4
c. Cuisson.....	4
d. Broyage.....	4
I.2.3 les types des ciments.....	5
I.3 Le Verre.....	5
I.3.1 Définition.....	5
I.3.2 les types du verre	5
I.3.3 Procédé de fabrication du verre.....	6
1. 3.4 les déchets de verre.....	7
1.3.5 Utilisation des déchets du verre.....	7
I.4. Conclusion.....	8

CHAPITRE II :ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction.....	9
II.1 CETIM.....	9
II.2 Matériaux utilisés	10

II.2.1 Le ciment	10
II.2.2 Le sable et les graviers.....	11
II.2.3 L'eau.....	11
II.2.4 La poudre de verre.....	11
II.2.4.1 Préparation de la poudre de verre.....	11
II.3 Méthodes et Caractérisations.....	12
II.3.1 Méthodes d'échantillonnage (EN 932 -1).....	13
II.3.1.1 Matériels Utilisés.....	12
II.3.1.2 Mode opératoire.....	12
II.3.2 Détermination du coefficient d'aplatissement gravillon (NF EN 933-3).13	
II.3.2.1 But de l'essai.....	13
II.3.2.2 Appareillages.....	13
II.3.2.3 Mode opératoire.....	13
II.3.3 Détermination de l'Equivalent de sable (NF EN933-8).....	14
II.3.3.3 Matériel utilisé.....	14
II.3.3.4 Mode opératoire.....	15
II.3.4 Test de bleu de méthylène sur argile (NF EN933-9).....	15
II.3.4.1 Appareillage.....	15
II.3.4.3 Mode opératoire.....	16
II.3.5 Détermination de la masse volumique apparente et absolue (NF EN 1097-6).....	17
II.3.5.1 Mode opératoire.....	17
II.3.6 Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1).....	18
II.3.6.1 Appareillage.....	18
II.3.6.2 Mode opératoire.....	18
II.3.7 Détermination de la perte au feu.....	19
II.3.7.1 Définition.....	19

II.3.7.2 Principe.....	19
II.3.7.3 Mode opératoire.....	19
II.3.8 Expression des résultats	20
II.3.8 Analyses chimiques par RXF du verre.....	20
II.3.8.1 Définition	20
II.3.8.2 Principe.....	20
II.3.8.3 Préparation des perles pour analyse par fluorescence X (NF EN 196-2).....	21
II.3.9 Analyses élémentaires par Fluorescence X (XRF).....	21
II.3.9 .1 Mode opératoire	21
II.3.10 Analyses minéralogique par Diffraction Rayons X (DRX).....	22
II.3.10.1 Principe.....	22
II.3.10.2 Mode opératoire.....	22
II.4 Formulation des matériaux cimentaires à base de déchets de verre.....	23
II.4 .1 Etude de béton selon la méthode de Dreux-Gorisse.....	23
II.4.2 Formulations des matériaux cimentaires (Eprouvettes).....	30
II.4.3 Test L'affaissement au cône d'Abrams (NF EN 206-1).....	31
II.4.4 Essais mécaniques sur les matériaux cimentaires formulés.....	33
II.4.4.1 Essai de Résistance à la flexion.....	34
II.4.4.2 Essai de Résistance au fendage.....	34
II.4.4.3 Essai de Résistance à la compression.....	35
II.5 Etude pétrographique sur éprouvettes.....	36
II.6 analyses chimiques des éprouvettes	37
Conclusion.....	38

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRÉTATION

Introduction.....	39
III.1 résultats du coefficient d'aplatissement.....	39
III.2 résultats d'Essai d'équivalent de sable	40
III.3 résultats de test bleus de méthylène sur argile.....	41
III.4 Expression des masses volumiques coefficient d'absorption.....	42
III.5 résultats de l'analyse granulométrique par tamisage.....	42
III.6 Résultats d'analyse d'élémentaires effectuées par fluorescence X(XRF) du verre.....	44
III.7 Résultats d'analyse minéralogique par diffraction rayons X.....	44
III.8 Résultats d'étudier la résistance	45
III.9 Résultats d'Etude pétrographique.....	51
III.10 Résultats d'analyse d'élémentaires effectuées par fluorescence X(XRF) dès l'éprouvette.....	51
Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Références bibliographiques.....	54
Annexes.....	56

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top. The scroll is outlined in black and has three circular loops at the corners: one at the top-left, one at the top-right, and one at the bottom-left.

la table

des figures

FigureI.1 : Schéma de fabrication du ciment Portland	4
FigureI.2 : Matières premières entrant dans la composition du verre.....	7
Figure II. 1 : Situation géographique du CETIM.....	10
Figure II. 2 : Déchet de verre collecté.....	11
Figure II.3 : (A) : Concasseur à mâchoires et (B) : Broyeur utilisés.....	12
Figure II.4 : (C) : Verre concassé à 0.4mm et (D) : Verre broyé à 0.08 mm.....	12
Figure II.5 : Diviseur à couloirs utilisé.....	14
Figure II. 6:Tamisage.....	14
Figure II.7 l'Equivalent de sable.....	15
Figure II.8 : (A) Eprouvettes, (B) Machine agitatrice électrique, (C) sédimentation.....	15
Figure II.9 : Mesurage de h1/h2.....	16
Figure II.10 : Agitateur à ailettes.....	17
Figure II.11 : Préparation de la suspension.....	18
Figure II.12 : Test de bleu de méthylène.....	18
Figure II.13 : Laver les échantillons sur un tamis de 0,063 mm.....	18
Figure II.14 : Pycnomètre rempli d'eau, d'échantillon de sable, de verre et de gravier.....	19
Figure II.15 : les échantillons dans une bassine d'eau à 27°C pendant 24 heures.....	19
Figure II. 16 : Tamisage de : (A) Gravier8/25, (B) Gravier8/4, (C) Sable 0.4 et (D) Verre.....	20
Figure II.17 : Détermination de la perte au feu.....	21
Figure II.19 : Schéma de principe d'un spectromètre à dispersion en énergie massique	22
Figure II.20 : Préparation des échantillons, appareil utilisé et perle de verre obtenue.....	22
FigureII.22: Spectromètre XRF de type Axions FA.....	23
FigureII.23: Diffractomètre utilisé (X'Pert Data Collector).....	23

Figure II.25 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) « Dreux-Gorisse».....	25
Figure II. 26 La courbe granulaire de référence.....	28
Figure II.27 : Les moules utilisés	31
Figure II. 28 Mesurer la quantité de poudre de verre.....	32
Figure II. 29 Mesurer la quantité de eau et le ciment et le sable et les gravillons.....	32
Figure : II.30 malaxeur électrique(A) ; mélangé le béton(B).....	32
Figure II. 31 : Cônes d'Abrams.....	33
Figure II.32 : L'affaissement au cône d'abrams.....	33
Figure II.33 moulage le béton(A) la table vibrante(B) les moules final de béton(C).....	34
Figure II.34 (A) éprouvette (B) stocké dans un bassin régulier.....	34
Figure II.35 teste de flexion.....	35
Figure II 36 : Chargement de l'éprouvettes et allure des contraintes σ_{xx} dans la section verticale lors de l'essai de traction indirecte appelé essais de fendage...35	35
Figure II.37 : Teste de compression.....	36
Figure II.38 : Testeur de pression de béton de type CYBER-TRONIC.....	36
Figure II.39 : Essais de résistance de fendage (A), de flexion (B) et de compression (C).....	37
Figure II. 40 : L'échantillon préparé pour l'étude pétrographique.....	37
Figure II.41 microscope optique utilisé	37
Figure III.1 : la courbe granulométrique de sable et le verre et les gravillons...42	42
Figure III.2 : Diffractogramme de poudre de verre.....	43
Figure III.3 : Graphique des Résistances à 7jours.....	45
Figure III.4: la courbe des résistances à 7jours.....	45
Figure III.5 : Graphique des résistances à 28jours.....	47
Figure III.6 : la courbe des résistances à 28jours.....	48
Figure III.7 : Micrographie d'éprouvette de 0%.....	49

Figure III.8	Micrographie d'Eprouvette avec ajout de poudre de verre 5%.....	49
Figure III.9	Micrographie d'Eprouvette avec ajout de poudre de verre 10%.....	50
Figure III.10	Micrographie d'Eprouvette avec ajout de poudre de verre 20%.....	50

A decorative border resembling a scroll, with a thick black line and rounded corners. The scroll starts at the top right, goes left, then down, then right, and finally down again. The text is centered within the scroll's frame.

La table

des

tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1: Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.....	5
Tableau I.2 : Types de verre, composition chimique et domaines d'utilisation....	6
Tableau II.1 : Propriétés physiques.....	10
Tableau II.2 : Propriétés mécaniques.....	11
Le tableau II.3 : Evaluation d'ouvrabilité par référence à l'affaissement ou cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S (Dreux-Gorisse).....	23
Tableau II.4 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G. ces valeurs supposent que le serrage de Béton, sera effectué dans bonnes conditions (Dreux-Gorisse).....	26
Le tableau II.5 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment (Dreux-Gorisse).....	27
Tableau II.6 : Compacité du béton en fonction de D max, de la consistance et du serrage (Dreux-Gorisse).....	28
Tableau II.7 : Les dosages de verre.....	30
Tableau II.8 Matériaux nécessaires de chaque éprouvette.....	31
Tableau III.1 Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées de Gravillon 4/8.....	39
Tableau III.2 Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées de Gravillon 8/25.....	40
Tableau III.3 résultat d'essai d'équivalent de sable.....	40
Tableau III.4 : résultats de test bleus de méthylène sur argile.....	41
Tableau III.5. La masse volumique et du coefficient d'absorption.....	42
Tableau III.6 la composition chimique de poudre de verre.....	43
Tableau III.7 Résultats de Résistance à compression 7jours.....	45
Tableau III.8 Résultats de Résistance à flexion 7jours.....	45
Tableau III.9 résultats de test de Résistance à fendage 7jours.....	46
Tableau III.10 Résultats de Résistance à compression 28jours.....	48
Tableau III.11 : Résultats de Résistance à flexion 28jours.....	48

Tableau III.12 : Résultats de test de Résistance à fendage 28jours.....	49
Tableau III.13 : la taille des porosités d'éprouvette de référence0%.....	51
Tableau III.14 la taille des porosités d'éprouvette avec ajout de poudre de verre 5%.....	51
Tableau III.15 la taille des porosités d'éprouvette avec ajout de poudre de verre 10%.....	52
Tableau III.16 la taille des porosités d'éprouvette avec ajout de poudre de verre 20%.....	51
Tableau III.17 : La composition chimique des éprouvettes pour 28jours.....	51
Tableau III.18 : La composition chimique des éprouvettes pour 7jours.....	51

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le plus ancien matériau composite. Il est fabriqué à partir d'un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes

Deuxième matière la plus utilisée après l'eau dans le monde, Le béton (matériau cimentaire) joue un rôle primordial dans la vie économique d'un pays. Ses caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être améliorées en ajoutant d'autres ajouts tels que les déchets hospitaliers, les déchets de verre, les fumées de silice, les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes...etc.

Le verre possède plusieurs caractéristiques qui autorisent des utilisations dans des domaines de grande diffusion (vitrage, bijouterie, optique). Le verre est aussi un matériau de construction dans l'architecture et dans l'industrie automobile.

Le verre peut être recyclé, l'objectif principal de ce recyclage est la protection de l'environnement et la valorisation des déchets ménagers. En recyclant le verre, on évite la mise en décharge.

Dans ce cadre scientifique, cette étude visera à développer des éprouvettes en bétons en utilisant la poudre de verre finement broyée comme ajout et observer expérimentalement ses comportements sous l'effet des contraintes physiques et mécaniques.

Le but de cette étude étant aussi de trouver une solution à l'utilisation de déchets de verre, et éventuellement d'ouvrir une fenêtre vers la commercialisation d'un béton basé sur la poudre de verre.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Il est organisé de la façon suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique en présentant les différentes étapes de fabrication du ciment, l'importance de recyclage des déchets de verre et leurs utilisations comme ajouts dans certaines industries.
- Le Deuxième chapitre est consacré à la présentation du matériel et des méthodes utilisées pour la caractérisation des échantillons et la formulation des éprouvettes pour les essais physiques et mécaniques.
- Le Troisième chapitre est réservé aux différents résultats d'analyses obtenus tout en présentant l'essentiel des discussions et des interprétations concordantes.

OBJECTIF

Objectif de la présente étude

L'objectif essentiel la présente étude

- D'élaborer des matériaux cimentaires à base de déchets de verre en remplaçant un pourcentage de sable par l'ajout de poudre de déchets de verre;
- De minimiser les déchets de verre jetés dans les décharges et de minimiser aussi les quantités consommées du sable pour bétons ;
- D'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des bétons.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Les recherches présentées dans ce chapitre sont destinées à collecter toutes les connaissances en ce qui concerne le ciment et le verre ; on illustrera la méthode de fabrication du ciment à partir de la matière première jusqu'à son utilisation, ainsi que la méthode de fabrication du verre jusqu'à sa fin de vie, sa collecte en tant que déchets, son impact environnemental et son réutilisation comme ajout dans le béton.

I.2 Le Ciment

I.2.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment conforme à la présente norme, appelé ciment CEM, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité de volume à long terme.

Le durcissement hydraulique du ciment CEM est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tel que, par exemple, les aluminates. Dans les ciments CEM, la somme des quantités relatives d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit représenter une proportion au moins égale à 50 % en masse, lorsqu'elles sont déterminées selon IEN 196-2.

Les ciments CEM sont constitués de différents matériaux et sont de composition statistiquement homogène du fait d'une assurance qualité couvrant les processus de production et de manutention. Le lien entre ces processus de production et de manutention et la conformité du ciment à la présente norme est défini dans IEN 197-2. (NA 442 :2013

مواصفة جزائرية) NORME ALGERIENNE)

I.2.2. procédé fabrication du ciment (Figure I.1)

a. Extraction et concassage

Le calcaire est extrait par explosif dans des carrières généralement prêtes de la cimenterie. L'argile, plus meuble, est extraite par des engins mécaniques et transportée en cimenterie. Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm (Hadj Sadok, A)

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

b. Préparation de cru

Un mélange homogène d'argile et de calcaire est réalisé. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proche de 80 % de calcaire et 20% d'argile. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200 microns. La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique ou mécanique. Le produit obtenu est appelé « le CRU ». (Hadj Sadok, A)

c. Cuisson

Réalisée dans des fours rotatifs à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation. (Hadj Sadok, A)

d. Broyage

Le Clinker Portland est additionné de gypse et éventuellement d'ajouts cimentaires (Laitier, pouzzolane, calcaire,...) et est broyé en poudre fine d'une granulométrie inférieure à 80µm, c'est le ciment Portland. (Hadj Sadok, A)

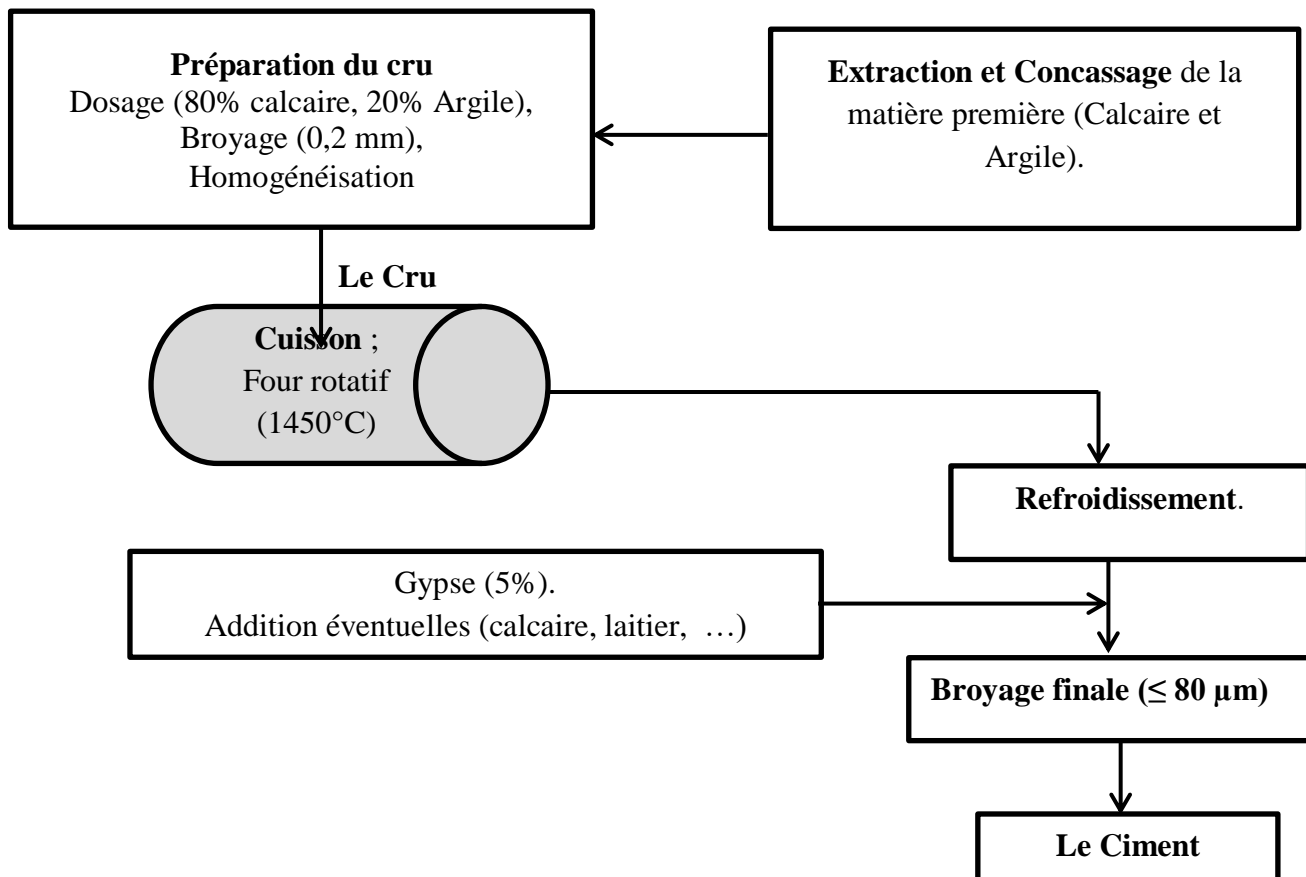


Figure I.1 : Schéma de fabrication du ciment Portland. (Hadj Sadok, A)

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.3 Les types des ciments

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- ✓ Résistances mécaniques
- ✓ Résistance à une attaque physique ou chimique
- ✓ Mise en œuvre particulière.

Il existe de nombreux types de ciment, notamment : Ciment courants normalisé à la norme NF P15_301. Le tableau N 01 présente les différents types de ciment.

Tableau I.1: Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301. (Hadj Sadok, A)

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100	----	0 à 5%
CEM II /A CEM II /B	Ciment portland composé	80 à 94 65 à 79	L'un des Ajouts - 6 à 20 - 21 à 35	----
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64 20 à 34 5 à 19	-35 à 65 Laitier -66 à 80 -81 à 95	----
CEM IV/A CEM IV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 45 à 64	Pouzzolane 10 à 35 cendre ou fumée silice 36 à 55	----
CEM V/ A CEM V/ B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 20 à 39	laitier 18 à 30 et cendre 31 à 50	----

I.3 Le Verre

I.3.1 Définition

Le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance dans un verre.

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Matériau amorphe (non-cristallin) : un solide amorphe est un solide où les atomes sont dispersés sans symétrie apparente. Il n'y a pas de symétrie de translation.

Matériau cristallin : Les corps cristallins sont les plus répandus dans la nature. Un solide cristallin est caractérisé par l'ordre géométrique de la distribution des atomes dans l'espace, c'est-à-dire que les atomes sont régulièrement placés et selon un ordre géométrique bien défini appelé réseau cristallin. (SAFI Brahim)

I.3.2 Les types du verre

Le verre est entré comme matériau de base dans le domaine des matériaux de construction.

Avec le développement technologique ; plusieurs types de verre sont apparus. Figure I.2 résume les types de verre existants avec leurs compositions et leurs utilisations.

Tableau I.2 : Types de verre, composition chimique et domaines d'utilisation (J.M. Khatib, E.M. Negim, H.S. Sohl and N. Chileshe)

Type de verre	Composition(%)
Silice sodocalcique	73 silice_ 14 soude_9 chaux 3,7 Magnésie_0,3 Alumine
Borosilicate	81 de silice_ 12 d'oxyde de bore_4 de soude_3 d'alumine
Plomb (Cristal)	57 de silice-31 d'oxyde de plomb-12 d'oxyde de potassium
Aluminosilicate	64,5 Silice - 24,5 Alumine - 10,5 Magnésie - 0,5 Soude

I.3.3 Procédé de fabrication du verre

Les composés inclus dans le verre sont, selon le pourcentage de leur apport : sable de silice ou dioxyde de silicium, SiO_2 , carbonate de sodium ou carbonate de sodium, Na_2CO_3 , carbonate de calcium ou pierre Chaux, CaCO_3 en plus de certains oxydes métalliques pour obtenir certaines couleurs comme l'oxyde de chrome pour le vert et l'oxyde de soufre pour le brun. (Shi, C. and Zheng, K)

Le verre est fabriqué en fusionnant un groupe de matières premières pour former un matériau transparent ou coloré avec des caractéristiques mécaniques spécifiques. Lorsque la silice fondue se transforme en une forme visqueuse, elle a besoin d'une température élevée de 1700°C .

Pour se débarrasser des bulles d'air, du carbonate de sodium y est ajouté pour améliorer la maniabilité et en abaissant la température de fusion et en économisant de l'énergie, du carbonate de calcium est également ajouté pour réduire la viscosité. Pour éviter la solubilité

CHAPITRE I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

dans l'eau chaude et lui donner une durabilité suffisante. (G.Vijayakumar, H.Vishaliny, D. Govindarajulu)



Figure I.2 : Matières premières entrant dans la composition du verre (I.A.Kassem, H. I.Al-khatib, I.S.Fathi)

1.3.4 Déchet de verre

Les multiples usages du verre tels que les emballages en verre, les déchets d'usines de verre, le verre issu de la démolition des bâtiments, le verre des voitures et autres en font l'un des déchets les plus productifs des décharges publiques, et l'occupation de grands espaces contribue à son tour à une augmentation de la pollution de l'environnement, en plus de cela il n'est pas dégradé dans le temps du fait de la stabilité de ses propriétés chimiques.

1.3.5 Utilisation des déchets de verre

- Les déchets de verre peuvent être recyclés afin que le verre puisse être utilisé dans l'industrie des arts et de l'artisanat comme les antiquités et le verre décoratif.
- Le verre peut être recyclé à nouveau, mais cela pollue l'environnement en émettant du dioxyde de carbone
- Les déchets de verre peuvent être recyclés afin d'être utilisés comme alternative au sable, qui est un ingrédient clé dans de nombreuses industries.

I.5 Conclusion

Les propriétés du verre font partie des propriétés distinctives d'un matériau pouvant être utilisé dans la construction et le processus de construction.

Comme le verre est un matériau qui n'absorbe pas l'eau, ce qui en fait l'un des matériaux les plus durables et résistants aux impacts de la nature, cette propriété est proche de sa dureté élevée, ce qui lui confère une grande résistance à la corrosion et à la chaleur.

Ces propriétés particulières du verre, en plus de ses propriétés de silicate, ont encouragé la discussion sur l'utilisation du verre dans le béton pour étudier son effet sur les propriétés du béton à court et à long terme.

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE

ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction

Les chercheurs s'intéressent toujours à améliorer les propriétés chimiques, physiques et mécaniques des bétons par l'utilisation des ajouts. Ces derniers sont considérés dans la plupart des cas des rejets inutiles, comme par exemple ; les déchets hospitaliers, les déchets de verre, les fumées de silice, les laitiers de haut fourneau, les cendres volantes ...etc.

L'utilisation de la poudre de verre comme ajout dans le cadre de l'amélioration des bétons ne cesse de s'accroître. Les auteurs (Zidol A., 2009, Isabelle Fily-Paré, 2015 et Bahia Arab et. al, 2017) ont utilisé la poudre de verre afin de trouver des solutions efficaces qui peuvent être contribué à améliorer les caractéristiques des bétons.

Dans cette partie ; nous avons réalisé une caractérisation des matériaux utilisés, des essais physiques et mécaniques sur des matériaux cimentaires (bétons) basées sur l'ajout de la poudre de verre.

II.1 CETIM

Le CETIM situé dans la wilaya de Boumerdes (Figure II.1) est l'abréviation désignant Le Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction.

L'entreprise sous sa dénomination actuelle a été créée en Octobre 1998. Cependant, le CETIM a existé sous d'autres formes et appellations depuis 1965. Il a hérité des entreprises devancières d'une expérience et d'un savoir-faire engrangés durant plus de 50 années d'activités.

L'Organisme Algérien d'Accréditation atteste que le Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction (CETIM) Satisfait aux exigences de la norme ISO/CEI 17025 version 2005 et aux règles d'application d'ALGERAC pour les activités d'essais suivants : Essais sur matériaux (Béton, Granulats, Ciment, Céramiques et Produits Rouges) ; Essais physico-chimiques sur Ciment.

Le CETIM comporte 6 Unités techniques:

- **Unité technique 01** : Laboratoire Ciment
- **Unité technique 02** : Laboratoire Chimie
- **Unité technique 03** : Laboratoire Bétons
- **Unité technique 04** : Laboratoire Céramiques
- **Unité technique 05** : Laboratoire Produits Rouges
- **Unité technique 06** : Laboratoire Minéralogie Pétrographie

L'accréditation suivant la norme ISO/CEI 17025 est la preuve que le laboratoire répond aux exigences techniques et aux exigences du système de management, nécessaires pour fournir les résultats techniquement valides.

ETUDE EXPERIMENTALE

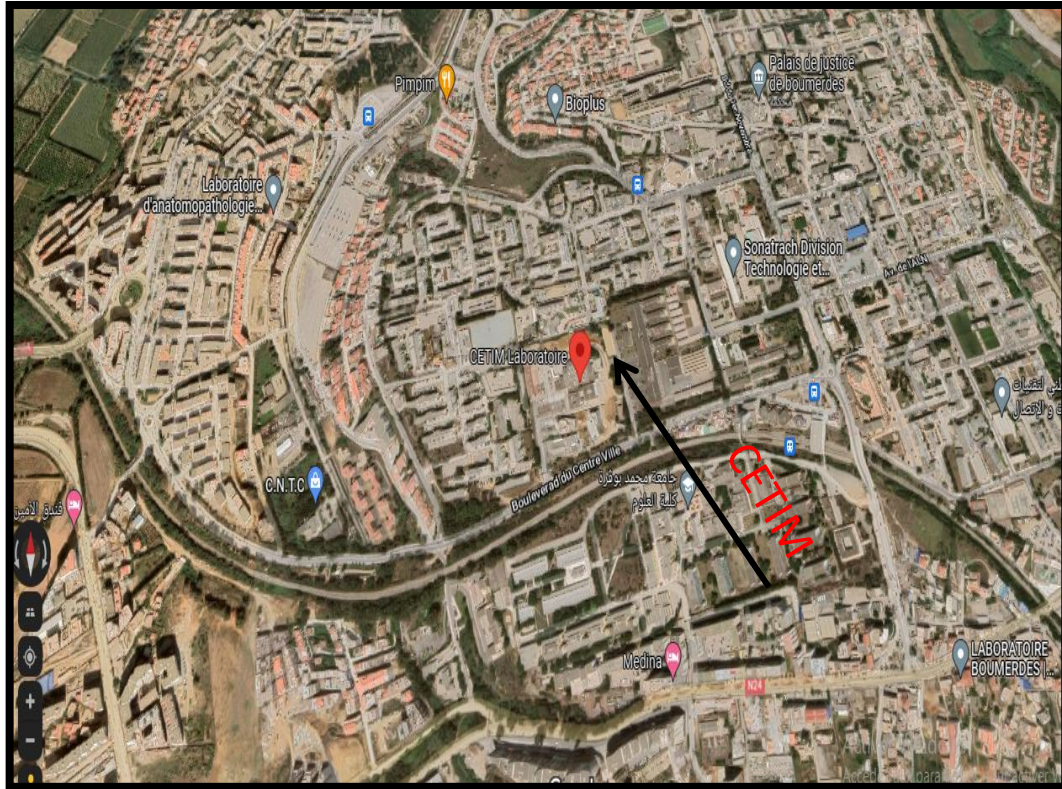


Figure II. 1 : Situation géographique du CETIM

II.2 Matériaux utilisés

II.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland 42.5 produit par la cimenterie GICA située dans la commune d'Elma labiod, wilaya d'Tébessa. Les propriétés physiques et mécaniques de ce ciment sont reporté dans le tableau II.1 et II.2.

Tableau II.1 : Propriétés physiques

Consistance normalisée (%)	H ₂ O	28.4
Tempe de prise (mm)	Début	170
	Fin	250
Stabilité (mm)	Froid	/
	Chaud	0.0

Masse volumique absolue du ciment (g/cm ²)	3.05
Finesse suivent la méthode Blaine (cm ² /g)	4070

ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques

Echéances en jours	Résistance à la flexion (N/mm ²)	Résistance à la compression (N/mm ²)
02jours	4.6	23.8
28jours	7.5	44.5

II.2.2 Le sable et les graviers

Le sable de 0/4 et les graviers de 8/4 et de 8/25 sont préparés, testés. Ces matériaux sont des produits de la carrière de Djebel Loussalit située à environ 4km au Nord-Est du chef-lieu de la commune d'Ain Fekroune, et 2km à l'Ouest de la Route national N° 10 reliant Oum Bouaghi à Constantine.

II.2.3 L'eau

Pour la confection du béton, nous avons utilisé l'eau du robinet (eau potable) pour le gâchage de béton

II.2.4 La poudre de verre

La poudre de verre est obtenue par la collecte des déchets de verre.



Figure II. 2 : Déchet de verre collecté

II.2.4.1 Préparation de la poudre de verre

Les déchets de verre sont collectés, concassés et broyés afin d'obtenir une poudre de verre. La grande partie de cette dernière est utilisée dans la préparation des formulations destinées aux essais physiques et mécaniques tandis que le reste est destiné à la caractérisation. Ces essais ont été réalisés au niveau de centre d'étude CETIM. Le Concasseur utilisé est un concasseur à mâchoires de type **BB 200 Retch** (Figure II.3-A) ajusté à une dimension égale à la dimension des grains de sable utilisés dans le mélange de béton (0.4mm). Pour le broyage on a utilisé un broyeur de finissage (≤ 0.08 mm) de type **JC2000** (Figure II.3-B).

Les produits concassés et broyés sont représentés dans la figureII.4.

ETUDE EXPERIMENTALE

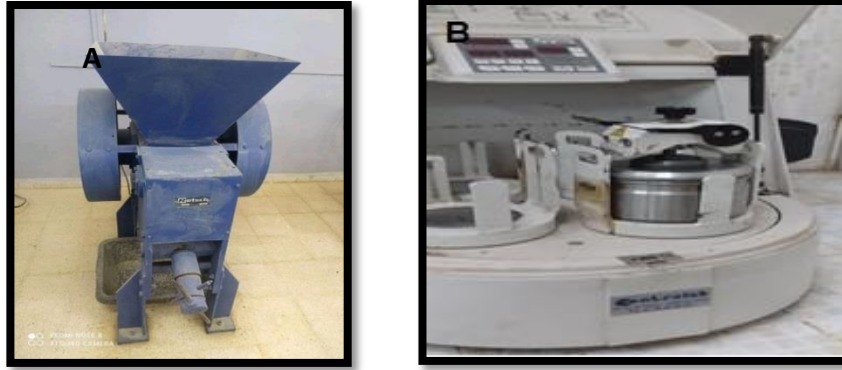


Figure II.3 : (A) : Concasseur à mâchoires et (B) : Broyeur utilisés

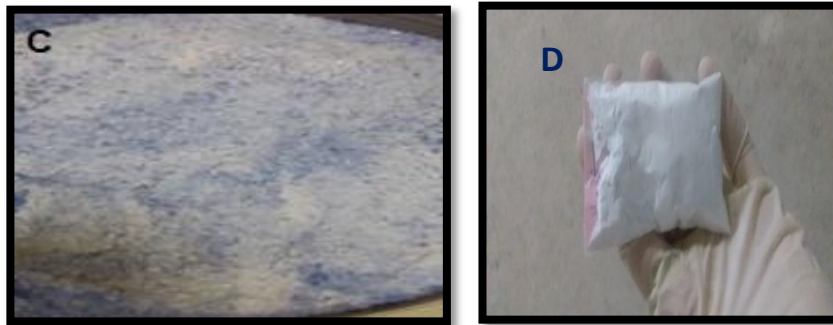


Figure II.4 : (C) : Verre concassé à 0.4mm et (D) : Verre broyé à 0.08 mm

II.3 Méthodes et Caractérisations

II.3.1 Méthodes d'échantillonnage (EN 932 -1)

II.3.1.1 Matériels Utilisés

Pour réaliser l'opération de l'échantillonnage ; un Diviseur échantillonneur a été utilisé. Le nombre de couloirs du diviseur doit être pair et au moins égal à huit. Il convient que la largeur des couloirs soit au moins égale à deux fois la plus grande dimension des granulats pour éviter que les granulats ne puissent s'écouler.

II.3.1.2 Mode opératoire

Réduction d'un échantillon global à l'aide d'un diviseur à couloirs : Placer l'échantillon global dans le diviseur à couloirs (figure II.5) et les deux autres bacs en position, verser les granulats du grand côté du bac en direction de l'axe médian du diviseur, les granulats qui tombent dans l'un des deux autres bacs, répéter l'opération autant de fois que nécessaire pour arriver à obtenir des échantillons de taille désirée.

Si l'échantillon global est trop volumineux pour l'entrer dans le bac du diviseur, on le divise en sous échantillons plus petits, réduire chacun par le même nombre de stades de division et combiner les sous échantillons réduits.

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure II.5 : Diviseur à couloirs utilisé

II.3.2 Détermination du coefficient d'aplatissement gravillon (NF EN 933-3)

II.3.2.1 But de l'essai

La détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 80 et 4mm.

II.3.2.2 Appareillages

- Tamis de: 80 ; 63, 50, 40, 31.5, 25, 20, 16, 12.5, 10, 8 ; 6.3 ; 5 et 4 mm ;
- Balance ;
- Vibreur.

II.3.2.3 Mode opératoire

Nous assemblons les tamis de bas en haut, nous mettons un conteneur inférieur pour collecter les amandes, on déverse la masse de l'échantillon d'essai dans le tamis supérieur, ensuite on ferme le tamis supérieur par un couvercle pour éviter la poussière.

En fin de l'opération ; on réalise le pesage du rejet partiel de chaque tamis.



Figure II.6: Tamisage

ETUDE EXPERIMENTALE

II.3.3 Détermination de l'Equivalent de sable (NF EN933-8)

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'équivalent de sable exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable. L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton compact. L'excès de fines est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C ce qui fait diminuer la résistance

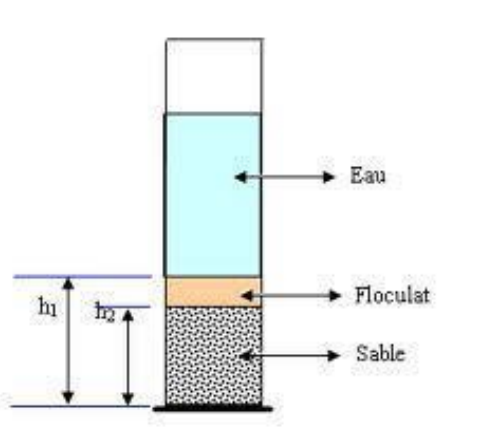


Figure II.7 l'Equivalent de sable

Le lavage à l'eau ne donnerait pas des résultats précis et fidèles lors de l'essai. On utilise une solution spéciale qui permet la floculation des éléments fins et en régularise la sédimentation.

La solution est composée de :

- 111 g \pm 1 g de chlorure de calcium,
- 480 g \pm 5 g de glycérine,
- 12 à 13 g de solution aqueuse de formaldéhyde.

La solution est à compléter à 5 litres de l'eau distillée pour être conservée entre 2 à 4 semaines.

II.3.3.3 Matériel utilisé

- Eprouvettes, en matière plastique, avec 2 traits repères
- Entonnoir, tamis, spatule, balance, thermomètre, récipients
- Machine agitatrice électrique ou manuelle,
- Réglet de mesure et piston taré

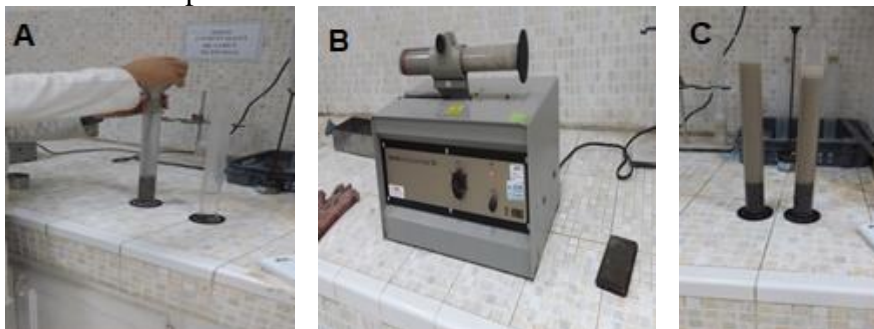


Figure II.8 : (A) Eprouvettes, (B) Machine agitatrice électrique, (C) sédimentation

ETUDE EXPERIMENTALE

II.3.3.4 Mode opératoire

1. Remplir les 2 éprouvettes de solution lavante jusqu'au 1^{er} repère, ensuite verser la quantité de sable tarée ;
2. Eliminer les bulles d'air en frappant chaque éprouvette contre la paume de la main et laisser reposer 10 minutes ;
3. boucher les éprouvettes et les agiter d'un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes) ;
4. laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon, lavant les parois intérieures de toutes les éprouvettes et laver la masse du sable en y faisant remonter et descendre lentement le tube ainsi les fines remontent en surface, on ferme le robinet lorsque la solution atteint le 2^{ème} trait (supérieur) et on sort le tube laveur ;
5. on laisse reposer 20 minutes en évitant toute vibration ;
6. on mesure à vue les hauteurs h_1 et h_2 (h_2 est entachée d'incertitude) pour effectuer la mesure de façon plus précise, on introduit le piston taré à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et on l'immobilise au contact du sable,
7. mesure h_2' ;
8. noter la température.



Figure II.9 : Mesurage de h_1/h_2

II.3.4 Test de bleu de méthylène sur argile (NF EN933-9)

II.3.4.1 Appareillage

L'appareillage à utiliser est le suivant : Une burette, du papier-filtre, une tige de verre, un agitateur à ailettes, capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre 600 tr/min avec 3 ou 4 ailettes de 75 mm de diamètre. Une balance, un chronomètre, un tamis, avec des ouvertures de 2 mm, un bécher d'une capacité d'environ 1l à 2l, une fiole d'une capacité de 1l, une étuve ventilée, un thermomètre, une spatule, un dessiccateur.

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure II.10 : Agitateur à ailettes

II.3.4.3 Mode opératoire

Un échantillon de granulat est préparé de telle sorte qu'il contienne au moins 200 g de la fraction 0/4 mm. Il est séché à 110 °C, refroidi à la température ambiante, puis passé au tamis de 2 mm et toutes les particules retenues au tamis de 2 sont éliminées. L'échantillon résiduel est ensuite pesé (en grammes) (M1).

Pour préparer la suspension, il convient de verser 500 ml d'eau distillée ou d'eau déminéralisée dans le bécher et ajouter l'échantillon séché en remuant bien avec la spatule.

- Réalisation de l'essai

Agiter la solution à la vitesse de 600 tr/min pendant 5 min, puis agiter continuellement à 400 tr/min pendant la poursuite de l'essai.

Après chaque injection de colorant à l'aide de la burette (5ml toutes les minutes), le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre disposé au fond du bécher. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleu foncé, entouré d'une zone humide incolore).

La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm. Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleu clair persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central. Le point final doit être confirmé en répétant le test à la tache toutes les minutes pendant 5 min sans ajout de solution de colorant.

ETUDE EXPERIMENTALE

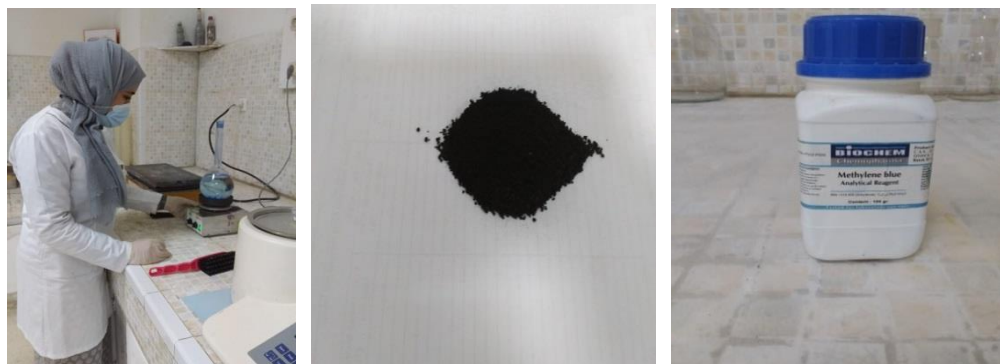


Figure II.11 : Préparation de la suspension



Figure II.12 : Test de bleu de méthylène

II.3.5 Détermination de la masse volumique apparente et absolue (NF EN 1097-6)

II.3.5.1 Mode opératoire

- Préparation d'échantillons de sable, de gravier de de verre.
- Laver les échantillons sur un tamis de 0,063 mm
- Mesurer les masses volumiques des échantillons de sable, de verre et de gravier
- On émerge le pycnomètre rempli d'eau et de sable, de verre et de gravier dans une bassine d'eau à 27°C pendant 24 heures.
- Peser à nouveau les échantillons
- Séparer les échantillons de l'eau
- Nous le mettons au four
- Mesurer la masse des échantillons après séchage
- Mesurer la masse d'un pycnomètre rempli d'eau



Figure II.13 : Laver les échantillons sur un tamis de 0,063 mm

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure II.14 : Pycnomètre rempli d'eau, d'échantillon de sable, de verre et de gravier



Figure II.15 : les échantillons dans une bassine d'eau à 27°C pendant 24 heures.

II.3.6 Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1)

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, ...). Habituellement, l'analyse granulométrique fournit les proportions de grains de différents diamètres ; cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation; En fonction de la dimension et du nombre des grains composant un granulat, on dénomme les granulats, fines, sables, gravillons ou caillou. Cependant, pour un granulat donné

II.3.6.1 Appareillage

- Tamis ;
- Balance ;
- Tamiseuse.

Un tamis est une grille de maillage plus ou moins fin, servant à trier les particules solides, fixée sur un cadre ; avec différent diamètre.

Les diamètres de la série de tamis utilisée sont de : (40, 31.5, 25, 20, 16, 12.5, 10, 8, 6.3, 5, 4, 3.15, 2.5, 2, 1.25, 1, 0.63, 0.5, 0.315, 0.25, 0.16, 0.125, 0.08, 0.063mm).

II.3.6.2 Mode opératoire

- a) Préparation de l'échantillon qui sera analysé. Le choix du matériau imposera aussi le choix des tamis. L'échantillon choisi devra être sec ;

ETUDE EXPERIMENTALE

- b) Monter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant en mettant le tamis avec la plus grosse maille en haut et le tamis avec la plus petite maille en bas, en finissant avec le fond de tamis et le couvercle de la colonne ;
- c) Verser le matériau sec dans le tamis ;
- d) Fermer le couvercle de la colonne de tamis ;
- e) Secouer mécaniquement la colonne de tamis ;
- f) Reprendre un à un les tamis en ajoutant le fond et le couvercle le tamisât intégrant le tamis suivant et le refus restant dans le tamis initial ;
- g) Déterminer à l'aide de la balance électronique la masse de chaque refus ;
- h) Réaliser cette opération sur tous les refus y compris le matériau dans le fond de la colonne de tamis ;
- i) Remplir le tableau correspondant avec les résultats des masses obtenues et calculer les pourcentages de refus et tamisât pour chaque tamis.

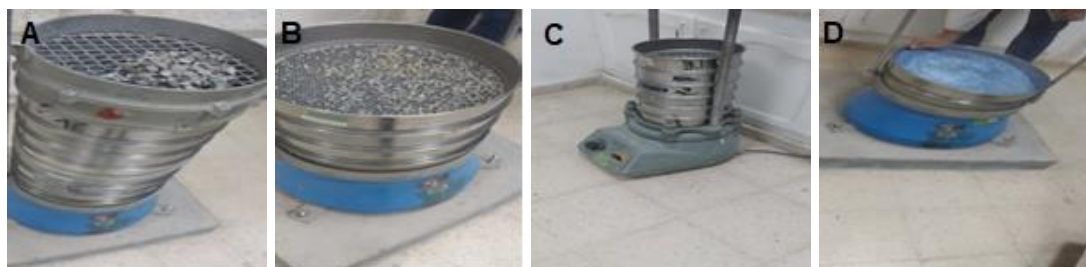


Figure II. 16 : Tamisage de : (A) Gravier 8/25, (B) Gravier 8/4, (C) Sable 0.4 et (D) Verre

II.3.7 Détermination de la perte au feu

II.3.7.1 Définition

Est une Variation de masse résultant de chauffage d'un échantillon dans des conditions spécifiées. La perte au feu s'exprime en pourcentage en masse de la matière sèche.

II.3.7.2 Principe

La perte au feu est déterminée en atmosphère oxydante (l'air ambiant) après calcination à $(975 \pm 25) ^\circ\text{C}$ le gaz carbonique et l'eau sont chassées, les éléments éventuellement présents sont oxydés.

II.3.7.3 Mode opératoire

- Peser dans un creuset préalablement calciné et taré (1 ± 0.05) g de verre (M1), Placer le creuset couvert dans le four électrique dont la température est stabilisé

ETUDE EXPERIMENTALE

(975±25) °C. Après 1h de chauffage, retirer le couvercle et laisser dans le four pendant 30 min supplémentaires ;

- Refroidir le creuset dans le dessiccateur à la température ambiante, Peser et déterminer la constance de la masse (M2) ;



Figure II.17 : Détermination de la perte au feu

II.3.8 Expression des résultats

La perte au feu brute est calculée par la formule suivante:

$$\text{PAF brut} = [(M1-M2) \times 100] \%$$

Où :

M1 est la masse de la prise d'essai initiale, en grammes ;

M2 est la masse de la prise d'essai calcinée, en grammes ;

$$[(19.5789-19.5747) \times 100] = 0.42 \%$$

La perte au feu brute de verre est **0.42%**

II.3.8 Analyses chimiques par RXF du verre

II.3.8.1 Définition

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un Échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux (Merle HAL 2016).

II.3.8.2 Principe

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon.

ETUDE EXPERIMENTALE

L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique (Merle HAL 2016).

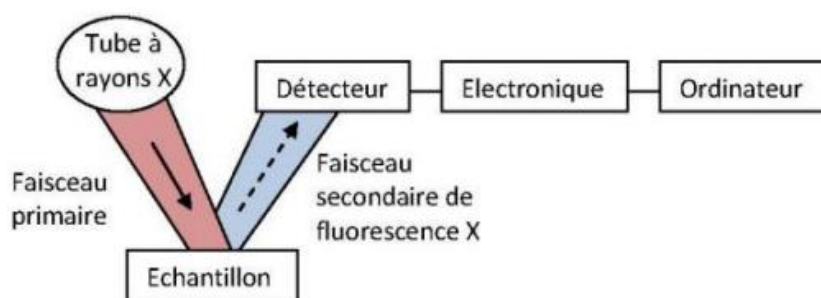


Figure II.19 : Schéma de principe d'un spectromètre à dispersion en énergie massique (Merle HAL 2016).

II.3.8.3 Préparation des perles pour analyse par fluorescence X (NF EN 196-2)

Un échantillon de verre de 1g et un échantillon de béton de 1 gramme ont été broyés et tamisés séparément jusqu'à 0.08mm ; ensuite chaque échantillon est mélangé à 5 g de flux X, puis ils sont chauffés dans un appareil de type Perles à une température d'environ 1200 °C. A cette température ; l'échantillon fond, le produit obtenu est versé dans un moule qui lui donne la forme finale (perles).

Le verre et le béton formés seront viables pour l'analyse une fois le refroidissement est terminé.



Figure II.20 : Préparation des échantillons, appareil utilisé et perle de verre obtenue

II.3.9 Analyses élémentaires par Fluorescence X (XRF)

II.3.9.1 Mode opératoire

Afin de déterminer les éléments chimiques qui composent de verre utilisé ; un Spectromètre XRF de type **Axios FAST** a été utilisé.

Mettre la perle dans le porte échantillon de l'appareil, puis on referme bien le portail et on active la machine via l'ordinateur.

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure II.22: Spectromètre XRF de type Axions FA

II.3.10 Analyses minéralogique par Diffraction Rayons X (DRX)

II.3.10.1 Principe

La méthode générale consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à regarder l'intensité de rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, l'intensité présente donc des *maxima* dans certaines directions ; on parle de phénomène de «diffraction». On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ (deux-thêta) du faisceau ; la courbe obtenue s'appelle le «diffractogramme» (*scan*).

II.3.10.2 Mode opératoire

La détermination la composition minéralogique du verre utilisé est réalisée par un diffractomètre de type **X'Pert Data Collector** (Figure II.23).

La préparation de l'échantillon a été effectuée soigneusement afin d'obtenir des bons résultats, ensuite on le met en place, puis on referme bien le portail et on active la machine via l'ordinateur.



Figure II.23: Diffractomètre utilisé (X'Pert Data Collector)

ETUDE EXPERIMENTALE

II.4 Formulation des matériaux cimentaires à base de déchets de verre

II.4.1 Etude de béton selon la méthode de Dreux-Gorisse

✓ Objectif

L'objectif essentiel est de déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier des charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable, Gravier G en kg/m^3).

Dans son ouvrage (Le nouveau guide du béton et de ses composants), JEAN FESTA **Dreux-Gorisse** justifie les règles à appliquer à une étude de béton. Elle conduit à une méthode pratique simplifiée que nous décrirons simplement sans reprendre les justifications.

✓ Dosage de constituants de béton

- Dosage en ciment 350 kg/m^3
- Critère de maniabilité : La maniabilité est caractérisée, entre autre, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (Aff), Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier ;
- Donc nous réalisons un béton mou pour faciliter les travaux, nous fixons la valeur d'affaissement dans le tableau II.3

Le tableau II.3 : Evaluation d'ouvrabilité par référence à l'affaissement ou cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S (**Dreux-Gorisse**) ANNEX1.

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	N. nombres de chocs test C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	> 60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton fluide	Léger piquage	≥ 14	< 10

- l'affaissement au cône d'Abrams est 120 mm
- Le rapporte C/E : A partir Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (**Dreux-Gorisse**).

$$C/E = 1.62$$

ETUDE EXPERIMENTALE

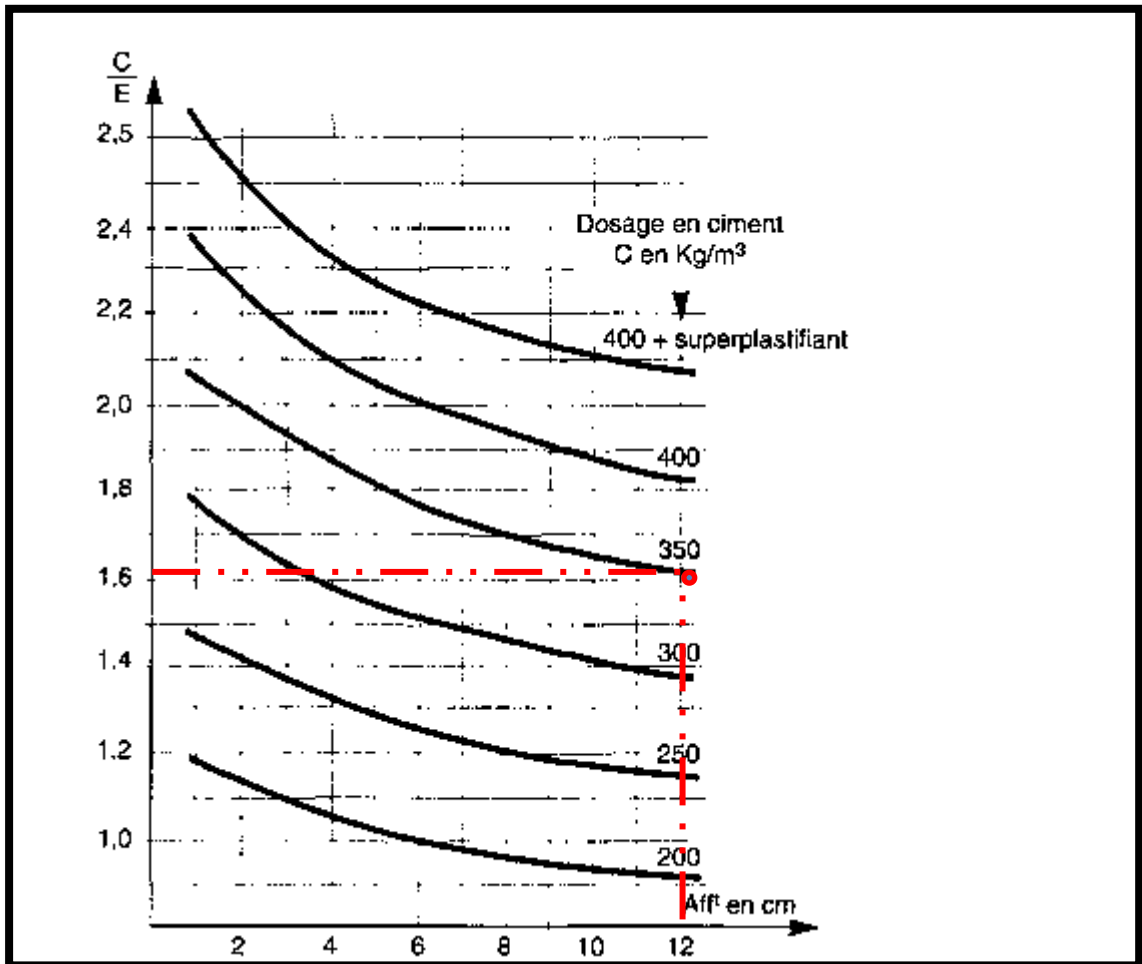


Figure II.25 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône) « Dreux-Gorisse » (voir l'ANNEX 2).

✓ La résistance du béton

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée F_c , (voir l'ANNEX 3).

- Calcul de résistance du béton selon la formule suivante :

$$F_c = G F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Où :

F_c : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en M p a.

F_{CE} : classe vraie du ciment (en kg/m^3)

C : dosage en ciment (en. Kg/m^3)

E : dosage en eau totale sur matériaux secs « en litre pour 1m^3 »

G : coefficient granulaire

ETUDE EXPERIMENTALE

Tableau II.4 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G. ces valeurs supposent que le serrage de Béton, sera effectué dans bonnes conditions (**Dreux-Gorisse**).

Qualité de granulats	Dimension D de granulats (mm)		
	Fins (D ≤ 16)	Moyen (20 ≤ D ≤ 40)	Gros (D ≥ 50)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne-Courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Les granulats utilisé est qualité de bonne courante et dimension maximale 25mm donc coefficient granulaire = 0.5

Donc : $F_c = 0.5 \times 44.5(1.62 - 0.5) = 24.9$

La résistance du béton est de **24.9 MPa**.

- Calcule de dosage d'eau selon la formule suivante :

$$\frac{C}{E} = 1.62 \text{ donc } E = \frac{350}{1.62}$$

Le Dosage d'eau égal **216 L = 216kg /m³**

✓ *Les granulats* (voir l'ANNEX 5)

- *Tracé de la courbe granulaire de référence :*

Sur un granulométrique type AFNOR « linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats », on trace une composition granulaire de référence OAB :

La droite de Dreux a pour origine le point O origine du graphe et pour extrémité le point D max caractéristique des plus gros granulats.

Le point B (à l'ordonnée 100 %) correspond à la dimension D du plus gros granulat donc :

- **O (0.063, 0)**
- **B (D_{MAX}, 100) = B(25,100)**

- Et le point A de brisure A des coordonnées ainsi définies :

En abscisse (à partir de la dimension D tamis)

- ✓ Si $D \leq 20\text{mm}$ l'abscisse est $D/2$
- ✓ Si le diamètre est $\geq 20\text{mm}$, l'ordonnée est au milieu de la fraction de gravier sur 5 mm et le module correspondant à D.

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D+K} + K_S + K_P$$

ETUDE EXPERIMENTALE

Avec :

K : est un coefficient donnée par le tableau II.5 K_S et K_p étant des coefficients correctifs définis par :

K_S (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

- $K_s : (6 M_{fs} - 15)$ avec : M_{fs} le module de finesse du sable.
- $K_s = 6 \times 3.28 - 15 = 4.8$

K_p : (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

- $K_p : +5$ à $+10$ selon le degré de la plasticité de sire

Le tableau II.5 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment (**Dreux-Gorisse**). ANNEXE 6

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluide	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
400	0	0	+ 2	- 2	-0	- 4	- 2
350	+ 2	+ 2	+4	0	+2	-2	0
300	+ 4	+ 4	+ 6	+ 2	+4	0	+2
250	+ 6	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+4
200	+ 8	+8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+6

$$Y = 50 - \sqrt{25+2} + 4.8 + 8 = 60$$

Le point A de brisure A a des coordonnées ainsi définies : A (11, 60).

ETUDE EXPERIMENTALE

Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1

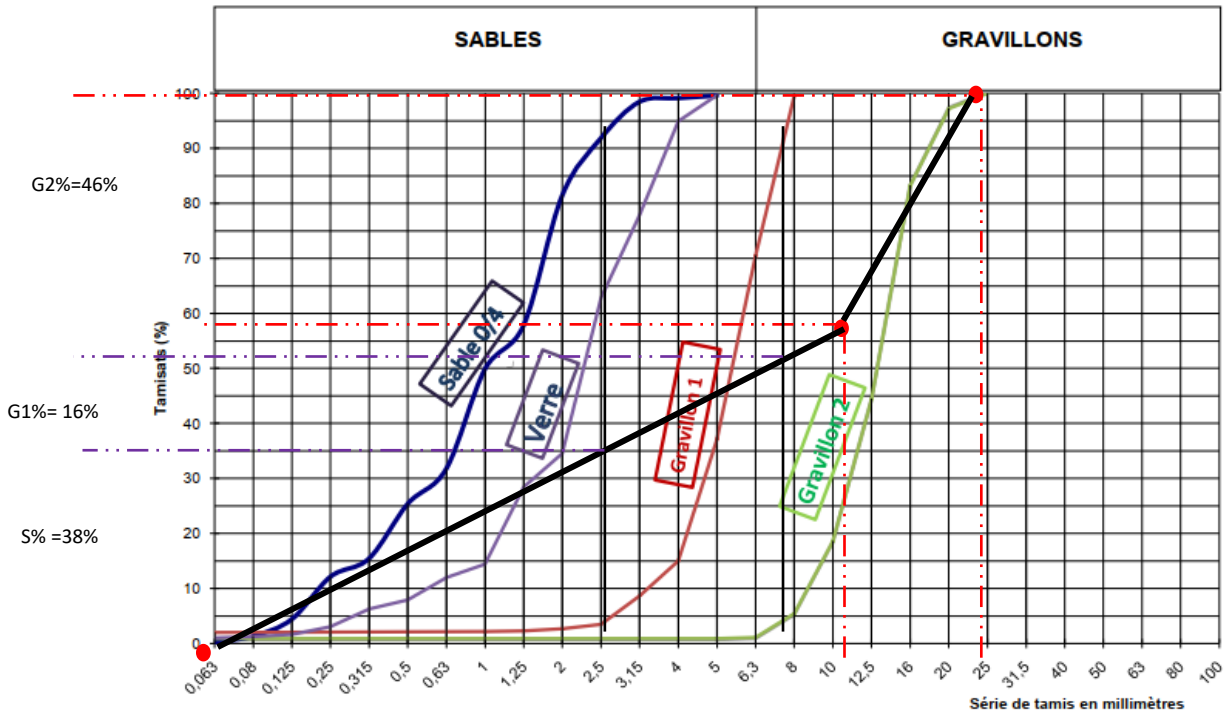


Figure II. 26 La courbe granulométrique de référence

Donc les dosages des constituants du béton sont :

- 38% de sable 0/4
- 16% de gravillon 4/8
- 46% de gravillon 8/25
- 216 L d'eau
- 350 kg/m³ de ciment.

✓ Les volumes

- Volume de ciment :
Solen la formule suivante :

$$c = C / f_{\text{ciment}}$$

$$f_{\text{ciment}} = 3.05 \quad \text{donc} \quad 350 / 3.05 = 115 \text{ L} = 0.115 \text{ m}^3$$

- **Détermination de la compacité du béton**

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tableau II.6). Des corrections (c1, c2 et c3) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des

ETUDE EXPERIMENTALE

granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tableau II.6) : $c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$. La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton : $V = (c - V_c)$ où V_c est le volume de ciment défini par $V_c = C / \rho_s(c)$ où $\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé (Dreux-Gorisse).

Tableau II.6 : Compacité du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage (Dreux-Gorisse) ANNEX 7

Consistance	Serrage	Compacité (c_0)						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=8$	$D_{max}=12.5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31.5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
Ferme (F)	Piquage	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration faible	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Piquage	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Nota : (Dreux-Gorisse)

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé ($c_1 = - 0,01$)

Sable et gravier concassé ($c_1 = - 0,03$)

* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0,03$)

* Pour un dosage en ciment $C = 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant :

$$(c_3 = (C - 350) / 5000)$$

-Puisque : $D_{max} = 25$

Donc : choisi le coefficient de Compacité est $0,828 - 0,03 = 0,798$; $C = 0,798$

- Le volume de granulat :

- Calcule le volume de granulat selon la formule suivante :

$$V = 1000 \cdot c - C$$

$$V = 1000 \times 0,798 - 115$$

Le volume de granulat est 683 m^3

ETUDE EXPERIMENTALE

✓ *les quantités :*

Le Calcul des quantités des granulats est effectuée selon la formule suivante :

$$Q = V \cdot P \cdot \rho_a$$

Avec :

V : Volume

P : Pourcentage

ρ_a : Masse volumique absolue

✓ Quantités de sable 0/4 :

$$683 \times 0.38 \times 2.69 = 698 \text{ kg/m}^3$$

✓ Quantités de gravillon 4/8 :

$$683 \times 0.16 \times 2.68 = 293 \text{ kg/m}^3$$

✓ Quantités de gravillon 8/25 :

$$683 \times 0.46 \times 2.73 = 858 \text{ kg/m}^3$$

• La composition d'un matériau cimentaire :

- Ciment = 350 kg /m³
- Sable 0/4 = 698 kg/m³
- Gravillon 4/8 = 293 kg/ m³
- Gravillon 8/25 = 858 kg/m³
- Eau = 216 kg/ m³ = 216L

✓ *Les dosages de verre*

Étude et calibrage de l'effet du verre pilé comme substitut d'une petite portion de sable. Des expériences ont été menées en ajoutant différents pourcentages de cette substance.

Le processus d'analyse sur béton est une référence, où le pourcentage de verre est 0, comme indiqué dans le tableau II.7, et La valeur de tous les matériaux inclus dans le béton est fixe à l'exception du la valeur du sable et du verre qui sont les deux variables à prendre en compte

Tableau II.7 : Les dosages de verre

Le dosage de verre	
En %	En kg
0	0
5	0.87
10	1.745
20	3.49

ETUDE EXPERIMENTALE

II.4.2 Formulations des matériaux cimentaires (Epreuves)

- *Préparation des éprouvettes*

Afin de réaliser les essais de flexion, de fendage et de compression; 56 éprouvettes en béton ont été préparées.

- *Procédures et préparation*

En utilise les moules en métal suivent :

- Une forme cubique (10 x10 x10) cm capacité 1L pour le test Résistance à compression
- Une forme rectangulaire (7 x7 x 28) cm capacité 5.6 L pour le test Résistance à flexion
- Une forme cylindrique (11 x 22) cm capacité 9L pour le test Résistance à fendage
- Une forme rectangulaire (4 x 4 x 16) cm capacité 1.04 L pour tests microscopiques et écraser la partie restante pour analyse chimiques effectuées par fluorescence X.

Nota : Essayez les moules en métal moules avec un peu d'huile pour faciliter leur séparation ultérieure.



Figure II.27 : Les moules utilisés

- *Formulations des éprouvettes*

Les Constituants nécessaires pour réaliser les formulations sont reportes dans le Tableau II.8.

Tableau II.8 Matériaux nécessaires de chaque éprouvette

Dosage de verre	0%	5%	10%	20%
Constituants	Quantité (kg)			
Ciment	8.75	8.75	8.75	8.75
Gravillon 8/25	21	21	21	21
Gravillon4/8	7.33	7.33	7.33	7.33
Sable	17.45	16.58	15.70	13.96
Poudre de verre	00	0.87	1.745	3.49
Eau	06	06	06	06

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure II. 28 Mesurer la quantité de poudre de verre



Figure II. 29 Mesurer la quantité de eau et le ciment et le sable et les gravillons

Après avoir préparé la quantité de matériaux pour chaque mélange, le béton a été mélangé dans un malaxeur électrique



Figure : II.30 malaxeur électrique(A) ; mélangé le béton(B)

II.4.3 Test L'affaissement au cône d'Abrams (NF EN 206-1)

Cet essai appelé aussi cône d'Abrams ou bien slump-test est décrit dans la norme NF EN 12350-2. Il est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm (Figure II.31) (Mat Rout)

ETUDE EXPERIMENTALE

- **Principe**

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son propre poids plus que l'affaissement sera plus grand plus que le béton sera très fluide. (Mat Rout)

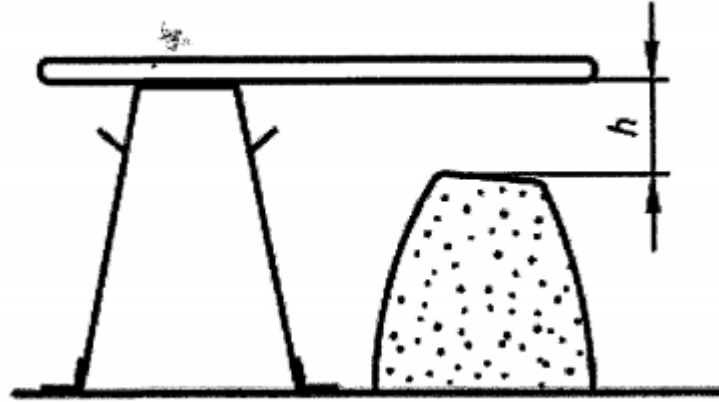


Figure II. 31 : Cônes d'Abrams

- **Equipement nécessaire**

- Un moule tronconique, son fond est de hauteur de 30cm, de 20cm de diamètre de diamètre Et sa partie inférieure et de 10cm~âe diamètre.
- Une plaque d'appui.
- Une tige de piquage.
- Une règle graduée

Mode opératoire

- Mouiller l'intérieur du moule et la plaque d'appui à l'aide d'une éponge.
- Placer le moule avec la rehausse sur la plaque.
- A l'aide d'une truelle remplir le moule de béton frais, en trois couches d'égale hauteur.
- Compacter chaque couche par 25 coups à l'aide de la tige de piquage.
- Retirer la rehausse, araser le dessus du moule et nettoyer le support autour du moule.
- Araser le moule à l'aide d'une règle.
- Le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution entre 5 et 10s.
- Retirer le moule verticalement avec précaution
- Mesurer l'affaissement (ou slump) du cône par rapport au point le plus haut du béton juste après le démoulage
- La durée totale de l'essai du remplissage à la mesure de l'affaissement est de 2 min30s.

ETUDE EXPERIMENTALE



Figure II.32 L'affaissement au cône d'abrams

Moulage le béton dans les moules en métal et utilisez la table vibrante pour vous débarrasser du vide



Figure II.33 moulage le béton(A) la table vibrante(B) les moules final de béton(C)

Laisser sécher l'échantillon dans les 24 h, Démouler et stocker les échantillons dans un bassin régulier d'eau chaude jusqu'à 23 ± 2 ° C selon la norme NF EN 12390-2



Figure II.34 (A) éprouvette (B) stocké dans un bassin régulier

II.4.4 Essais mécaniques sur les matériaux cimentaires formulés

Tous les essais mécaniques sur nos matériaux formulés ont été réalisés au niveau de laboratoire de CETIM dont :

- Essai de Résistance à la flexion suivant la norme NF EN12390-5
- Essai de Résistance au fendage suivant la norme NF EN12390-6
- Essai de Résistance à la compression suivant la norme NF EN12390-3

ETUDE EXPERIMENTALE

II.4.4.1 Essai de Résistance à la flexion

L'essai de flexion points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture (figure II .35).

L'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction (**B.JACQUOT ; 2010**)

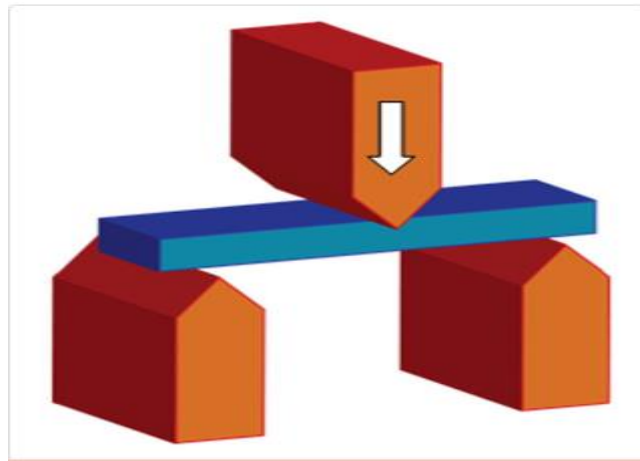


Figure II.35 teste de flexion

II.4.4.2 Essai de Résistance au fendage

Cet essai permet de déterminer expérimentalement la résistance en traction du béton. L'essai de fendage est un essai de traction indirect consistant à comprimer radialement l'éprouvette (figure II.36), créant alors, par effet Poisson, des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. Cet essai fonctionne à condition que l'effet Poisson provoque la rupture du matériau avant les contraintes de compression. On considère en général que la résistance à la traction du matériau doit être plus de trois fois inférieure à sa résistance en compression pour que cet essai permette d'estimer la résistance en traction. C'est le cas pour les bétons ordinaires où le rapport est généralement d'environ dix. (Xavier Jourdain et al., 2018).

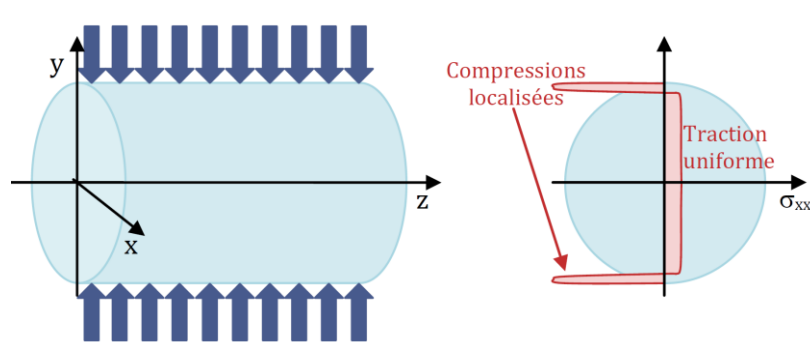


Figure II 36 : Chargement de l'éprouvettes et allure des contraintes σ_{xx} dans la section verticale lors de l'essai de traction indirecte appelé essais de fendage.

ETUDE EXPERIMENTALE

II.4.4.3 Essai de Résistance à la compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique ou cube, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées (figure II.37).

L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (B. JACQUOT ; 2010)

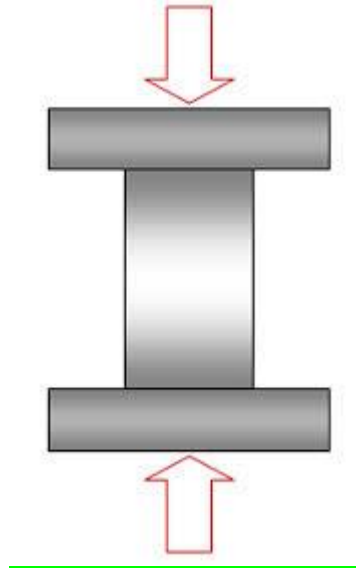


Figure II.37 : Teste de compression

Pour faire ces tests, utilisez un testeur de pression de béton de type CYBER-TRONIC

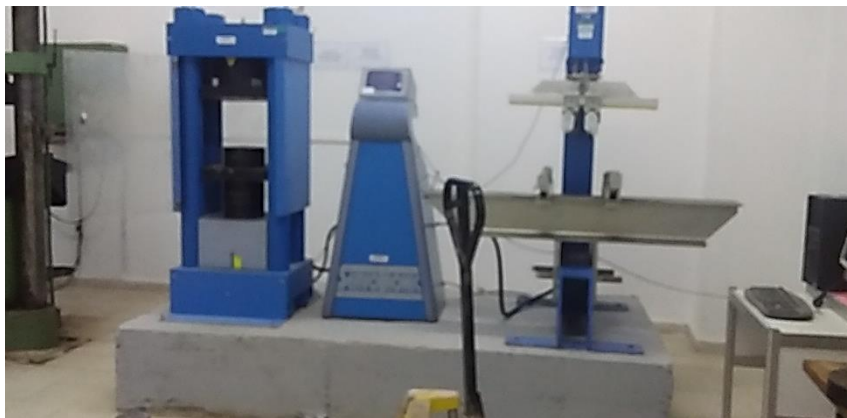


Figure II.38 : Testeur de pression de béton de type CYBER-TRONIC

ETUDE EXPERIMENTALE

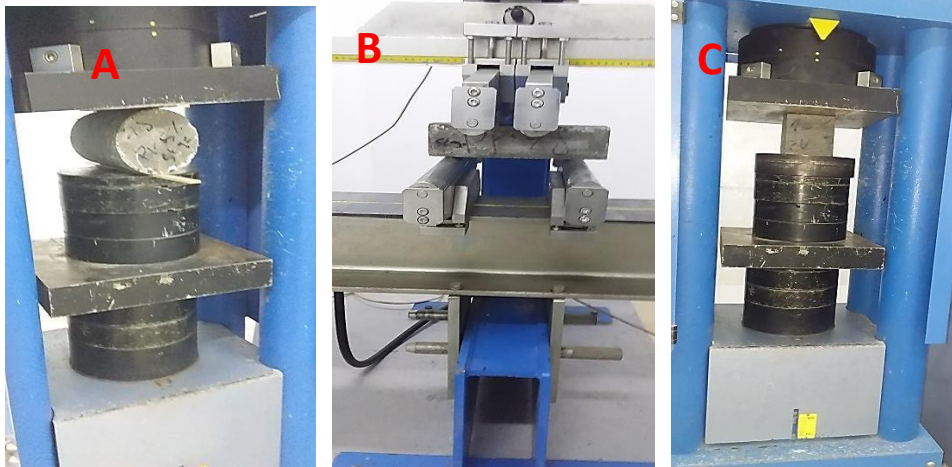


Figure II.39 : Essais de résistance de fendage (A), de flexion (B) et de compression (C).

II.5 Etude pétrographique sur éprouvettes

- préparation des échantillons :

Couper des portions des échantillons préalablement préparés en croix, d'environ 1 cm de long

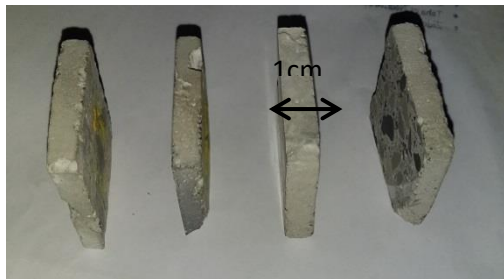
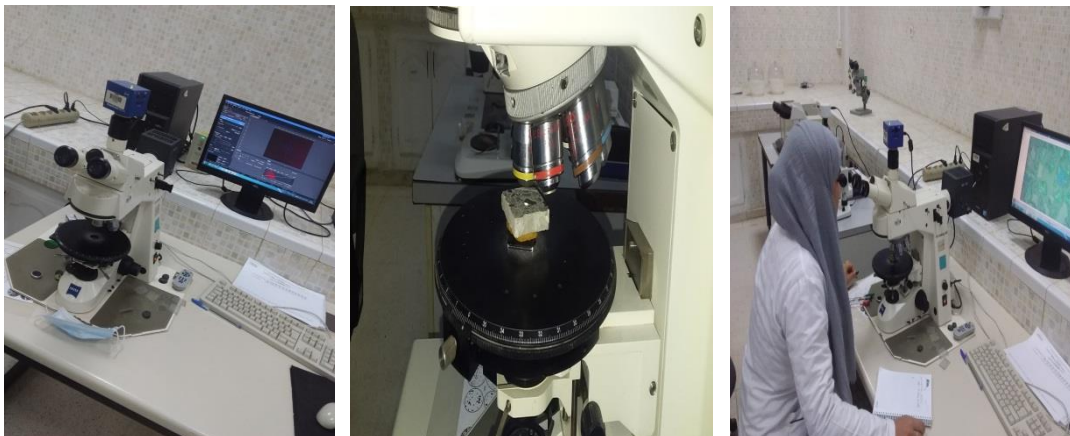


Figure II. 40 : L'échantillon préparé pour l'étude pétrographique

- Étude de la taille des porosités utilisé appareil microscope optique



FigureII.41 microscope optique utilisé

ETUDE EXPERIMENTALE

II.6 analyses chimiques des éprouvettes

Analyse chimique réalisée par fluorescence X des éprouvettes

- Préparation des échantillons
 - Broyer l'échantillon préalablement préparé dans un broyeur de finissage (≤ 0.08 mm) de type **JC2000**
 - Préparer les **billes** pour l'analyse par fluorescence X (NF EN 196_2) avec la méthodologie mentionnée au début de (chapitre
 - Pour déterminer les éléments chimiques qui composent de matériau cimentaire utilisé, en utilisant l'appareil Spectromètre XRF de type de **AXIOS FAST**. mettre la perle à sa place, puis on referme bien le portail et on active la machine via l'ordinateur.

ETUDE EXPERIMENTALE

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes suivies pour la détermination des quantités des différents constituants du béton en utilisant la méthode de DREUX GORISSE.

Les propriétés physiques et mécaniques des bétons avec déchets de verre ont été déterminées.

Plusieurs pourcentages de déchets de verre ont été utilisés dans les formulations de nos bétons,

Ces derniers ont été soumis à des essais et des analyses afin de déterminer leurs propriétés

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRÉTATION

RESULTATS ET INTERPRETATION

Introduction

L'intégralité de cette étude reposait sur la méthodologie consistant à remplacer un pourcentage de sable par son équivalent de poudre de déchets de verre, ce qui rend l'analyse des résultats orientée vers la recherche de critères clairs et valables pour déterminer l'effet de l'inclusion de cette substance dans la composition du ciment.

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus durant la réalisation des essais expérimentaux.

III.1 résultats du coefficient d'aplatissement:

Pour une classe granulaire d/D donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement Partie I.

Avec :

- M1 : masse de chaque granulaire d / D, en gramme
- $M = \sum M1$
- M2 : masse des éléments de chaque granulaire d / D passant sur la grille correspondante.
- $M2/M1 \times 100 =$ coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire

Tableau III.1 Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées de Gravillon 4/8

Gravillon 4/8			
Masse de la prise d'essai M(0) =978		Refus sur un tamis de 80mm=0g Passant sur un tamis de 4mm=128g Somme des masses éliminées = 128g	
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes	
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (Ri) granulat élémentaire di/Di (g)	Ecartement nominal des fentes de la grille E (mm)	Passant sur une grille à fentes (mi) (g)
63/80	0	40	0
50/63	0	3.5	0
40/50	0	25	0
31.5/40	0	20	0
25/31.5	0	16	0
20/25	0	12.5	0
16/20	0	10	0
12.5/16	0	8	0
10/12.5	0	6.3	0
8/10	4	5	1
6.3/8	291	4	69
5/6.3	333	3.15	70
4/5	222	2.5	48
$M1 = \sum Ri$	850	$M2 = \sum mi$	188
$A = (M2/M1) \times 100 = 22$			

RESULTATS ET INTERPRETATION

Tableau III.2 Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées de Gravillon 8/25

Gravillon 8/25			
Masse de la prise d'essai M(0) =978		Refus sur un tamis de 80mm=0g Passant sur un tamis de 4mm=128g Somme des masses éliminées = 128g	
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes	
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (Ri) granulat élémentaire di/Di (g)	Ecartement nominal des fentes de la grille E (mm)	Passant sur une grille à fentes (mi) (g)
63/80	0	40	0
50/63	0	3.5	0
40/50	0	25	0
31.5/40	0	20	0
25/31.5	0	16	0
20/25	83	12.5	0
16/20	421	10	42
12.5/16	1162	8	87
10/12.5	776	6.3	74
8/10	395	5	64
6.3/8	130	4	26
5/6.3	6	3.15	2
4/5	0	2.5	0
M1 = $\sum Ri$	2973	M2 = $\sum mi$	295
A= (M2/M1) x 100=10			

III.2 résultats d'Essai d'équivalent de sable :

On calcule, pour chaque éprouvette, le rapport 100 (h2 / h1) :

Tableau III .3 résultat d'essai d'équivalent de sable

Sable 0/4		
N°	1ère Eprouvette	2ème éprouvette
Masse de l'éprouvette (g)	120	120
h1 (mm)	131	126
h1 (mm)	88	84
100 x (h2/h1) Avec un chiffre après la virgule	67.2	66.7
Moyenne-SE	67	

$$SE = (h2/h1) .100$$

$$\mu_{SE} = SE \sqrt{(\mu h2/h2)^2 + (\mu h1/h1)^2}$$

h2= Hauteur du sédiment

h1= Hauteur du sédiment et du floculats

RESULTATS ET INTERPRETATION

μh_2	h_2	μh_1	h_1	μSE
1	88	1	131	0.9
1	84	1	126	1.0

$60 \leq SE < 70$ donc Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité

III.3 résultats de test bleus de méthylène sur argile

Tableau III.4 : résultats de test bleus de méthylène sur argile

Masse sèche de la prise d'essai de fraction granulométrique 0/0,125mm (an gramme près)	M1 = 210	M1 = 210
Quantité totale de solution de colorant ajoutée en ml	V1 = 25	V1 = 25
Valeur MB, exprimée en grammes de colorant par 100g de grains de fraction 0/0,125mm	MB = 1,2	MB = 1,2
Moyenne	1,2	

Selon la formule suivent : $MB = (V1 / M1) \times 10$

$$\mu_{MB} = MB \sqrt{\left(\frac{\mu V_1}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\mu M_1}{M_1}\right)^2}$$

V1 : Volume total de la solution injectée.
M1 : Masse de la prise d'essai.

μV_1	V_1	μM_1	M_1	μ_{MB}
0,05	25	3,103	210	0,02

$0,2 \leq \mu_{MB} < 1,5$ sol sablo limoneux, sensible à l'eau

III.4 Expression des masses volumiques et du coefficient d'absorption

Les résultats du calcul de la masse volumique et du coefficient d'absorption sont reportés dans le tableau III.5.

Tableau III.5 La masse volumique et du coefficient d'absorption

	Masse volumique réelle séchée $f_{rd} (Mg/m^3)$	Masse volumique réelle saturée surface séchée $f_{ssd} (Mg/m^3)$	Masse volumique absolue $f_a (Mg/m^3)$	Coefficient d'absorption $WA_{24} (%)$
Sable	2.65	2.66	2.69	0.5
Verre	2.34	2.40	2.48	2.3
Gravillon4/8	2.66	2.67	2.68	0.4
Gravillon8/25	2.64	2.67	2.73	1.2

RESULTATS ET INTERPRETATION

III.5 résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

Les résultats d'analyse granulométriques des 4 produits sont représentés dans la figure III.1. Le Traçage de la courbe granulométrique a été réalisé on utilisant ORIGIN PRO 8.

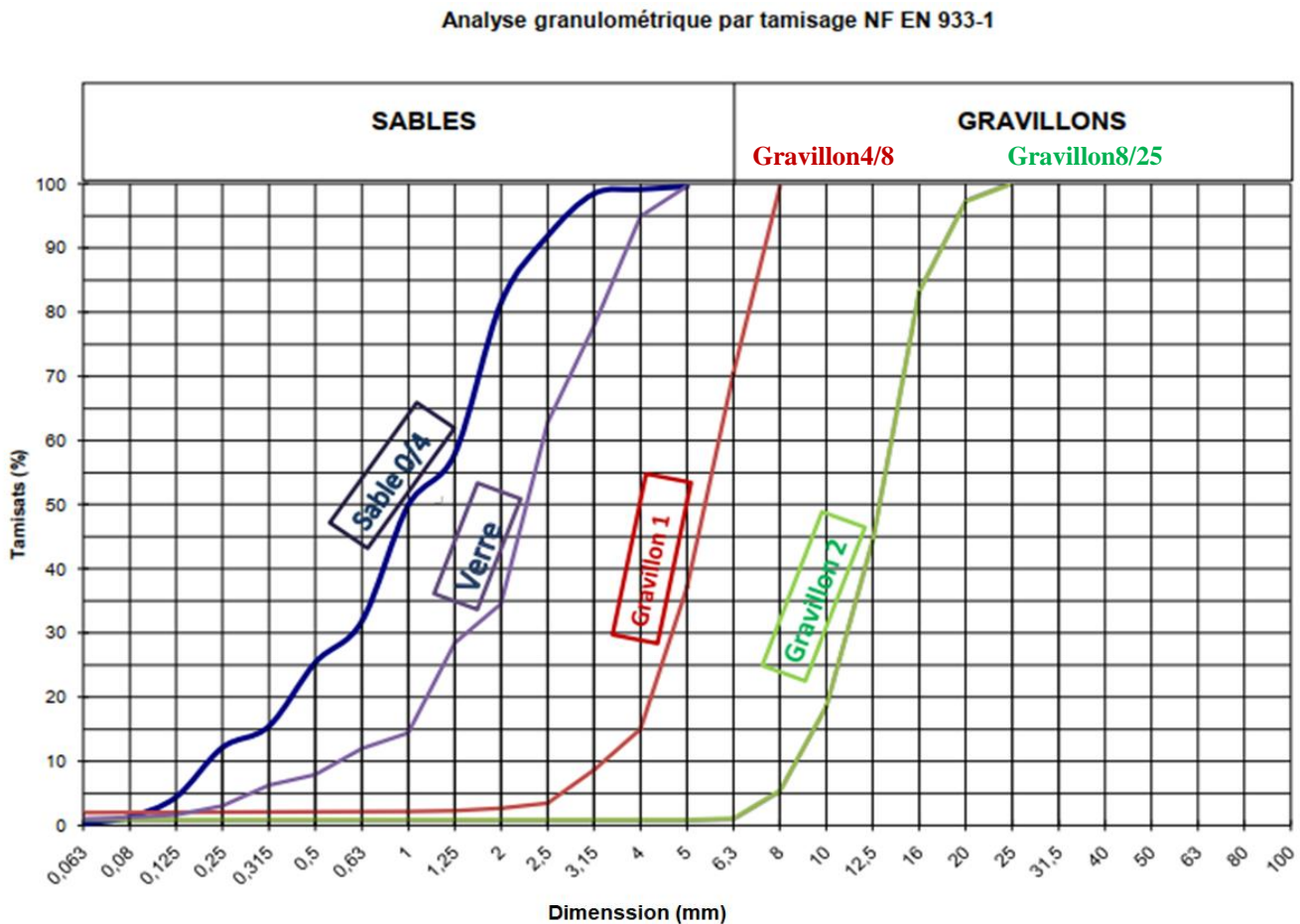


Figure III.1 : Analyse granulométrique des 4 produits utilisés

L'analyse granulométriques de la poudre de verre (Figure III.1) montre que la poudre de verre utilisée contient des particules à un diamètre médian d'environ 2.2mm, ce qui signifie que plus de 50 % des particules de la poudre de verre utilisée ont un diamètre inférieur à 2.2mm.

III.6 Résultats d'analyse par (XRF) de la poudre de verre

Les résultats d'analyses chimiques sont reportés dans le tableau III.6.

Tableau III .6la composition chimique de poudre de verre

Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
VERRE	74.19	0.99	0.28	8.81	1.77	0.24	0.22	13.03	0.01	0.04	0.42

RESULTATS ET INTERPRETATION

La poudre de verre est considérée comme un matériau pouzzolanique car elle contient un pourcentage élevé en SiO_2 actif dans le ciment et le béton, comme le montrent les résultats de l'analyse chimique effectuée par la technologie de Fluorescence X (XRF), avec un pourcentage estimé à 74,19 %.

Selon (Ibtihal. Z et Salim M 2011), On ne peut ignorer la présence d'alcalis dans notre poudre de verre (Na_2O) dans un pourcentage significatif estimé à 13.03%, alors qu'il ne faut pas dépasser 1,87% dans le béton normalisé, cet élément peut affecter négativement le béton, surtout si ce béton est utilisé dans un milieu humide ou très humide.

III.7 Résultats d'analyse minéralogique par diffraction rayons X

Le résultat d'analyse minéralogique par diffraction des rayons X est représenté dans la figure III.2.

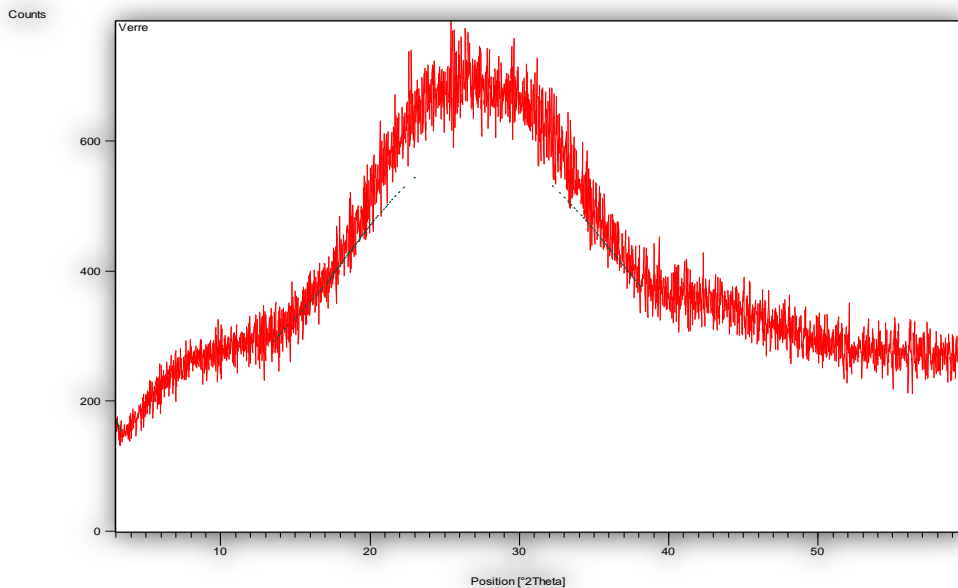


Figure III.2 : Diffractogramme de poudre de verre

Selon le diffractogramme (figure III.2) ; il est évident de constater que la poudre de verre a aspect amorphe (pas d'ordre atomique), cela est confirmé par la présence d'un dôme dans l'intervalle de déviation de 20 à 35° (2θ). Les bruits de fond observés sur le diffractogramme de la poudre de verre révèlent la présence d'impuretés.

III.8 Résultats des essais mécaniques (7jours)

III.8.1 Essais de Résistance à la compression (7jours)

Les essais de compression ont été réalisés sur les éprouvettes de 7 jours, après leur confection et mûrissement. La valeur moyenne de la résistance en compression du béton a été déterminée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.7.

RESULTRTS ET INTERPRETATION

Tableau III .7 : Résultats de Résistance à compression 7jours

	Eprouvette de référence		Eprouvette avec ajout de poudre de verre (%)					
	0%		5		10		20	
	Maxi. charge: KN	Résis. MPA	Max. charge : KN	Résis. MPA	Max. charge : KN	Résis. MPA	Max. charge : KN	Résis. MPA
Ech.1	154	7.65	159	7.90	214.21	10.65	170.25	8.46
Ech.2	153	7.60	158	7.85	192.65	9.58	175.73	8.74
Moy.	153.5	7.63	158.5	7.87	203.43	10.11	172.99	8.60

III.8.2 Essais de Résistance à la flexion (7jours)

Les essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes de 7 jours. Les résultats des résistances obtenus sont représentés dans le tableau III.8.

Tableau III .8 Résultats de Résistance à flexion 7jours

Eprouvette de référence		Eprouvette avec ajout de poudre de verre (%)					
0 % PV.		à 5		à 10		à 20	
Maxi. charge : KN	Résis. Mpa	Max. Charge : KN	Résis. Mpa	Max. charg: KN	Résis. Mpa	Max. Charge : KN	Résis. Mpa
6.231	2.8	6.31	2.83	6.98	3.14	7.01	3.15

III.8.3 Essais de Résistance au fendage (7jours)

Les essais de fendage ont été réalisés sur des éprouvettes âgées de 7 jours après leur confection et mûrissement. Les résultats des résistances obtenus sont présentés dans le tableau III.9.

Tableau III .9: Résultats des essais de résistance au fendage 7jours

	Eprouvette de référence		Eprouvette avec ajout de poudre de verre (%)					
	0 % PV*		5		10		20	
	Max. charge : KN	Résis. MPA	Max. charge : KN	Résis. MPA	Max. charge : KN	Résis. MPA	Max. charge : KN	Résis. MPA
Ech. 1	71.250	32.05	76.09	34.2	73.40	36.33	80.76	36.33
Ech. 2	71.25	32.05	81.18	36.48	73.88	33.23	87.91	39
Moy.	71.25	32.05	78.62	35	73.64	33.21	84.33	37.66

RESULTATS ET INTERPRETATION

Pour bien comprendre l'influence des ajouts de poudre de verre sur les différents bétons formulés, nous présenterons ci-dessous les graphes des essais mécaniques.

Les figures III.3 et III.4 représentent les résistances mécaniques du béton de 7 jours.

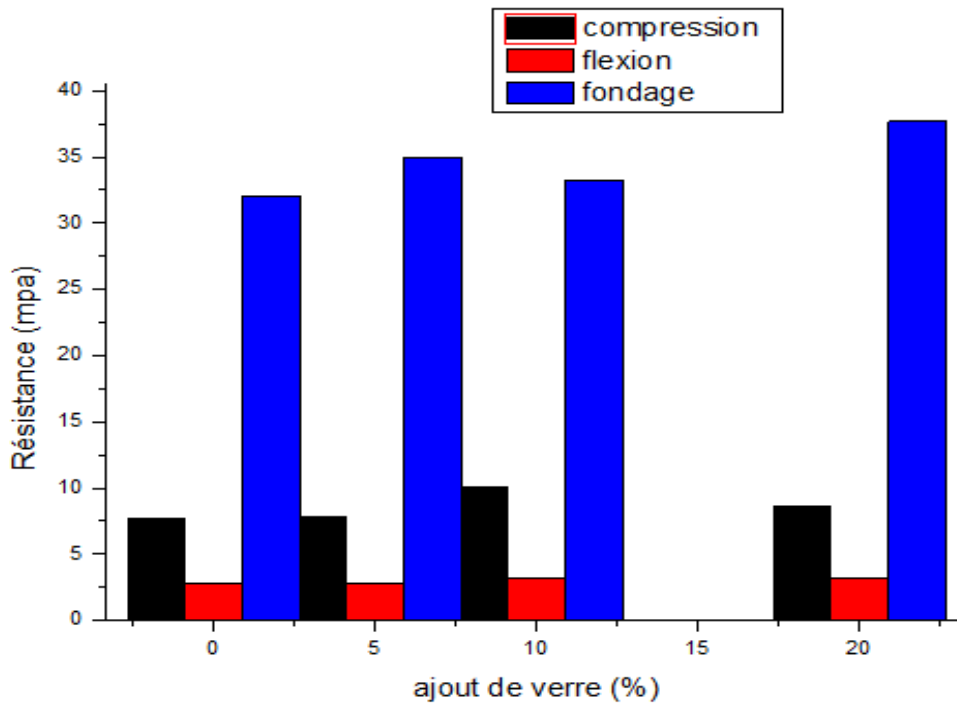


Figure III.3 : Graphique des Résistances mécaniques à 7 jours

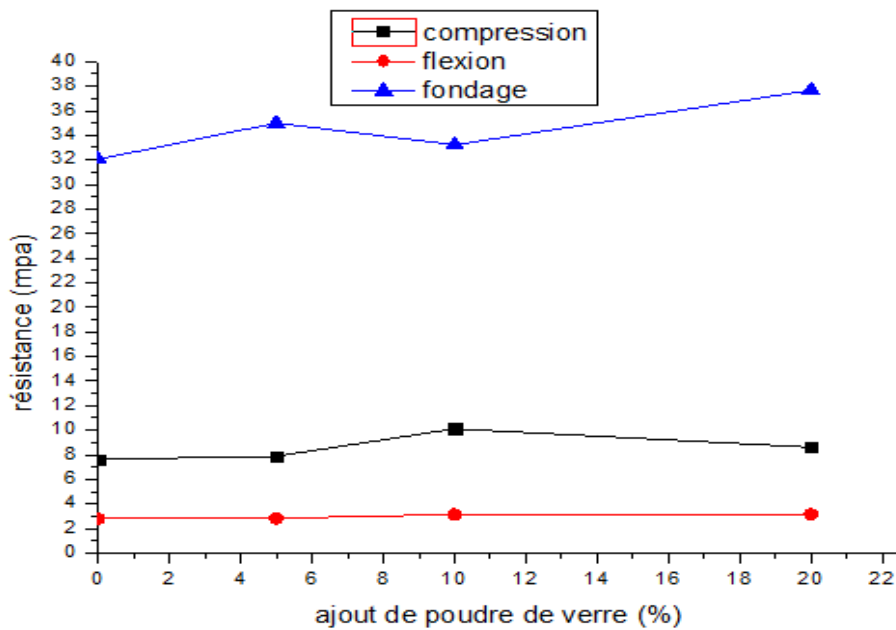


Figure III.4 : La courbe des résistances mécaniques à 7 jours

D'après les figures III.3 et III.4; on peut constater que le béton substitué par la poudre de verre avec les différentes proportions (5%, 10% et 20%) a une meilleure résistance par rapport au béton de référence.

RESULTATS ET INTERPRETATION

La valeur optimale obtenue pour la résistance à la compression est de 10,11 MPa pour le béton substituée à 10% de poudre de verre. Alors que pour le béton de référence est de 7,63 MPa. Pour les autres bétons substitués à 5% et 20% ont une résistance à la compression de 7.875 MPa et 8.60 MPa respectivement.

Il ressort de l'observation de la courbe (Figure III.4) que les valeurs optimales de la résistance à la flexion est de 3.15MPa et 3.14MPa pour un béton substitué à 10 % et 20% de poudre de verre respectivement. Ces valeurs sont supérieures à la valeur du béton de référence qui est de 2.8MPa et qui est égale à la valeur du béton substitué à 5% de poudre de verre, cela signifie que l'ajout de 5% de poudre de verre n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques des bétons.

Quant à l'essai de résistance au fendage ; on remarque bien que la valeur optimale est de 37.66 MPa pour le béton substitué à 20% de poudre de verre. Nous avons enregistré aussi une valeur élevée de 35MPa pour le béton substitués à 5% de poudre de verre. Ces valeurs sont supérieures à la valeur de référence qui est de 32,05 MPa.

D'une manière générale ; on peut constater que l'ajout de poudre de verre a une influence positive et significative sur les propriétés mécaniques des bétons âgés de 7jours.

III.9 Résultats d'essais mécaniques (28jours)

III.9.1 Essais de résistance à la compression (28jours)

Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes âgées de 28jours. Les résultats sont représentés dans le tableau III.10

Tableau III .10 Résultats de Résistance à la compression (28jours)

	Eprouvette de référence		Eprouvette avec ajout de poudre de verre (%)					
	0% PV		5		10		20	
	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa
Ech.1	497.6	24.75	635.4	31.6	599.2	29.8	542.9	27
Ech.2	499.6	24.85	639.4	31.8	603.2	30	538.8	26.8
Moy.	498.6	24.8	637.4	31.7	601.2	29.9	540.85	26.9

III.9.2 Les essais de résistance a la flexion (28 jours)

Ces essais nous ont permis de déterminer la valeur moyenne de la résistance à la flexion des bétons. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.11.

Tableau III .11: Résultats de Résistance à flexion (28jours)

Eprouvette de référence		Eprouvette avec ajout de poudre de verre (%)					
I 0 % PV		5		10		20	
Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa
14.01	6.30	18.70	8.42	18.69	8.42	22.06	9.92

RESULTRTS ET INTERPRETATION

II.9.3 Les essais de résistance à la flexion (28 jours)

Les essais de fendage, sur les éprouvettes, ont été réalisés à 28 jours d'âge après leur confection et mûrissement. Ils ont permis de déterminer la valeur moyenne de la résistance en fendage du béton. Les résultats des résistances obtenus à 28 jours sont présentés dans le tableau III.12.

Tableau III.12: Résultats de test de Résistance à fendage 28 jours

	Eprouvette de référence		Eprouvette avec ajout de poudre de verre (%)					
	0% PV		5		10		20	
	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa	Max. charge : KN	Résis. Mpa
Ech.1	81.2	36.52	86.97	39.12	86.3	38.8	89.76	40.37
Ech.2	81.1	36.48	87.9	39.53	87.2	39.22	89.91	40.44
Moy.	81.15	36.50	87.43	39.32	86.75.	39.02	89.83	40.40

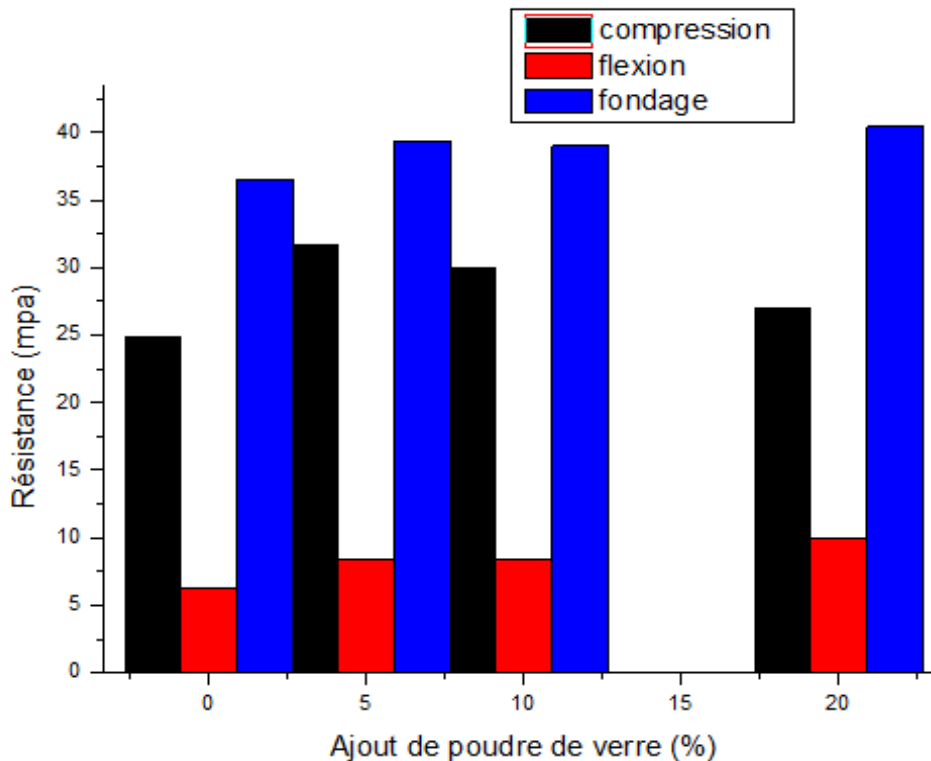


Figure III.5 : Graphique des résistances mécaniques à 28 jours

RESULTATS ET INTERPRETATION

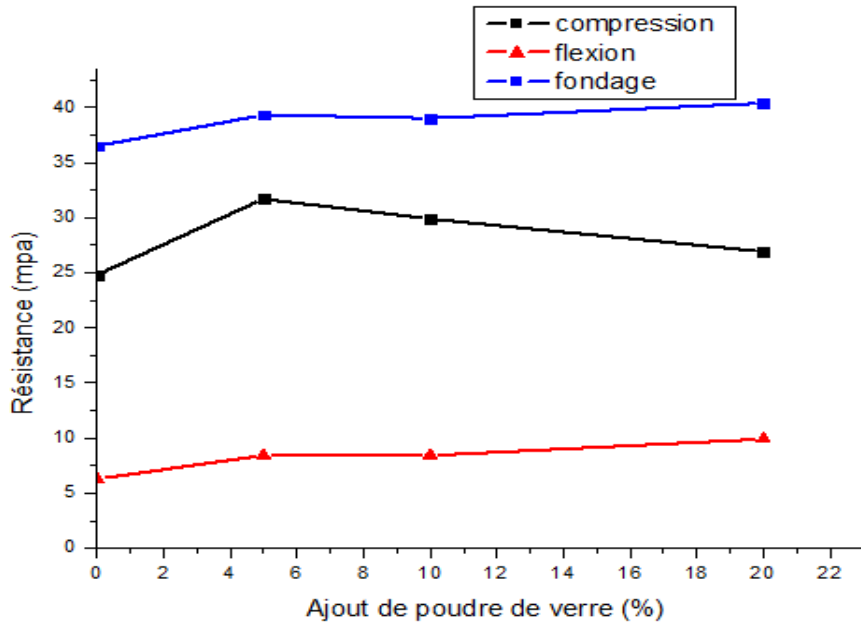


Figure III.6 : La courbe des résistances mécaniques à 28jours

D'après les figures III.5 et III.6; on peut conclure que les trois résistances (flexion, fardage et compression) des bétons substitués par la poudre de verre avec les proportions de 5%, 10% et 20% ont une amélioration par rapport au béton de référence.

La valeur optimale obtenue pour la résistance à la compression est de 31.7 MPa pour le béton substitué à 5% de poudre de verre. Alors que pour le béton de référence est de 24.8 MPa. Pour les autres bétons substitués à 10% et 20% ont une résistance à la compression de 29.9 MPa et 26.9 MPa respectivement.

Il ressort de l'observation de la courbe (Figure III.5) que les valeurs optimales de la résistance à la flexion est de 8.42MPa et 8.42MPa et 9.92MPa pour un béton substitué à 10 % et 5% et 20% de poudre de verre respectivement. Ces valeurs sont supérieures à la valeur du béton de référence qui est de 6.30MPa, cela signifie que l'ajout de 20% de poudre de verre n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques des bétons.

Quant à l'essai de résistance au fardage ; on remarque bien que la valeur optimale est de 40.40 MPa pour le béton substitué à 20% de poudre de verre. Nous avons enregistré aussi une valeur élevée de 39.32MPa pour le béton substitués à 5% de poudre de verre. Ces valeurs sont supérieures à la valeur de référence qui est de 36,50 MPa.

D'une manière générale ; on peut constater que l'ajout de poudre de verre a une influence positive et significative sur les propriétés mécaniques des bétons âgés de 28jours.

RESULTATS ET INTERPRETATION

III.9 Résultats d'analyse pétrographique

Une analyse microscopique a été réalisée afin de déterminer la tailles des pores sur nos échantillons des bétons substitues par des proportions en poudre de verre et de les comparer avec le béton de référence.

Les micrographies obtenues sont représentées dans les figures III.7, III.8, III.9 et III.10.

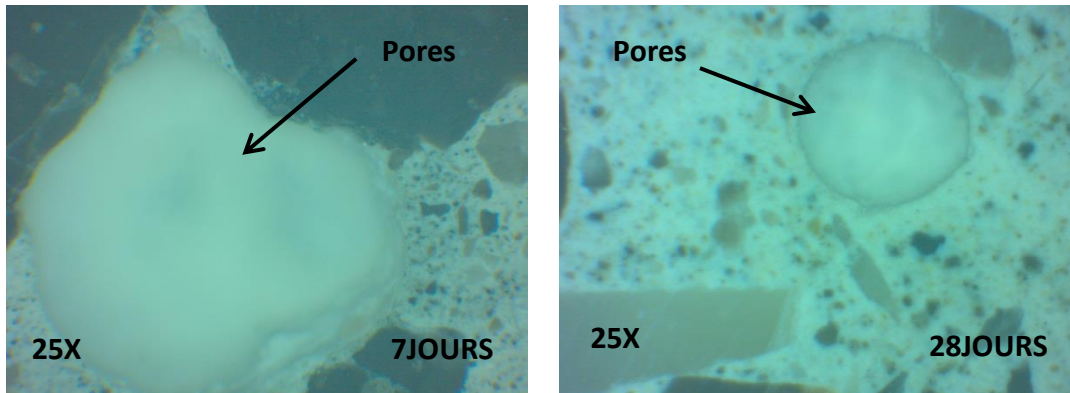


Figure III.7 : Micrographies d'éprouvettes de référence a 0% poudre de verre pour 7 et 28 jours

Tableau III.13: Taille des pores d'éprouvette de référence (0%)

Eprouvette de avec ajout de poudre de verre 0%	Taille des pores (mm)		
	Mini.	Maxi.	Moy.
Pour 28 jours	0.2	2.6	1.4
Pour 7 jours	1.2	4.4	2.8

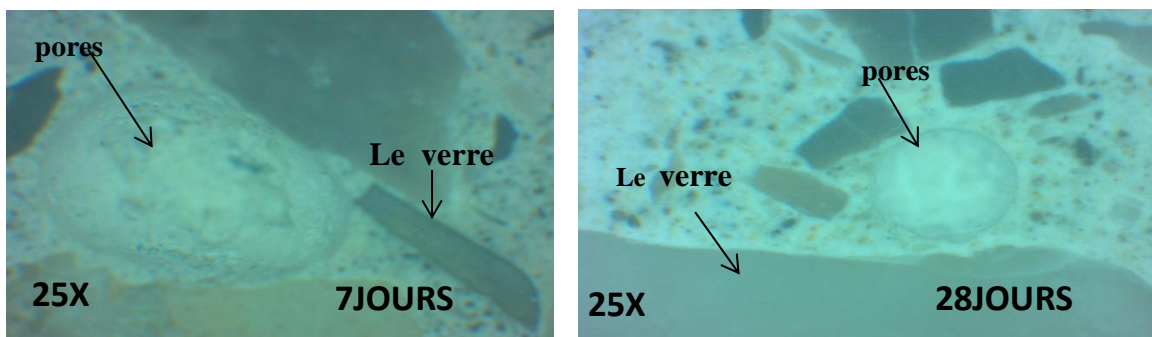


Figure III.8: Micrographies d'éprouvettes a 5% poudre de verre pour 7 et 28 jours

RESULTATS ET INTERPRETATION

Tableau III.14 la taille des pores mesurée sur éprouvette a 5% de poudre de verre

Eprouvette de avec ajout de poudre de verre 5%	Taille des Pore (mm)		
	Min.	Max.	Moy.
Pour 28 jours	0.16	2	1.08
Pour 7 jours	0.28	3.20	1.74

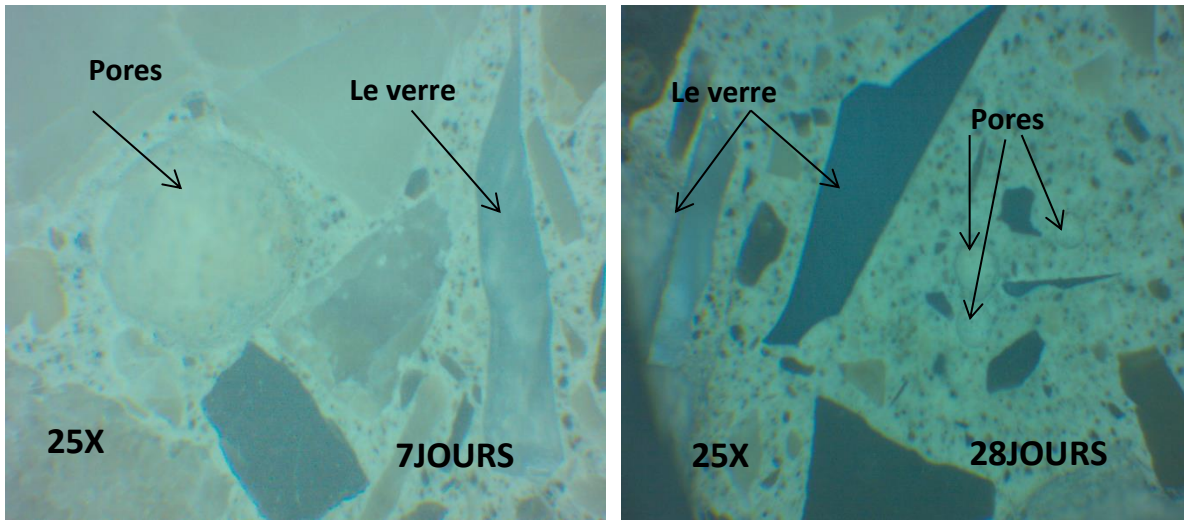


Figure III.9 Micrographies d'éprouvettes a 10% poudre de verre Pour 7 et 28 jours

Tableau III.15 la taille des porosités d'éprouvette avec ajout de poudre de verre 10%

Eprouvette avec ajout de poudre de verre à 10%	Taille des pores		
	Minimum mm	Maximum mm	Moyenne mm
Pour 28 jours	0.14	0.80	0.47
Pour 7 jours	0.20	1.20	0.70

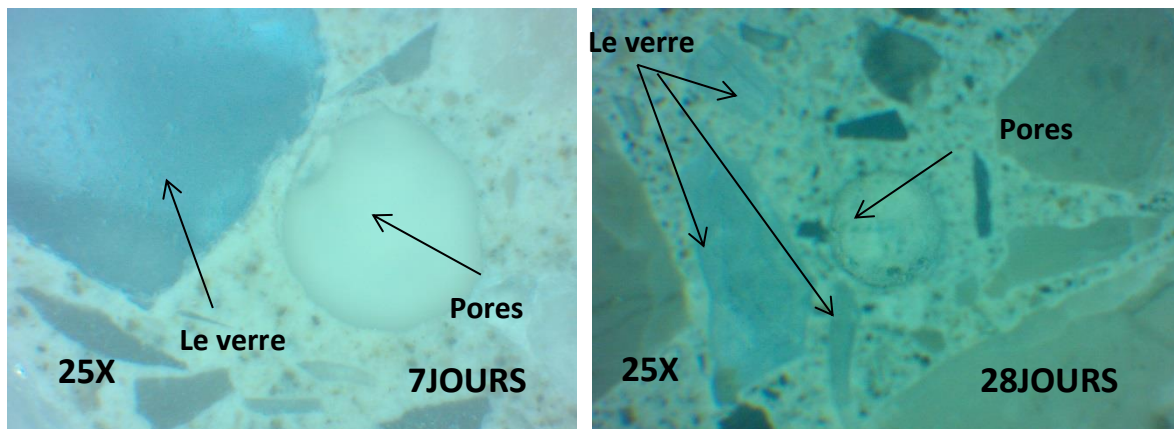


Figure III.10: Micrographies d'éprouvettes a 20% poudre de verre pour 7 et 28 jours

RESULTATS ET INTERPRETATION

Tableau III.16 la taille des pores d'éprouvette a 20% de poudre de verre

Eprouvette avec ajout de poudre de verre 20%	Taille des pores (mm)		
	Minimum	Maximum	Moyenne
Pour 28 jours	0.12	0.8	0.46
Pour 7 jours	0.2	1.2	0.7

A travers les résultats de l'étude microscopique, nous pouvons prouver que les petits grains de poudre de verre ont conduit à combler les espaces entre les grains du béton, en comparant l'étude microscopique de chacun des éprouvettes avec l'éprouvette de référence, où la taille des pores dans cette dernière est estimée à 2.8mm en 7jours et 1.4mm en 28jours.

III.10 Résultats d'analyse élémentaire par (XRF) des éprouvettes

Tableau III.17 : La composition chimique des éprouvettes (28jours)

Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
éprouvette de référence	3.47	1.04	0.70	50.39	1.30	0.29	0.14	0.34	0.03	0.06	41.69
éprouvette a 5% PV	4.44	1.14	0.77	50.11	1.69	0.41	0.15	0.30	0.03	0.06	40.91
éprouvette 10% PV	4.84	0.95	0.64	49.36	2.17	0.19	0.10	0.40	0.03	0.05	41.25
éprouvette à 20% PV	5.53	0.87	0.55	49.26	2.17	0.34	0.11	0.68	0.03	0.04	40.44

Tableau III.18 : La composition chimique des éprouvettes (7jours)

Oxydes (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PAF
éprouvette de référence	4.16	1.37	0.85	52.43	1.08	0.23	0.17	0.08	0.04	0.11	39.48
éprouvette a 5% PV	4.57	1.47	0.92	52.15	1.47	0.35	0.18	0.04	0.04	0.11	38.70
éprouvette a 10% PV	5.55	1.13	0.71	50.50	2.17	0.26	0.06	0.51	0.03	0.07	39.00
éprouvette a 20% PV	9.43	1.39	0.80	48.70	1.98	0.31	0.08	1.18	0.04	0.09	36.00

A travers les proportions des éléments chimiques constituant chaque échantillon de béton, nous constatons que l'ajout de poudre de verre a contribué à élever le ratio de SiO₂, qui est l'ingrédient actif du béton au ciment, en comparaison entre la composition chimique de l'échantillon de référence et des échantillons additionnés de poudre de verre, on remarque que le pourcentage de SiO₂ a augmenté dans tous les échantillons .

La présence de poudre de verre dans le béton dans une proportion ne dépassant pas les 20% garantit une teneur en Na₂O inférieure à 1.87% comme mentionné dans l'un des articles (Ibtihal. Z et Salim M 2011) et n'aura donc pas d'effet négatif sur le béton.

RESULTATS ET INTERPRETATION

Conclusion

Grâce aux résultats de cette étude, systématiquement Le remplacement d'un pourcentage de sable par son équivalent de poudre de déchets de verre, et son analyse orientée vers la recherche de critères clairs et valables pour déterminer l'effet de l'inclusion de cette substance dans la composition du ciment. Il a été constaté que cette substance a une influence positive et significative sur les propriétés mécanique du matériau cimentaire (béton)

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nous avons effectué ce travail expérimental au sein de la société CITIM située dans la wilaya de Boumerdes afin de proposer des matériaux cimentaires (bétons) additionnés par la poudre de verre pour améliorer les caractéristiques mécaniques ce matériau.

Ce travail nous a montré que l'addition de la poudre de verre dans les matériaux cimentaires (bétons) améliore ses caractéristiques mécaniques à savoir : la résistance à la compression, à la flexion et au fendage.

Les résultats obtenus révèlent que les valeurs des essais mécaniques effectuées sur les éprouvettes en béton âgées de 7 et de 28 jours et à différentes proportions d'ajout de poudre de verre (5, 10 et 20%) sont supérieures aux valeurs du béton de référence (0% de poudre de verre).

Les résultats de l'étude microscopique nous a indiqué que les petits grains de poudre de verre ont conduit à combler les espaces entre les grains du béton où la taille des pores a été considérablement réduite.

Les analyses chimiques des éprouvettes de matériaux cimentaires formulés montrent que la valeur en silice (SiO_2) a été augmentée dans chaque échantillon analysé par rapport à la composition chimique de l'échantillon de référence.

Finalement ; l'utilisation des déchets de verre dans la formulation des matériaux cimentaire - comme le béton - ouvre une grande porte aux sociétés de recyclage d'investir dans cette matière abandonnée dans la nature et par conséquence de doubler leurs recettes ainsi que la protection de l'environnement dans un cadre de développement durable.

Références bibliographiques

- Bahia Arab ; Rachid Mehaddene ; Yacine Bouchnab, 2017, Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances.
- B. JACQUOT ; Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD) -2010
- G.Vijayakumar, H.Vishaliny, D. Govindarajulu, “Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production”, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 3, Issue 2, February 2013.
- Hadj Sadok, A Chapitre II : Le ciment Portland 2011
- I.A.Kassem, H. I.Al-khatib, I.S.Fathi, “SOME PROPERTIES OF MORTAR WITH CRUSHED GLASS AS FINE AGGREGATE”, Journal for Engineering Sciences, 2011.
- Ibtihal. Zaki Sulaiman et Salim. Muhammad Khalil ; DIYLA JOURNAL FOR PORE SCIENCES (2011.06.22) تأثير سليكات الصوديوم وفوسفات عكاشات في مقاومة الخرسانة
- J.M. Khatib, E.M. Negim, H.S. Sohl and N. Chileshe, “Glass Powder Utilisation in Concrete Production”, European Journal of Applied Sciences 4 (4): 173-176, 2012
- Jean Festa, Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants) , untième édition1998 / Troisième tirage 2007
- Mat Rout TP-02-Essai d’Affaissement <https://fr.scribd.com/document/508249951/>
- NA 442 :2013 مواصفة جزائرية NORME ALGERIENNE
- SAFI Brahim « Procédés et mise en forme des matériaux : Le Verre » UNIVERSITÉ DE BOUMERDES FACULTE DES SCIENCES DE L’INGENIEUR F.S.I DEPARTEMENT GENIE DES MATERIAUX
- Shi, C. and Zheng, K. “A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete”, Resources, Conservation, and Recycling, Vol. 52, pp. 234-247, 2007
- Thirion-Merle HAL Idon, 2016, Spectrométrie de fluorescence X Valérie.

Références bibliographiques

- Xavier Jourdain, Hélène HORSIN MOLINARO, François SOLEILHET, 2018, Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature.
- Zidol Ablam, 2009, Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. Thèse (M. Sc. A.)-Université de Sherbrooke.

ANNEXES

ANNEXES

**ANNEXE 1 : Jean Festa, Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants).
Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 page 239**

Tableau 10-5

Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône
ou au test d'ouvrabilité C.E.S. (chapitre IX, paragraphe 2.2.4).

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	N nombre de chocs test C.E.S.
Béton très ferme	vibration puissante ¹	0 à 2	> 60
Béton ferme	bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	piquage	10 à 13	10 à 15
Béton fluide	léger piquage	≥ 14	< 10

**ANNEXE2 : Jean Festa, Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants).
Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 page 242**

Il ne suffit pas alors, connaissant C/E, de fixer arbitrairement le dosage en ciment et d'en déduire le dosage en eau E; en effet, en choisissant par exemple, un faible dosage en ciment, on trouvera un dosage en eau faible; on risquera alors d'obtenir un béton beaucoup trop sec (et vice versa). Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure X-14 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

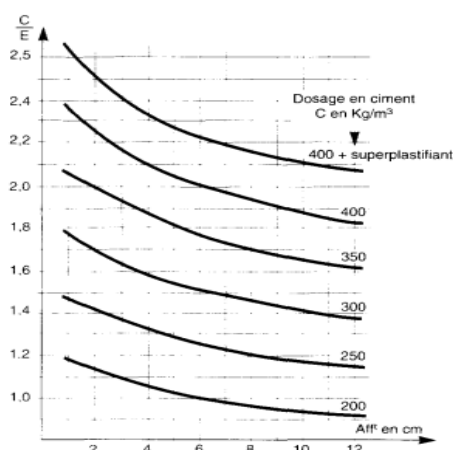


Fig. X-14 – Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

ANNEXES

ANNEXE3 : *Jean Festa, Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants). Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 page 240*

3.3 DOSAGE EN CIMENT

On commencera par évaluer approximativement le rapport $\frac{C}{E}$ en fonction de la résistance moyenne désirée f_c .

$$f_c = G F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

avec

- f_c , résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,
- F_{CE} , classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,
- C, dosage en ciment (en kg/m^3),
- E, dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m^3),
- G, coefficient granulaire (tableau 10-8).

ANNEXE 4 : *Jean Festa, Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants). Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 p241*

Tableau 10-8

Valeurs approximatives du coefficient granulaire G. Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ($D \leq 16 \text{ mm}$)	Moyens ($20 \leq D \leq 40 \text{ mm}$)	Gros ($D \geq 50 \text{ mm}$)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

**ANNEXE 5 : Jean Festa, Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants).
Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 page 246/247**

3.6 TRACÉ DE LA COURBE GRANULAIRE DE RÉFÉRENCE

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), on trace une composition granulaire de

référence O A B (fig. X-17 ou X-18) : le point B (à l'ordonnée 100 %) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A a des coordonnées ainsi définies :

– en abscisse (à partir de la dimension D tamis)

Si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$.

Si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D.

– en ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) et également du module de finesse du sable (voir paragraphe 2.4.4.4 de ce chapitre).

Les valeurs sont indiquées dans le tableau 10-12 ; K = 0 pour un béton courant dosé en ciment à 350 kg/m³ composé de granulats roulés, le module de finesse du sable étant de 2,5 et le serrage étant effectué avec une vibration normale.

Par exemple, sur la figure X-18 on a pour un béton D = 50 mm et un terme correcteur K choisi dans le tableau 10-12 et supposé égal à + 3 :

$$Y = 50 - \sqrt{50} + 3 = 46$$

L'abscisse du point de brisure est au milieu du segment X₀ X₁ et la ligne brisée OAB représente la composition granulaire de référence.

ANNEXE 6 : Jean Festa, , Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants).
 Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 page 249

Tableau 10-12

Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer Y ordonnée du point de brisure de la courbe de référence :

$$(Y = 50 - \sqrt{D + K})$$

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Nota 1 : Correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

Nota 2 : Correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = + 5$ à + 10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

ANNEXES

**ANNEXE7 : Jean Festa, , Dreux-Gorisse (Le nouveau guide du béton et de ses composants).
Unitième édition 1998 / Troisième tirage 2007 page 251**

Tableau 10-13
Valeurs du coefficient de compacité γ (voir fig. X-13).

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité							
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80	
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820	0,830
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830	0,830
Plastique	Piquage	0,730	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840	0,840
Ferme	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845	0,845
	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850	0,850
Ferme	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

– sable roulé et gravier concassé = - 0,01.

– sable et gravier concassé = - 0,03.