



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Département de Génie Civil & Architecture

N° d'ordre : M/GCA/2018

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

Elaboration et étude d'un béton drainant

Présenté par :

-OULD-AHMED Ibrahim Othmane.

-YAKHOU Mohamed El Amine.

Soutenu le 25 Juin 2019 devant le jury composé de :

Présidente :	BELAS Nadia	Professeur	UMAB Mostaganem
Examineur:	BELARIBI Omar	M.C.A	UMAB Mostaganem
Encadrant :	MEBROUKI Abdelkader	Professeur	UMAB Mostaganem
Invité :	MARREF Mohamed	Directeur	GRANU-OUEST

Année Universitaire : 2018 / 2019

Dédicace

à ma famille

à ma promotion

à tous mes amis

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné le savoir et la volonté surtout la patience pour réaliser ce travail.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes. Nous souhaitons ici les en remercier.

En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner mes sincères remerciements à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de notre projet de fin d'étude et l'élaboration de ce modeste travail.

Nos sincères gratitude envers notre encadrant Pr. MEBROUKI pour la qualité de son enseignement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'il a porté envers nous tout au long de ce projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier aussi tout le corps professoral pour ces cinq années enrichissantes, pour tous leurs conseils, leur savoir-faire et leurs enseignements qui nous ont beaucoup aidés et nous aiderons au futur.

Nous sommes très reconnaissants envers tout le personnel de la filiale « GRANU-OUEST » de MOSTAGANEM du groupe « GICA » : Le Directeur de l'unité, Mr. MARREF pour nous avoir autorisé à accéder à l'Entreprise et avoir mis à notre dispositions tous les moyens nécessaires au bon déroulement de notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi au Responsable du Laboratoire Mr. RAOUYA qui nous a aidés durant notre travail grâce à ses conseils prodigués, sa patience et sa confiance qui ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Enfin, je n'oserais oublier de remercier notre entourage et notre famille ainsi que nos amis qui nous ont apportés leurs soutiens et leurs encouragements pour pouvoir parachever notre projet de fin d'étude.

Résumé

Le béton drainant (également appelé béton poreux, le béton perméable) est un type particulier de béton à haute porosité qui permet l'absorption des eaux de pluie et facilite leur écoulement naturel dans le sol.

Ce béton est généralement utilisé pour ses caractéristiques drainantes, d'ailleurs ces dernières décennies ont été marquées par une utilisation croissante du béton drainant dans le monde. Les applications les plus courantes sont: les aires de stationnements, les routes piétonnes et carrossables, les piscines, air de jeux, terrain de tennis. Néanmoins le béton drainant possède des caractéristiques mécaniques faibles comparées au béton ordinaire, ceci est dû à sa porosité effective relativement importante. L'objectif primordial pour le concepteur est de trouver un bon équilibre entre les propriétés mécaniques et drainantes conformément aux exigences voulues.

Dans cette étude, un intérêt particulier est porté sur le béton drainant appelé aussi béton perméable ou caverneux, à travers ce travail, nous avons étudié une composition d'un béton drainant par une formule proposée par la filière « GRANU-OUEST » du groupe « GICA ».

Pour ce faire, une caractérisation générale des matériaux utilisés a été faite, suivi de l'étude de la fabrication du béton étudié. Ensuite des essais mécaniques ont été réalisés à différents âges du béton. Notre étude a permis l'obtention d'un bon béton avec des caractéristiques performantes.

Mots clés : Béton drainant, formulation, état frais, état durci.

Abstract

Drainage concrete (also called porous concrete, permeable concrete) is a special type of high-porosity concrete that absorbs rainwater and facilitates its natural flow into the soil.

This concrete is generally used for its draining characteristics, moreover in recent decades have been marked by an increasing use of draining concrete in the world. The most common applications are: parking areas, pedestrian and vehicular roads, swimming pools, playgrounds, and tennis courts. Nevertheless the draining concrete has weak mechanical characteristics compared to ordinary concrete; this is due to its relatively large effective porosity. The prime objective for the designer is to find a good balance between the mechanical and draining properties in accordance with the required requirements.

In this study, a particular interest is focused on draining concrete also called permeable concrete or cavernous, through this work, we studied a composition of a draining concrete by a formula proposed by the « GRANU-OUEST » of the group « GICA ».

To do this, a general characterization of the materials used was made, followed by the study of the manufacturing of the studied concrete. Then mechanical tests were carried out at different ages of the concrete. Our study allowed obtaining a good concrete with powerful characteristics.

Key words: drainage concrete, formulation, fresh state, hardened state.

ملخص

خرسانة الصرف (وتسمى أيضًا الخرسانة المسامية والخرسانة القابلة للنفاذ) هي نوع خاص من الخرسانة عالية المسامية التي تمتص مياه الأمطار وتسهل تدفقها الطبيعي إلى التربة.

يستخدم هذا الخرسانة بشكل عام لخصائص تصريف المياه، علاوة على ذلك في العقود الأخيرة، اتسم بزيادة استخدام الخرسانة المجففة في العالم. التطبيقات الأكثر شيوعًا هي: أماكن وقوف السيارات، طرق المشاة والمركبات، حمامات السباحة، الملاعب، ملاعب التنس. ومع ذلك، فإن خرسانة التصريف تتميز بخصائص ميكانيكية ضعيفة مقارنة بالخرسانة العادية، وهذا يرجع إلى مساميتها الفعالة الكبيرة نسبيًا. الهدف الرئيسي للمصمم هو إيجاد توازن جيد بين الخواص الميكانيكية وتصريف المياه وفقا للمتطلبات المطلوبة.

في هذه الدراسة، يركز اهتمام خاص على تجفيف الخرسانة وتسمى أيضًا الخرسانة القابلة للاختراق أو الكهفية، ومن خلال هذا العمل، درسنا تركيبة من خرسانة التصريف بواسطة صيغة مقترحة من قبل "GRANU-OUEST" مجموعة « GICA »

للقيام بذلك، تم إجراء توصيف عام للمواد المستخدمة، تليها دراسة لتصنيع الخرسانة المدروسة. ثم أجريت الاختبارات الميكانيكية في العصور المختلفة للخرسانة. سمحت دراستنا للحصول على الخرسانة جيدة مع خصائص قوية.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة المسامية، صيغة، حالة جديدة، حالة صلبة.

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction Generale..... 2

Chapitre I : Etude Bibliographique.

1-Introduction	5
2- Composition du béton drainant	6
2-1 Ciments	6
2-2 Granulats	6
2-3 Eau	7
2-4 Les adjuvants	8
3-Particularités du béton drainant	8
4-Propriétés du béton drainant	9
4-1-Résistance à la compression et à la flexion	9
4-2-Masse Volumique	9
4-3- Porosité et perméabilité (taux de percolation)	10
4-4- Résistance au cycle du gel/dégel	10
4-5- Rhéologie et Pompabilité	10
4-6- Absorption acoustique	10
A l'état frais	11
A l'état Durci	11
5-Utilisation du béton drainant	11
5-1-L'utilisation du béton drainant dans le monde	14
6-L'utilité du béton drainant	15

6-1-Gestion des eaux de ruissellement et réduction des surfaces imperméables	15
6-2-Réduire ou éliminer les besoins de bassins de rétention	15
6-3-Réduction des ilots de chaleur urbains	15
6-4 -Réduction de la pollution	16
6-5-Meilleures sécurités	16
7-Mise en place	16
7-1-préparation du sol	16
7-2- Pose des joints de dilatation	17
7-3-Etalage du béton drainant.....	18
7-4-Fin du chantier	18
8- Avantages du béton drainant	19
9-Conclusion	20
Problématique et Axes de recherches.....	22

Chapitre II : Matériaux et Méthodes.

1-Introduction	24
2-Matériaux	24
2-1-Le ciment	24
2-1-1- caractéristiques du ciment	25
2-2 Le sable	26
a-Equivalent de sable : (P18-598).....	27
b- Essai au Bleu de méthylène :(EN933-9)	28
c- Analyse granulométrique par tamisage : (NF P 18-560)	29
d- Calcul des proportions du sable optimal (MF=2,7)	32
d-1-Module de finesse.....	32
2-3 Gravier	36
a-Analyse granulométrique par tamisage : (P18-560)	36
2-4 Eau	37
2-5-Masses volumiques:(NF P18-555).....	38
a- Masse volumique apparente (MVa)	38

b-La masse volumique absolue ou réelle (MVr)	38
3-Méthodes	39
3-1 Equivalant de sable (P18-598)	39
a-1-Principe de l'essai	39
a-2-Appareillage utilisés	39
a-3-Description de l'essai	40
3-2- Essai au Bleu de méthylène (EN933-9)	41
b-1-Principe de l'essai	41
b-2-Appareillage utilisés	41
b-3- Description de l'essai	42
3-3- Analyse granulométrique par tamisage : (NF P 18-560)	43
d-1-Principe de l'essai	43
d-2-Equipements nécessaires	43
d-3-Description de L'essai	44
3-4-Détermination de la masse volumique apparente	45
3-5-Détermination de la masse volumique absolue	46
Méthode de l'éprouvette graduée	46
4-Formulation du béton drainant	47
5-Essais sur le béton frais	48
5-1 Essai au cône d'Abrams (NF EN 12350-2).....	48
a-1-Principe de l'essai	48
a-2-Equipement nécessaire	48
a-3-description de l'essai	49
5-2- Essai teneur en air:(NF EN 12350-7).....	50
b-1 Principe de l'essai	50
b-2-Equipement nécessaire	50
b-3-description de l'essai	51
5-3-Essai Vébé : (Norme ISO 4110)	52
C-1-Principe de l'essai	52
C-2- Equipement nécessaires	52
C-3-Conduite de l'essai	53
6-Essai sur le béton durci	55

6-1-Essai de porosité : (NF P18-459)	55
a-1-Conduite de l'essai	55
6-2-Essai de perméabilité (NF EN 12697-19).....	56
b-1-Conduite de l'essai	56
6-3-Essai d'auscultation dynamique (NF EN 12504-4)	57
C-1- Mode opératoire	57
6-4- Essai de compression (NFP 18-406).....	58
d-1-Conduite de l'essai	58
6-5-Essai de traction (Essai brésilien)	59
e-1-Conduite de l'essai	59
6- Conclusion	60

Chapitre III : Résultats et Discussion.

1-Introduction	62
2-Résultats des essais sur béton frais	62
2-1- Affaissement au cône d'Abrams	63
2-2-Teneur en air : (AÉROMÈTRE).....	64
2-3-Essai Vèbè	66
3-Résultats des essais sur béton durci	67
3-1-Essai de la porosité ouverte	67
3-2-Essai perméabilité à l'eau	69
3-3-Resistances à la compression	70
3-4-Resistance à la traction (Essai brésilien)	72
3-5- Essai auscultation sonique (Mesure de la vitesse du son)	74
3-6-Masse Volumique	75
3-7-Perte de Masse	78
4-Réalisations de pavés/blocs en béton drainant	80
5-Conclusion	82
Conclusion Generale	84

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Echantillon d'un béton drainant.....	5
Figure I.2: Echantillon d'un ciment.....	6
Figure I.3: Echantillon d'un gravier 3/8.....	7
Figure I.4: Echantillon d'un sable 0/3.....	7
Figure I.5: Echantillon d'un sable 0/1.....	7
Figure I.6: Sol en béton drainant.....	12
Figure I.7: Plage de piscine en béton drainant.....	13
Figure I.8: Trottoir en béton drainant.....	13
Figure I.9: Réalisation d'un parking avec un béton drainant.....	13
Figure I.10: Réalisation d'un trottoir au CANADA (ONTARIO 2008).....	14
Figure I.11: Préparation du sol.....	17
Figure I.12: Pose des joints de dilatation.....	17
Figure I.13: Pose des joints de dilatation: Etalage du béton drainant.....	18
Figure I.14: Damage du béton drainant.....	18

Chapitre II

Figure II.1: Echantillon de ciment (CPJ CEM II 42.5).....	24
Figure II.2: Echantillon de sable OZMERT 0/1.....	26
Figure II.3: Echantillon de sable OZMERT 0/3.....	26
Figure II.4: Résultat de l'essai.....	28
Figure II.5: Courbe granulométrique du sable 0/1.....	31
Figure II.6: Courbe granulométrique du sable 0/3.....	31
Figure II.7: Sable optimal.....	33
Figure II.8: Courbe granulométrique du sable optimal.....	35
Figure II.9: Courbe granulométrique des trois sables.....	35
Figure II.10: Courbe granulométrique du gravier 3/8.....	37
Figure II.11: Eau de gâchage.....	37
Figure II.12: Matériels utilisés.....	39
Figure II.13: Eprouvettes de l'essai Equivalant de Sable.....	40
Figure II.14: Appareillages utilisés.....	41
Figure II.15: Essai au bleu de méthylène.....	42
Figure II.16: Appareillage utilisés.....	43
Figure II.17: Sable 0/3.....	44
Figure II.18: Sable 0/1.....	44
Figure II.19: Tamisage.....	44
Figure II.20: Gravier 3/8.....	44

Figure II.21: Essai de la masse volumique apparente.....	45
Figure II.22: Essai de la masse volumique absolue.....	46
Figure II.23: Réalisation du béton drainant.....	47
Figure II.24: Equipement utilisé.....	48
Figure II.25: Mode opératoire de l'essai.....	49
Figure II.26: Un manomètre.....	50
Figure II.27: Tige de piquage.....	50
Figure II.28: Mode opératoire de l'essai.....	51
Figure II.29: Matériels utilisés.....	52
Figure II.30: Schéma du mode opératoire de l'essai.....	53
Figure II.31: Mise en place du béton dans le cône d'Abrams.....	54
Figure II.32: Soulèvement du cône et mesure de l'affaissement A.....	54
Figure II.33: Mise en route du vibreur et déclenchement simultané du chronomètre.....	54
Figure II.34: Essai de porosité.....	56
Figure II.35: Appareillage essai de perméabilité.....	56
Figure II.36: Essai de résistance à la compression.....	58
Figure II.37: Essai brésilien.....	59

Chapitre III

Figure III.1: Essais à l'état frais.....	63
Figure III.2: Essai au cône d'Abrams.....	63
Figure III.3: Schéma des classes de consistance du béton.....	64
Figure III.4: Essai de la teneur en air.....	64
Figure III.5: Essai Vèbè (matériel et manipulation).....	66
Figure III.6: Essai porosité ouverte.....	68
Figure III.7: Essai perméabilité à l'eau.....	69
Figure III.8: Résistance à la compression.....	70
Figure III.9: Courbe résistance à la compression.....	71
Figure III.10: Diagramme de l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.....	71
Figure III.11: Essai de traction.....	72
Figure III.12: Courbe Résistance à la traction.....	73
Figure III.13: Diagramme d'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps.....	74
Figure III.14: Essai d'auscultation sonore.....	74
Figure III.15: Mesure de la masse volumique.....	76
Figure III.16: Diagramme de masse volumique.....	77
Figure III.17: Courbe de pertes de masses.....	79
Figure III.18: Diagramme des pertes de masses.....	79
Figure III.19: Pavé rectangulaire en Béton drainant.....	80
Figure III.20: Béton drainant de différentes formes.....	80
Figure III. 21: Béton drainant après décoration.....	81
Figure III.22: Perméabilité du béton drainant réalisé.....	81

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1: Paramètres physico-mécaniques du ciment.	25
Tableau II.2: Paramètres chimiques du ciment.	25
Tableau II.3: Essai d'équivalent de sable 0/1.	27
Tableau II.4: Essai d'équivalent de sable 0/3.	27
Tableau II.5: Essai au bleu de méthylène de sable 0/1 et 0/3.	28
Tableau II.6: Analyse Granulométrique sable 0/1.	29
Tableau II.7: Analyse Granulométrique Sable 0/3.	30
Tableau II.8: Valeurs préconisées pour module de finesse.	32
Tableau II.9: Module de finesse du sable 0/1.	32
Tableau II.10: Module de finesse du sable 0/3.	32
Tableau II.11: Analyse granulométrique du sable optimal.	34
Tableau II.12: Analyse granulométrique du gravier 3/8	36
Tableau II.13: Masse volumique absolue et apparente des granulats.	38
Tableau II.14: Composition du béton drainant adoptée.	47
Tableau II.15: Consistance du béton à partir de l'affaissement.	49
Tableau II.16: Classification du béton d'après la vitesse du son.	57

Chapitre III

Tableau III.1: Essais à l'état frais.	62
Tableau III.2: Tableau des classes de consistance	64
Tableau III.3: Teneur en air du béton en fonction du diamètre.	66
Tableau III.4: Tableau Classe de consistances béton	67
Tableau III.5: Résultats des écrasements d'éprouvettes.	71
Tableau III.6: Résultats résistances à la traction.	73
Tableau III.7: Classification du béton d'après la vitesse du son.	76
Tableau III.8: Masse volumique en fonction du temps.	78
Tableau III.9: Masses des éprouvettes à partir de 0 jours jusqu'à 28 jours.	79
Tableau III.10 : Perte de masse en (%).	79

Introduction Générale

Introduction Générale

Le béton a conquis le marché de la construction de manière hégémoniale au détriment des autres matériaux, ce dernier est devenu le matériel le plus utilisé au monde dans tous les domaines du BTP. Environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement. Il est indispensable et irremplaçable pour des raisons techniques et économiques (facilité de mise en œuvre et son coût relativement bas).

Le béton est un matériau composite dans lequel les granulats (gravier et sable) sont liés par une pâte de ciment hydratée constituant un ensemble homogène. Le mélange se fait par une détermination précise de quantité de ciment, sable, eau, graviers et adjuvants mais cette liste peut très vite s'élargir si on vise des propriétés particulières on opte pour une utilisation des fines complémentaires ou additions minérales.

Le confectionnement d'un béton approprié à sa destination et son utilisation consiste à définir et optimiser ainsi que classer le dosage et la composition granulatoire des divers constituants. Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement : un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C vont former avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment hydratée qui constituera le liant du béton.

Le rapport E/C joue un rôle essentiel durant tout le cycle de vie du béton car par exemple l'eau en excès peut le rendre plus fluide à l'état frais par contre ce dernier sera moins résistant à l'état durci, mais aussi on peut utiliser des additions minérales tels que (Les cendres volantes, fumées de silice...) comme ajout dans le but de modifier les propriétés du béton selon notre besoin d'utilisation.

Il est nécessaire, non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

L'évolution du béton a permis d'en faire un matériau de choix qui ouvre autant de possibilités dans le domaine de la construction, qui n'a de limites que la créativité et l'imagination de l'homme. Parmi ces possibilités c'est le **béton drainant** connu sous d'autres appellations le **béton poreux** qui est notre sujet de recherche dans ce mémoire de fin d'études.

Notre mémoire sera structuré comme suit :

Le chapitre (A) : Ce chapitre visera une étude bibliographique (aperçu générale), il sera constitué d'une introduction sur le béton drainant ensuite nous allons passer aux principaux composants de ce matériau ainsi leur particularités puis nous mettons en revue ces propriétés à l'état frais et à l'état durci mais aussi ces applications et domaine d'utilisation dans le monde ainsi que ces avantages. Enfin nous concluons ce chapitre par notre conclusion.

Le chapitre (A') : Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale nous avons défini les caractéristiques physiques et mécaniques des différents matériaux (graviers, ciment, sables, eau) comme le module de finesse, le pourcentage en fines, équivalent de sable, masse volumique absolue et apparente. Une analyse granulométrique a été effectuée pour les classes granulaires 0/1, 0/3, 3/8. Ensuite nous allons procéder à une formulation d'un béton drainant (poreux), puis réaliser des essais à l'état frais et durci afin de caractériser la qualité de notre béton comme l'ouvrabilité, la résistance à la compression et traction, la porosité, et la perméabilité.

Le chapitre (A'') : Ce chapitre est la dernière partie de notre mémoire nous allons présenter les résultats et discussions des essais réalisés sur le béton à l'état frais et à l'état durci avec une réalisation de pavés et blocs en béton drainant.

Enfin notre travail sera clôturé par une conclusion générale tout en synthétisant les principaux résultats trouvés et en suggérant des perspectives sur l'emploi du béton drainant.

Chapitre I

Etude bibliographique

1-Introduction :

Le **béton drainant** (également appelé **béton poreux**, **béton perméable**) a été confectionné pour la première fois dans les années 80 en Europe sous les murs porteurs dans la construction des aires de jeux et parcs, des revêtements de la chaussée...etc. Ce dernier a connu un grand développement lors des dernières décennies grâce à ses nombreux avantages.

Ce matériau est un type de béton particulier, il est hautement perméable possédant jusqu'à 35 % de porosité qui permet l'absorption et l'évacuation des eaux de pluie et facilite leur écoulement naturel dans le sol de façon durable. Il évite ainsi la saturation du réseau de traitement des eaux pluviales.

Le béton drainant permet d'évacuer en une minute de 85 à 730 litres d'eau par mètre carré selon la taille des gros granulats et la densité du mélange. [1]



Figure (I.1) : Echantillon d'un béton drainant.

2- Composition du béton drainant :

Généralement, le béton drainant est un mélange de granulats, du ciment et d'eau. Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques de ce béton, de faibles quantités de sables ont utilisés et parfois, quelques types particuliers d'adjuvants et d'additions minérales. [3]

2-1 Ciments :

Tous les types normalisés de ciment sont convenables pour la formulation du béton drainant. Toutefois, l'utilisation du ciment portland est généralement recommandée. La quantité de ciment dépend généralement de la formulation, c'est à dire du volume de granulats utilisé, du rapport E/C et de la porosité effective visée. [3]



Figure (I.2) : Echantillon d'un ciment.

2-2 Granulats :

Pour les granulats le diamètre maximum ne doit pas dépasser 10mm. Les granulats les plus indiqués sont ceux à grains anguleux, de classe granulaire 3-8mm, qui permettent d'obtenir un squelette granulaire stable.

La forme, la texture et la distribution granulaire vont avoir un effet sur la mise en place, la facilité de compaction ainsi que la performance globale du matériau à l'état durci.

Le sable est parfois utilisé dans la formulation du béton drainant. Certaines études ont montré que l'ajout d'un certain pourcentage de sable nous offre une meilleure durabilité aux cycles de gel/dégel et une meilleure résistance à la compression tout en ayant une porosité adéquate. Généralement, la quantité de sable utilisé se situe entre 0 et 8% de la masse totale des granulats [3].



Figure (I.3) : Echantillon d'un gravier 3/8.



Figure (I.4) : Echantillon d'un sable 0/3.



Figure (I.5) : Echantillon d'un sable 0/1.

2-3 Eau :

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication du béton drainant.

Le rapport E/C généralement utilisé dans la formulation du béton drainant est compris dans l'intervalle entre 0,26 à 0,50.

Le béton drainant doit avoir une apparence humide et métallique au moment de la mise en place, et la pâte doit avoir une viscosité suffisante pour qu'elle puisse enrober les granulats et permettre une bonne cohésion du mélange.

La quantité d'eau est un facteur critique pour l'obtention d'un béton drainant de qualité acceptable.

Une teneur trop élevée en eau peut amener la pâte à se drainer et obstruer les vides du mélange.

Par contre une faible quantité d'eau aboutira à un matériau difficilement maniable et à de faible développement des résistances mécaniques tant à l'état frais ou à l'état durci. [3]

2-4 Les adjuvants :

Les adjuvants utilisés doivent satisfaire aux exigences, aux conditions et aux normes.

Lorsque le rapport E/C est faible et inférieur à 0,30 ($E/C < 0,30$), on peut utiliser un Superplastifiant ou un agent réducteur d'eau afin d'obtenir la réduction d'eau désirée pour une maniabilité meilleure et des propriétés mécaniques améliorées.

D'autres adjuvants sont également utilisés, notamment les retardateurs de prise pour permettre une mise en place adéquats, les agents de viscosité pour une meilleure cohésion de la pâte sur les granulats et les agents entraîneurs d'airs pour améliorer la durabilité du béton au cycle gel/dégel.[3]

3-Particularités du béton drainant

La principale qualité du **béton drainant** réside dans son **extrême porosité** pouvant aller jusqu'à 35%. Contrairement aux pavés de bétons traditionnels ou à l'asphalte, il absorbe les eaux pluviales, limitant ainsi le risque de stagnation de l'eau et de chutes dues à un sol trop glissant en empêchant la formation de flaques. Le cycle de l'eau étant respecté, le risque d'affaissement des sols par assèchement est donc proche de zéro. Par ailleurs, il constitue une solution économique dans la mesure où sa mise en œuvre rend facultative la mise en place d'un système d'évacuation des eaux pluviales aux abords des maisons. [5]

La porosité du béton drainant combinée à sa perméabilité font de lui, une solution respectueuse de l'environnement, il absorbe en moyenne, 600 litres d'eau par minute, voire jusqu'à 4000 litres d'eau par minute pour les bétons les plus performants.

En limitant le ruissellement des eaux, il facilite le désengorgement des égouts et favorise le développement durable en zone urbaine.

En dehors de ses propriétés hydrauliques, il offre de hautes performances mécaniques qui en font une solution adaptée pour la création d'une allée carrossable. Grâce à sa granulométrie fine et à sa ventilation naturelle qui fait qu'il ne chauffe jamais au soleil, contrairement à certains revêtements de sols extérieurs, il offre un confort optimal pieds nus.

Facile à entretenir, il offre une excellente résistance au gel, au dégel et aux rayons UV. C'est un matériau caractérisé par sa grande durabilité, il atteint facilement une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Contrairement au béton bitumineux, il ne suinte pas et ne colle pas aux pieds ou aux pneus des véhicules. En outre, il est disponible dans de nombreux coloris et permet de réaliser des sols personnalisés. [6]

4-Propriétés du béton drainant ;

Les propriétés du béton drainant dépendent de sa formulation initiale, mais également de sa mise en place.

4-1-Résistance à la compression et à la flexion :

La résistance à la compression dépend du compactage obtenu au moyen des équipements utilisés pour la mise en place. Cette dernière augmente avec le compactage, mais un meilleur compactage diminue aussi la teneur en air.

La résistance à la compression varie de 3 à 30 MPa. L'ajout d'une petite quantité de sable augmente la résistance à la flexion. Les résistances à la compression et à la flexion sont étroitement reliées à la teneur en vides. [7]

4-2-Masse Volumique :

La masse volumique va dépendre de plusieurs facteurs: les caractéristiques des granulats (teneur en vide et la granulométrie), la teneur en liant, le rapport eau/liants et la méthode de compaction. La masse volumique va grandement dépendre de l'énergie de compaction lors de la mise en place. [8]

4-3- Porosité et perméabilité (taux de percolation) :

La perméabilité ou le taux de percolation du béton drainant est la vitesse à laquelle l'eau peut s'écouler à travers le revêtement en place et en fonction des vides interconnectés du matériau.

La porosité minimale pour obtenir un taux de percolation acceptable est de 15%. La vitesse de percolation augmente de façon très importante avec la teneur en vide du béton.

Le principal défi réside à trouver l'équilibre entre un taux de percolation acceptable et une résistance à la compression suffisante. [7]

4-4- Résistance au cycle du gel/dégel :

Le béton drainant présente historiquement une très bonne durabilité (durée de vie supérieure à une dizaine d'années généralement).

Pour avoir un bon comportement de notre béton vis-à-vis du cycle gel/dégel il faut s'assurer d'avoir :

- Une bonne perméabilité du béton (formulation).
- Une fondation drainante de matériau granulaire suffisamment épaisse pour servir de réservoir à l'eau drainée et l'empêcher de se saturer lorsqu'il gèle.
- Une mise en place adéquate.
- La présence des drains perforés au besoin pour compenser une perte de perméabilité en hiver ou d'un sol peu perméable. [8]

4-5- Rhéologie et Pompabilité :

- L'affaissement ne devrait pas être spécifié comme critère d'acceptation en chantier.
- Le béton drainant est considéré comme un béton à affaissement nul.
- Il est impossible de pomper ce type de béton. [9]

4-6- Absorption acoustique :

Le béton drainant peut être utilisé pour atténuer l'intensité acoustique des bruits causés par le frottement des pneus sur la chaussée et les moteurs de véhicules par réflexion sur la surface du pavage. Donc l'utilisation d'un matériau poreux comme le béton drainant limiterait la propagation de bruit et dissiperait l'énergie acoustique.[9]

Le béton drainant possède des propriétés qui le différencient des autres bétons à l'état frais ou à l'état durci nous allons citer quelques propriétés à l'état frais et à l'état durci [9]:

A l'état frais :

- ✓ Affaissement : (0mm – 40mm).
- ✓ Masse volumique : 70% béton conventionnel.
- ✓ Temps de mise en place : 60 – 90 min

A l'état Durci :

- ✓ Densité : (1600 – 2000 Kg/m³)
- ✓ Perméabilité :(145 l/m²/min – 400 l/m²/min)
- ✓ Force de compression (4MPa – 30MPa).

5-Utilisation du béton drainant :

L'évacuation rapide et efficace des eaux pluviales s'est avéré le principal objectif par la mise en place des réseaux de drainage. Le béton drainant a été développé avec l'intention de diminuer la quantité d'eau de ruissellement produite, de ralentir son écoulement et de réduire sa charge polluante pour une saine gestion des eaux de ruissellement.

Contrairement aux revêtements standards qui sont «imperméables» et qui génèrent d'importants volumes d'eau de ruissellement lors de fortes pluies, la chaussée en béton drainant permet à l'eau de la traverser aisément et d'être évacuée dans une fondation drainante dimensionnée à cet effet.

Le béton drainant peut être utilisé dans plusieurs applications où la gestion des eaux de ruissellement est un enjeu, ce dernier est utilisé dans [3] :

- Voies piétonnières.
- Trottoirs.
- Parking.
- Courts de tennis.
- Aires de jeux et parcs.
- Fondations drainantes de routes.
- Revêtements pour les bords de piscine.



Figure (I.6) : Sol en béton drainant.



Figure (I.7) : Plage de piscine en béton drainant.



Figure (I.8) : Trottoir en béton drainant.



Figure (I.9) : Réalisation d'un parking avec un béton drainant.

5-1-L'utilisation du béton drainant dans le monde :

La première utilisation du béton drainant a été en Angleterre dans la construction des bâtiments à deux niveaux. Après la deuxième guerre mondiale et suite à la destruction d'une grande partie des infrastructures le béton drainant a connu une grande croissance et une forte utilisation qui est due à sa faible demande en matériau par rapport au béton conventionnel.

Le béton drainant est utilisé dans les applications ne requérant pas de grandes performances mécaniques. Les applications les plus courantes sont : les aires de stationnement, les chaussées à faible trafic, les murs porteurs dans la construction de bâtiments.

La construction la plus remarquable a été réalisée à Stuttgart en Allemagne où un grand bâtiment de 19 étages a été construit, les six premiers étages sont construits avec un béton conventionnel, alors que les treize étages supérieurs sont construits avec du béton poreux.

Le béton poreux a connu dans la dernière décennie une grande influence au Canada où de nombreux projets ont été réalisés en privilégiant ce matériau. [2]



Figure (I.10) Réalisation d'un trottoir au CANADA (ONTARIO 2008)

6-L'utilité du béton drainant :**6-1-Gestion des eaux de ruissellement et réduction des surfaces imperméables :**

La gestion des eaux de ruissellement est une préoccupation majeure en milieu urbain. Les boisés, les espaces verts, la végétation, les milieux humides ont fait place à des surfaces imperméables. Le développement urbain a pour effet de remplacer des sols imperméables qu'on retrouve à l'état naturel par des surfaces perméabilisées. L'emploi de revêtements perméables comme le béton drainant contribue à la gestion durable des eaux de pluie. [5]

6-2-Réduire ou éliminer les besoins de bassins de rétention :

L'utilisation du béton drainant comme revêtement perméable dans les aires de stationnement permet de diminuer, voir éliminer les bassins de rétention d'eau et les systèmes d'irrigation puisque l'eau de pluie peut passer au travers de sa structure poreuse et de la fondation drainante.

Les propriétaires des aires de stationnement pourront bénéficier d'une diminution des coûts de construction et d'entretien des bassins de rétention, écumoières, pompes, tuyaux de drainages et autres systèmes de gestion des eaux pluviales.

L'élimination et la réduction des dimensions des bassins de retentions va permettre une utilisation maximale de l'espace. L'espace ainsi récupéré peut être utilisé à d'autres fins [5].

6-3-Réduction des îlots de chaleur urbains :

Un îlot de chaleur urbain est un endroit dans un milieu urbain où la température de l'air est plus élevée qu'ailleurs et qui a pour effet d'augmenter localement la chaleur ressentie. La surchauffe observée en milieu urbain provoque une hausse de la consommation d'énergie à des fins de climatisation, accroît la formation de polluants et aggrave certaines maladies respiratoires et cardiovasculaires.

Pour cela le béton drainant peut être une bonne solution grâce à sa porosité ouverte, le béton drainant utilisé dans les aires de stationnement contribue à la diminution de la température par évaporation de l'eau et emmagasine moins de chaleur. [9]

6-4 -Réduction de la pollution :

Dans les aires de stationnement, la pollution des véhicules sous la forme d'hydrocarbures, de métaux lourds et de sédiments s'accumule sur la chaussée et se retrouve ensuite dans l'environnement avec les eaux de ruissellement.

Avec le béton drainant, ces contaminants percolent dans la porosité du béton, la fondation drainante et le sol existant. Ce processus permet d'éliminer par filtration, absorption et activité microbienne jusqu'à [9]:

- 95% des matières en suspension.
- 65% de la teneur en phosphore.
- 82% de la teneur en azote.
- 98 à 99% des métaux.

6-5-Meilleures sécurités :

Le béton drainant renvoie l'eau de pluie dans le sol plutôt que de ruisseler sur la surface de roulement. Ainsi, on observe :

- Réduction des risques d'inondation.
- Élimination des flaques d'eau durant les fortes pluies.
- Élimination des reflets du pavage humide. [9]

7-Mise en place :

7-1-préparation du sol :

Avant de poser le béton drainant, il est impératif de bien préparer le sol pour éviter tout vieillissement prématuré du béton. Il faut qu'il y ait une réservation suffisante pour accueillir le béton. Si ce n'est pas le cas, il faut décaper le sol existant sur une épaisseur d'au moins 15 à 20 cm. Évidemment, s'il y a un sol ancien (carrelage, béton, pavés), il doit être cassé, la sous-couche doit être perméable. Le béton ne doit pas être posé directement sur la terre, sous peine de voir apparaître des fissures à court terme. Une fois le sol assaini, on verse une sous-couche de cailloux (0/20 concassé convient) puis on compacte à l'aide d'une plaque vibrante pour assurer un matériau compact et homogène. Cette sous-couche assurera l'écoulement des eaux de ruissellement. Cette étape est primordiale car, elle garantit la réussite du projet. [13]



Figure (I.11) : Préparation du sol

7-2- Pose des joints de dilatation :

Il est important de poser des joints de dilatation, au moins tous les 20 m² ou 5 m linéaires, toujours pour éviter les fissures et pour donner une touche déco, les joints sont aussi l'occasion de faire des changements de couleurs dans votre béton.



Figure (I.12) : Pose des joints de dilatation

7-3-Etalage du béton drainant

C'est cette étape qui va être la plus longue et la plus fastidieuse. En effet il faut transporter énormément de béton final et ensuite il faut étaler, égaliser et le claquer. Quand le béton arrive il est encore humide bien sur et il a un aspect proche de celui de la terre. Il faut donc l'étaler au râteau afin de remplir tous les vides et que la zone soit entièrement couverte.



Figure (I.13) : Etalage du béton drainant

7-4-Fin du chantier :

Une différence très importante par rapport au béton traditionnel qu'on lisse, le béton drainant se claque, avec des raquettes chaussées aux pieds. Le claquage permet de conserver la perméabilité du support.

Il faudra attendre quelques heures avant de marcher sur le béton drainant, et 1 semaine environ avant d'y garer un véhicule. Il est important des respecter ces temps de séchage afin de conserver toutes les propriétés et l'aspect de votre béton drainant.



Figure (I.14) : Damage du béton drainant.

8- Avantages du béton drainant :

Le béton drainant est plus intéressant à plusieurs titres et nettement performant que le béton bitumineux, il possède de nombreux avantages à plusieurs niveaux :

➤ **Résistance :**

Il est hautement résistant. Le béton drainant est prévu pour durer plusieurs dizaines d'années, contrairement à l'enrobé qui est prévu pour durer une dizaine d'années.

➤ **Vertus drainantes :**

Il possède des qualités drainantes : plus de flaques d'eau grâce à une infiltration immédiate des pluies dans le sol. De plus, Il est antidérapant, ne glisse pas sous la pluie.

➤ **Confort :**

Il ne chauffe pas, sa température baisse grâce à sa ventilation naturel, sa granulométrie fine permet un certain confort pieds nus (autour des piscines). Il ne suinte pas, donc ne colle pas aux pieds, ni aux pneus des voitures, le béton drainant est sans odeur.

➤ **Esthétique :**

On peut choisir une association de plusieurs couleurs pour une personnalisation de notre sol.

➤ **Ecologique :**

Le procédé spécifique de fabrication du béton drainant le rend perméable ce qui permet une infiltration de l'eau de pluie. Le cycle naturel de l'eau est respecté.

➤ **Facilité d'entretien :**

Le béton drainant est facile à entretenir et il nécessite peu d'entretien. [7]

9-Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini le béton drainant et citer ses composants afin de déterminer ses particularités et ses caractéristiques les plus importantes, pour sa mise en œuvre et l'obtention d'un béton de qualité, puis on a cité son utilité et quelques domaines d'utilisation ainsi que ses avantages. Les différentes étapes de pose du béton drainant ont également été présentées.

Nous concluons que le béton poreux est différent du béton ordinaire, il contient des vertus drainantes qui permettent l'évacuation et l'absorption d'eau dans une période rapide, ce qui fait de lui un matériau de choix pour différents projets.

**Problématique
et
axes de recherches**

Problématique Et Axe de recherche

Le béton drainant, par sa capacité à laisser passer l'eau à travers ses interstices est une réelle alternative pour résoudre le problème de ruissellement des eaux pluviales.

La plupart des zones urbaines à surfaces horizontales sont construites en béton bitumineux. De part son prix relativement élevé, ne permet l'évacuation des eaux pluviales qu'à travers les pentes longitudinales et transversales. Les surfaces planes telles que les parkings continuent à subir des inondations suite au caractère imperméable de ces bétons bitumineux.

Le béton drainant est une véritable alternative qui pourrait pallier à ces inondations à répétition. Le béton drainant étant poreux, présentant plusieurs pores interconnectés et très perméable, laisse passer l'eau à travers ses vides et ne nécessite pas de pentes pour l'évacuation des eaux pluviales.

Son faible dosage en ciment et rapport E/C relativement faible, lui procurent une faible ouvrabilité (béton ferme) et sa résistance à la compression varie entre 8 et 14 MPa.

Pour toutes ces raisons et afin de vérifier ses caractéristiques, le présent travail vise les axes de recherches suivants:

- L'élaboration d'un béton drainant sans avoir recours aux additions, aux adjuvants et aux fibres (métalliques ou de carbone) comme conseillés par certains fabricants.
- Etude des caractéristiques des bétons à l'état frais.
- Caractérisation des bétons à l'état durci par un maximum de tests disponibles localement.
- Elaboration de pavés et montrer s'il est possible de confectionner des formes particulières

A la fin de ce travail, nous essayeront de répondre à toutes ces préoccupations et nous apporterons les réponses voulues.

Chapitre II

Matériaux et Méthodes

1-Introduction :

Le béton drainant est un matériau qui se compose de ciment, de graviers, de sable, d'eau et éventuellement d'un adjuvant si on veut modifier ses propriétés.

Pour obtenir un bon béton qui répond aux exigences demandées, il est préférable que ses constituants soient convenables aux normes.

Dans ce chapitre sera présentée une étude détaillée des matériaux utilisés dans la confection des bétons ainsi que les différentes méthodes d'essais adoptées. Les caractéristiques des différents matériaux utilisés seront caractérisés et cela, à travers la réalisation de plusieurs essais d'identification. [15]

2-Matériaux :**2-1-Le ciment :**

Le ciment utilisé dans notre étude est un Ciment Portland Composé (**CPJ CEM II 42.5**) de provenance de la cimenterie de ZAHANA. [14]



Figure (II.1) : Echantillon de ciment (CPJ CEM II 42.5).

2-1-1- Caractéristiques du ciment :

Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé sont présentées dans le tableau [II.1] ci-dessous.

Tableau [II.1] : Paramètres physico-mécaniques du ciment.

Paramètres physico-mécaniques	Résultats			Norme NA 442
	Mini	Maxi	Moy	
S S Blaine Cm ² /g	3464	4035	3702	-
Consistance (%)	25.60	27.00	26.01	-
Début de prise (mn)	148	185	165	≥60mn
Compression 02 jours (MPa)	19.62	23.54	21.32	≥10
Compression 07 jours (MPa)	35.34	41.61	38.06	-
Compression 28 jours (MPa)	42.75	49.93	45.62	≥42.5
Flexion 0é jours (MPa)	3.96	4.71	4.31	-
Flexion 0é jours (MPa)	5.37	6.27	5.91	-
Flexion 0é jours (MPa)	6.12	7.05	6.56	-
Expansion à chaud sur pate (mm)	0.38	5.00	1.72	≤10

Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé sont données dans le tableau [II.2] suivant :

Tableau [II.2] : Paramètres chimiques du ciment.

Paramètres chimiques	Résultats			Norme NA 442
	Mini	Maxi	Moy	
Perte au feu (%)	6.20	8.98	7.73	-
CaO libre(%)	0.35	1.40	0.67	-
SiO ₂ (%)	17.04	20.14	18.00	-
Al ₂ O ₃ (%)	4.01	4.90	4.32	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2.79	3.26	3.15	-
CaO(%)	62.10	64.14	63.06	-
MgO(%)	0.81	0.94	0.84	≤5
SO ₃ (%)	1.72	2.94	2.15	≤4
Cl ⁻ (%)			<0.01	≤0.1
Insolubles (%)	-		0.79	-

2-2 Le sable :

Deux types de sables ont été utilisés. Un sable fin (0/1 mm) et un sable concassé (0/3mm) de provenance de la carrière OZMERT, commune de FROUHA, wilaya de MASCARA.



Figure (II.2) : Echantillon de sable OZMERT 0/1.



Figure (II.3) : Echantillon de sable OZMERT 0/3.

Dans ce qui suit, quelques résultats des essais de caractérisation de ces sables seront présentés.

a-Equivalent de sable : (P18-598) :

- L'équivalent de sable est donné par la formule suivante :

$$E_s = 100 \frac{h_2}{h_1} \quad (\text{II.1})$$

- L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_{sv} = 100 \frac{h'_2}{h_1} \quad (\text{II.2})$$

Tableau [II.3] : Essai d'équivalent de sable 0/1.

	Eprouvette 1	Eprouvette 2
h₁	11,9	11,9
h₂	8,9	8,7
h'₂	8,9	8,7
E.S.V	74,38	73,10
E.S	74,38	73,10
Moyenne Es(%)=73,74		

Tableau [II.4] : Essai d'équivalent de sable 0/3.

	Eprouvette 1	Eprouvette 2
h₁	10,6	10,2
h₂	7,3	7,4
h'₂	7,3	7,4
E.S.V	68,86	72,54
E.S	68,86	72,54
Moyenne Es(%)=70,70		

Les deux sables présentent des équivalents de sable vérifiant $70\% \leq E_s < 80\%$: On conclue que notre sable est propre et présente faible proportion de fines argileuses et par suite notre essai est concluant.

b- Essai au Bleu de méthylène :(EN933-9) :

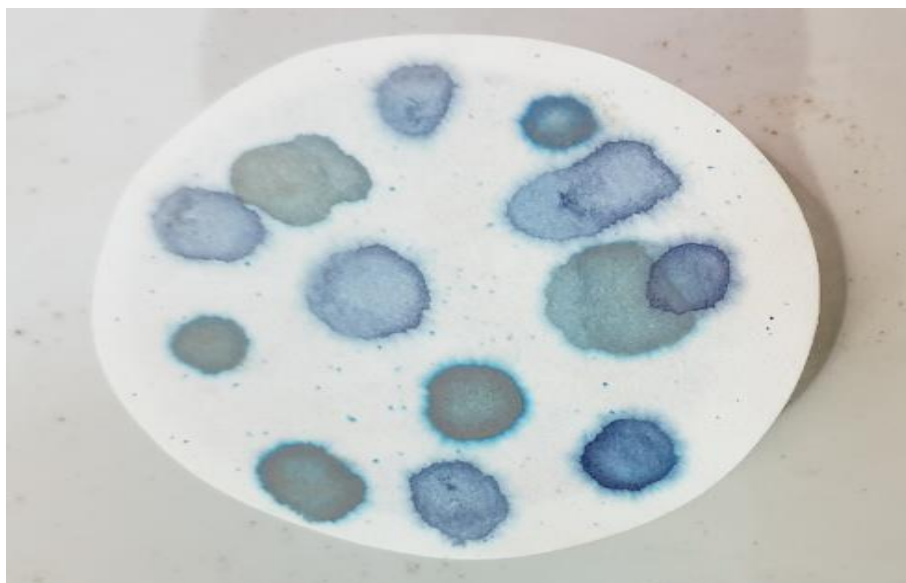
L'essai au bleu de méthylène permet de détecter la présence de fines argileuse dans les sables, qui sont prohibées dans les sables destinés à la confection des bétons.

Les résultats des essais au bleu de méthylène sont présentés dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau [II.5] : Essai au bleu de méthylène de sable 0/1 et 0/3.

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction granulométrique 0/1 et 0/3 mm (au gramme près) M1	M1=200g
Quantité totale de solution de colorant ajoutée, V1	V1=9ml
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par kg de grains de fraction 0/1 et 0/3 mm	MB=0.45%

Moins la valeur du bleu est élevée, plus le sable est propre. La valeur trouvée (**MB=0,45%**) étant faible, on conclue que les deux sables sont propres.

**Figure (II.4) : Résultat de l'essai.**

c- Analyse granulométrique par tamisage : (NF P 18-560) :

Les résultats des essais de l'analyse granulométrique effectuée sur chaque sable sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau [II.6] : Analyse Granulométrique sable 0/1.

DIAMETRE TAMIS mm	POIDS TOTAL SEC=526g			
	REFUS (g)	REFUS CUMULE	REFUS %	TAMISATS %
5,0	0,00	0,00	0,00	100,0
2,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1,25	0,00	0,00	0,00	100,0
0,63	0,00	0,00	0,00	100,0
0,315	300,0	300,00	57,03	43,0
0,160	199,0	499,00	94,87	5,1
0,080	12,0	511,00	97,15	2,9
Module de finesse (NF P 18-554)		1,5	1,8<MF<3,2	
Teneur en fine (%)		2,9		

Tableau [II.7] : Analyse Granulométrique Sable 0/3.

DIAMETRE TAMIS mm	POIDS TOTAL SEC (g)=808g			TAMISATS %
	REFUS (gr)	REFUS CUMULE	REFUS %	
6,3	0,00	0,00	0,00	100,0
5,0	0,00	0,00	0,00	100,0
2,5	170,00	170,00	21,04	79,0
1,25	223,00	393,00	48,64	51,4
0,63	143,00	536,00	66,34	33,7
0,315	101,0	637,00	78,84	21,2
0,160	53,0	690,00	85,40	14,6
0,080	32,0	722,00	89,36	10,6
Module de finesse (NF P 18-554)		3,00	1,8<MF<3,2	
Teneur en fine (%)		10,6		

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus des deux tableaux [II.6] et [II.7] seront représentés dans les courbes suivantes :

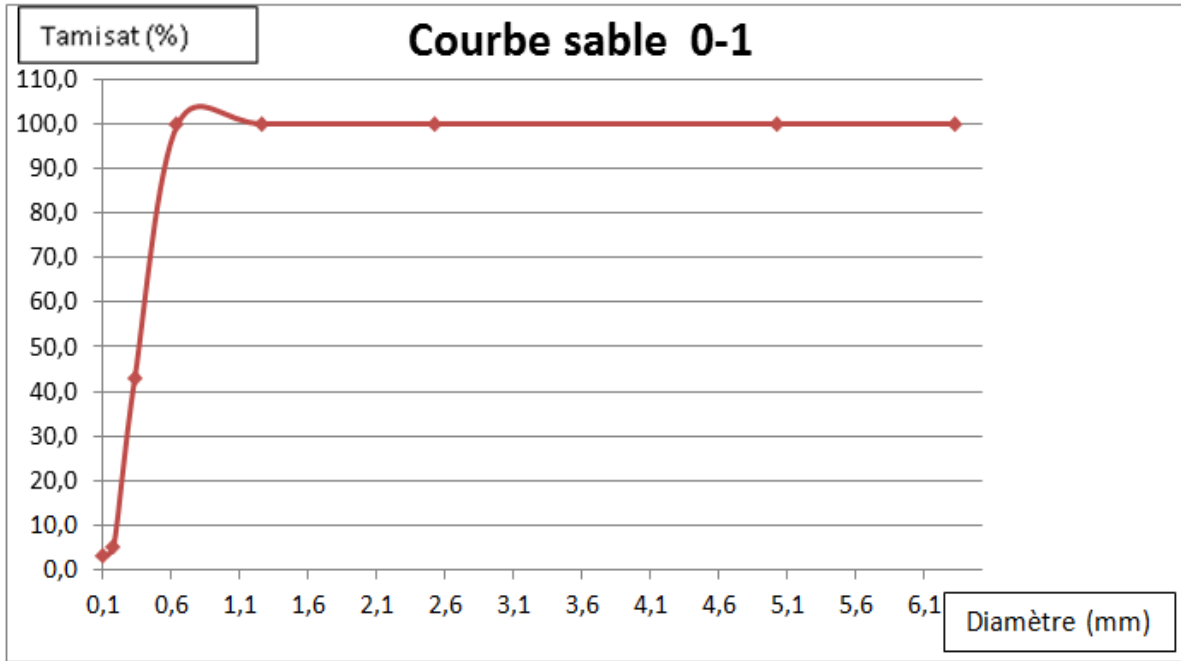


Figure (II.5) : Courbe Granulométrique du sable 0/1.

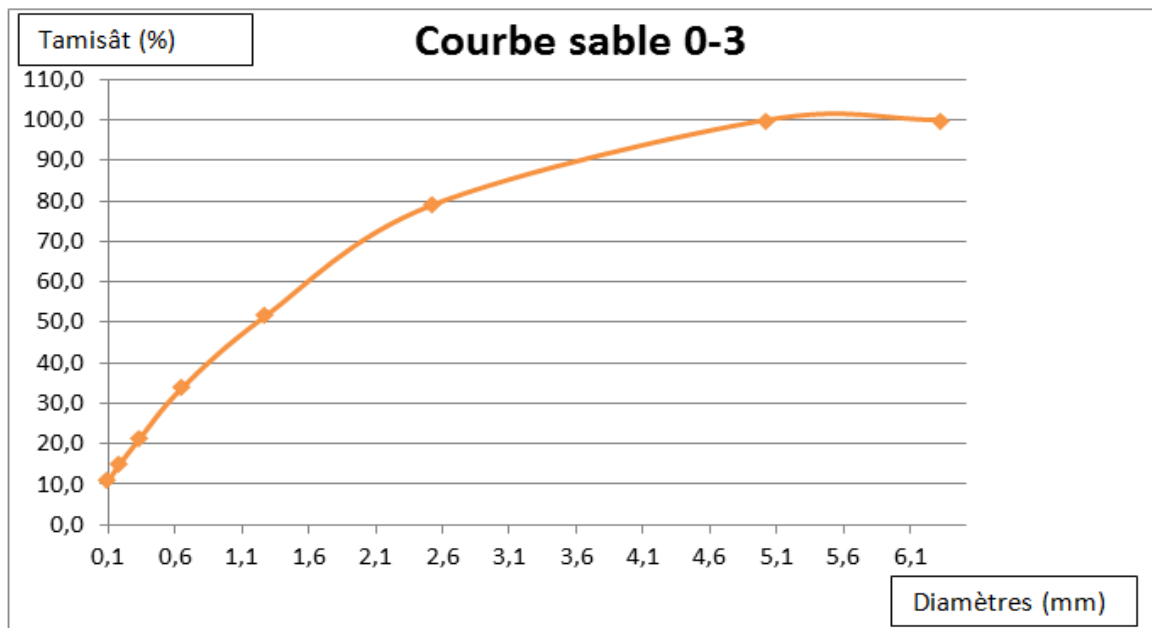


Figure (II.6) : Courbe Granulométrique du sable 0/3.

Se basant sur ces résultats, il est clair qu'une correction est nécessaire pour l'utilisation de ces sables dans la confection du béton. Pour cela, le choix d'un module de finesse optimale est de fixer $MF = 2,7$.

d-Calcul des proportions du sable optimal (MF=2,7) :

d-1-Module de finesse :

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur la série des tamis. La valeur du module de finesse dépend de la teneur en fines. [17]

Tableau [II.8] : Valeurs préconisées pour module de finesse.

Module de finesse	Spécifications
2.8<MF<3.2	Sable grossier
2.2<MF<2.8	Sable moyen (optimal)
1.8<MF<2.2	Sable fin

D'après les résultats obtenus par la granulométrie on peut ressortir les refus pour calculer le module de finesse [Tableau II.6 et II.7].

Tableau [II.9]: Module de finesse du sable 0/1.

Sable 0/1		
Tamis	0,315mm	0,160mm
Refus cum (%)	57,03	94,87

$$MF = \sum \text{Refus} / 100 = (94,87 + 57,03) / 100 = 1.50. \quad (\text{II.3})$$

Tableau [II.10]: Module de finesse du sable 0/3.

Sable 0/3					
Tamis	2,5mm	1,25mm	0,63mm	0,315mm	0,160mm
Refus cum (%)	21,04	48,64	66,34	78,84	85,40

$$MF = \sum \text{Refus} / 100 = (21,04 + 48,64 + 66,34 + 78,84 + 85,40) / 100 = 3,00. \quad (\text{II.4})$$

Nous allons choisir un sable optimal qui sera un mélange entre le sable 0/1 et 0/3, pour cela nous allons fixer un module de finesse de **2,7** compris dans l'intervalle idéale [2,2- 2,8].

Pour avoir le sable optimale final nous allons prendre un mélange de deux quantités différentes de sable (0/1 et 0/3). Les proportions des deux sables seront fixer par la méthode D'ABRAMS (dite méthode du module de finesse).

$$\blacksquare S(0/1) \% = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} = \frac{2,7 - 3}{1,5 - 3} = 0,20 \rightarrow S(0/1) \% = 20\%. \quad (\text{II.5})$$

$$\blacksquare S(0/3) \% = \frac{MF - MF_1}{MF_2 - MF_1} = \frac{2,7 - 1,5}{3 - 1,5} = 0,80 \rightarrow S(0/3) \% = 80\%. \quad (\text{II.6})$$

Le Sable Finale sera composé de **20%** du sable (0/1) et **80%** de sable (0/3).



Figure (II.7) : Sable optimal.

L'analyse granulométrique de notre sable final est représenté dans le tableau suivant :

Tableau [II.11]: Analyse granulométrique du sable optimal.

DIAMETRE	POIDS TOTAL SEC=2000g			
TAMIS mm	REFUS (gr)	REFFUS CUMULE	REFUS %	TAMISATS %
6,3	0,00	0,00	0,00	100,0
5,0	0,00	0,00	0,00	100,0
2,5	383,00	383,00	19,15	80,9
1,25	453,00	836,00	41,80	58,2
0,63	261,00	1 097,00	54,85	45,2
0,315	354,0	1 451,00	72,55	27,5
0,160	271,0	1 722,00	86,10	13,9
0,080	58,0	1 780,00	89,00	11,0
Module de finesse (NF P 18-554)		2,70	1,8<MF<3,2	
Teneur en fine (%)		11,00		

Les valeurs obtenues du tableau [II.11] ainsi que les deux tableaux précédents [II.6] et [II.7] nous ont permis de tracer la courbe granulométrique du sable optimal ainsi qu'une courbe représentante les trois sable 0/1 et 0/3 et sable optimal (corrigé) en vue de comparaison.

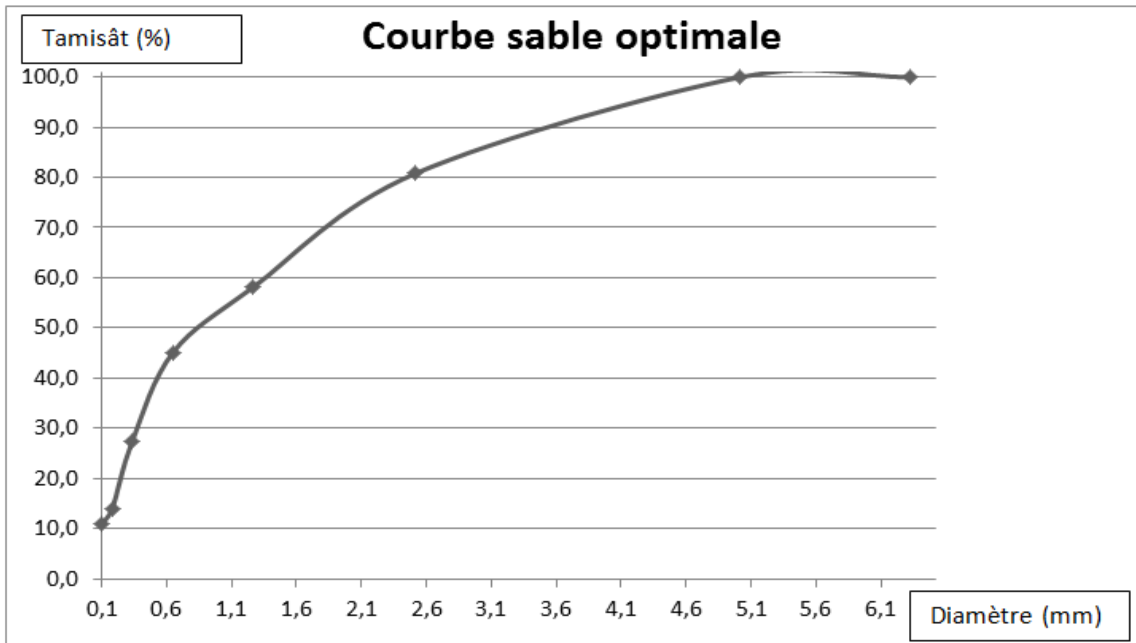


Figure (II.8) : Courbe granulométrique du sable optimal.

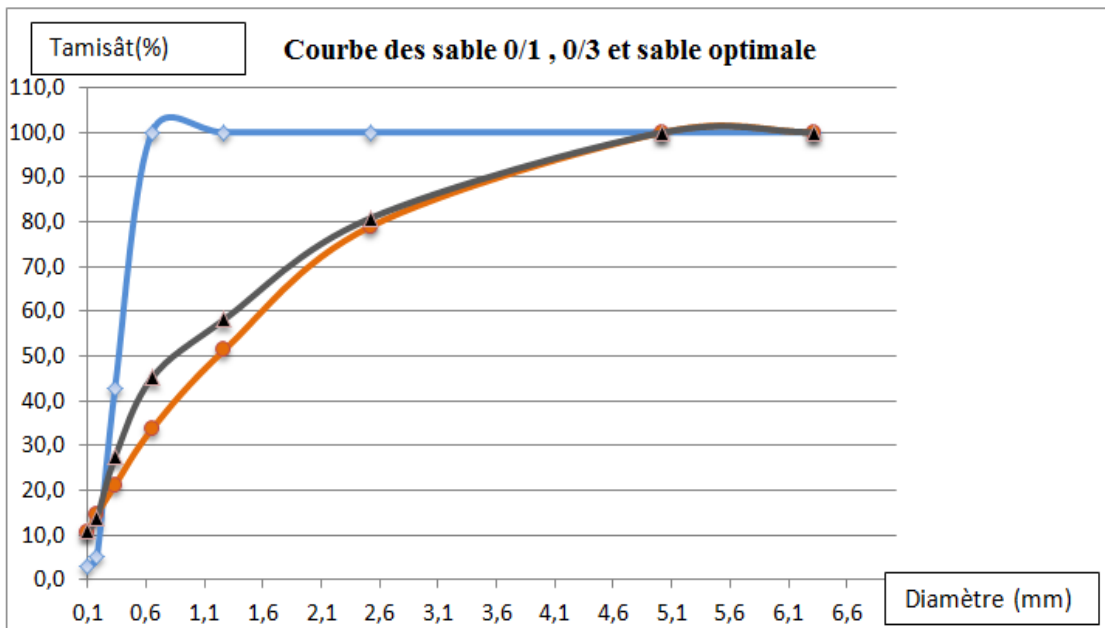


Figure (II.9) : Courbe granulométrique des trois sables.

2-3 Le gravier :

a-Analyse granulométrique par tamisage : (P18-560) :

Le seul gravier utilisé pour la confection de notre béton drainant est un gravier 3/8 mm. L'analyse granulométrique du gravier 3/8 a été effectuée de la même façon en suivant les mêmes étapes citées précédemment pour le sable.

À la fin de notre essai nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau [II.12] : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

DIAMETRE		POIDS TOTAL SEC (g) = 1865g		
TAMIS mm	REFUS (g)	REFUS CUMULE	REFUS %	TAMISATS %
12,5 mm	0,00	0,00	0,00	100
10 mm	0,00	0,00	0,00	100
8,0 mm	0,00	0,00	0,00	100,0
6,30 mm	226,00	226,00	12,12	87,9
5,0 mm	380,00	606,00	32,49	67,5
2,50 mm	1 000,00	1 606,00	86,11	13,9
1,25 mm	121,00	1 727,00	92,60	7,4
0,63 mm	31,00	1 758,00	94,26	5,7
0,5 mm	13,00	1 771,00	94,96	5,04

Les résultats obtenus du tableau [II.12] nous ont permis de tracer la courbe granulométrique du gravier 3/8.

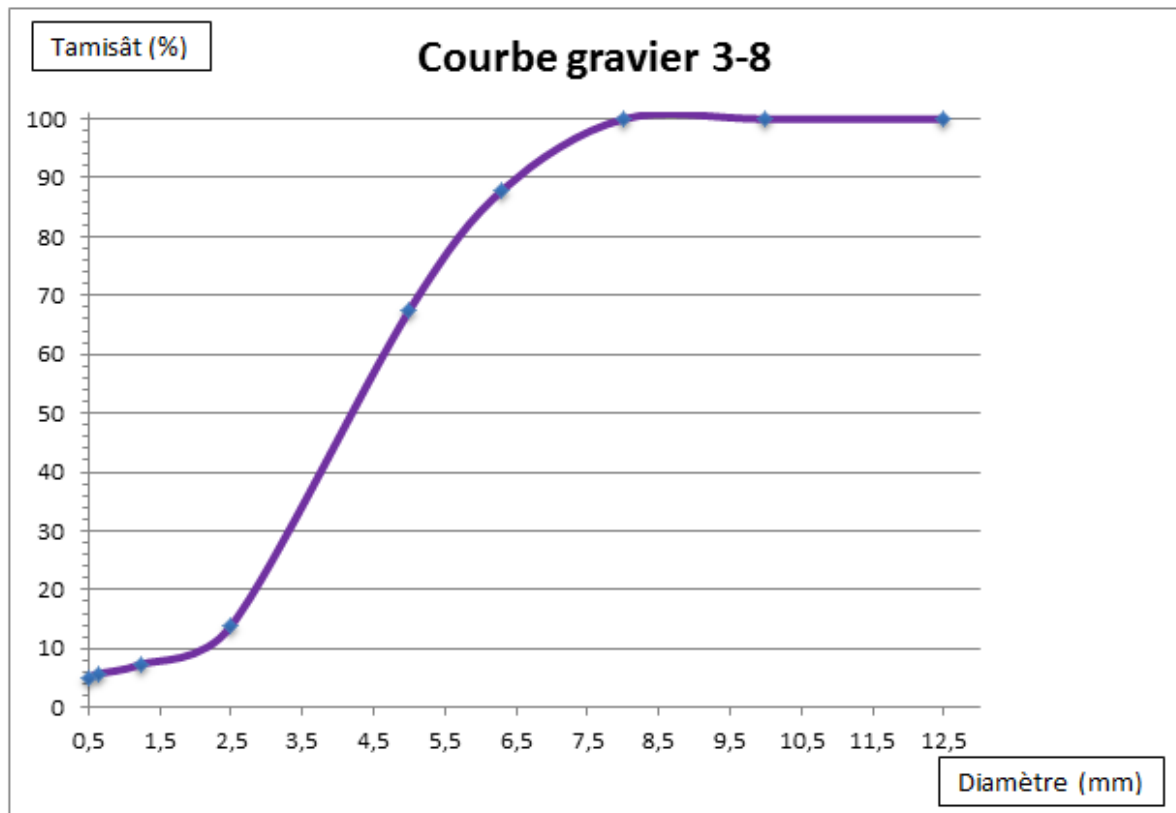


Figure (II.10) : Courbe granulométrique du gravier 3/8.

Au vue de l'allure de la courbe, aucune correction n'est nécessaire sur ce gravier.

2-4 L'eau :

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable du robinet propre et exempté d'impuretés.



Figure (II.11) : Eau de gâchage.

2-5-Masses volumiques:(NF P18-555) :

La masse volumique d'une substance, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume.

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont calculés d'après la norme française (NF P18-555). [20]

a- Masse volumique apparente (MVa) :

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

b-La masse volumique absolue ou réelle (MVr) :

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir en compte les vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Les résultats obtenus des essais de mesure de ces masses volumiques sont donnés dans le tableau [II.10] ci-dessous.

Tableau [II.13] : Masse volumique absolue et apparente des granulats.

Type des granulats	Sable 0/1	Sable 0/3	Gravier 3/8
MVa(g/cm ³)	1.45	1.44	1.38
MVr (g/cm ³)	2.58	2.58	2.66

3-Méthodes :**3-1 Equivalant de sable : (P18-598) :**

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, il rend compte globalement de la quantité et la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floclent

La valeur de l'équivalent de sable (Es) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.
[22]

a-1-Principe de l'essai :

L'essai consiste à déterminer les caractéristiques des différents sables utilisés.

a-2-Appareillage utilisés :

- Spatule et cuillère.
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200ml.
- Balance.
- Chronomètre.
- Règle gradué.
- Goupillon pour nettoyage des éprouvettes.
- Eprouvettes.



Figure (II.12) : Matériels utilisés.

a-3-Description de l'essai :

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution flocculant dans une éprouvette graduée et d'agiter 90 cycles de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon, ensuite laver et remplir les éprouvettes avec le tube plongeur, puis laisser reposer 20 minutes en évitant toutes vibrations.

L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.



Figure (II.13) : Epreuves de l'essai Equivalent de Sable.

3-2- Essai au Bleu de méthylène :(EN933-9) :

L'essai au bleu de méthylène, ou « essai au bleu », est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol selon la norme (EN933-9).

L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles. [10]

b-1-Principe de l'essai :

L'essai a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration.

b-2-Appareillage utilisés :

- Burette.
- Papier-filtre.
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200ml.
- Tige de verre.
- Agitateur a ailettes.
- Balance.
- Chronomètre.
- Becher.



Figure (II.14) : Appareillages utilisés.

b-3- Description de l'essai :

Un échantillon de sable est préparé de telle sorte qu'il contienne au moins 200g, ensuite préparer la suspension il convient de verser 500ml d'eau distillée dans le bicher et ajouter l'échantillon préparé.

Agiter la solution a la vitesse de 600tr/min pendant 5minutes, puis agiter continuellement a 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, la tache qui se forme est en générale d'une couleur bleu foncé, entourée d'une zone humide incolore.

Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleu clair persistante d'environ 1mm apparait autour du dépôt central .Le point finale doit être confirmé en répétant le test à la tache toutes les minutes pendant 5min sans ajout de solution de colorant.

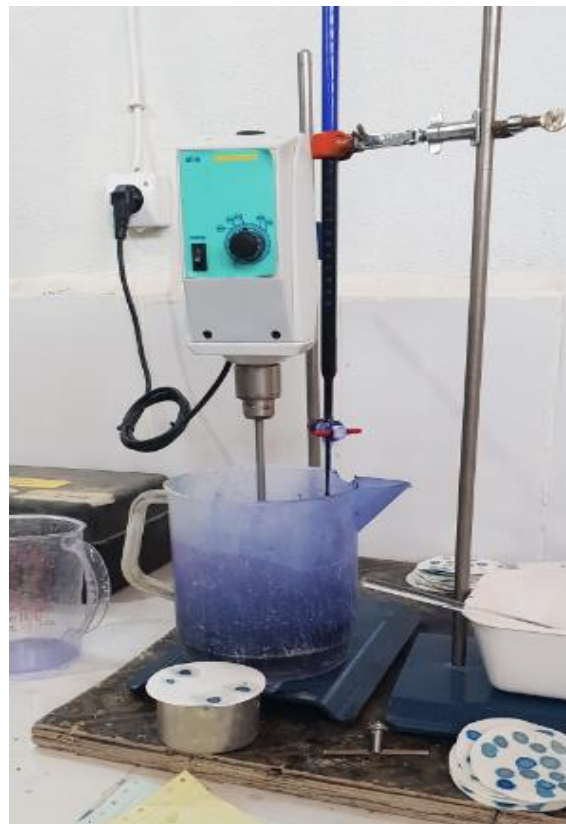


Figure (II.15) : Essai au bleu de méthylène.

3-3- Analyse granulométrique par tamisage : (NF P 18-560) :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre.

La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement.

Les manipulations et les conditions de manipulation son décrite par la norme **(NFP 18-560)**. [25]

c-1-Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de Tamis de diamètres croissant.

c-2-Equipements nécessaires :

- Une série de tamis d'ouverture de mailles normalisés.
- Des récipients en plastique.
- Une balance.
- Etuve.



Figure (II.16) : Appareillage utilisés.

c-3-Description de L'essai :

L'essai consiste à fractionner le matériau à l'aide d'une série de tamis de tailles décroissantes, afin de déterminer sa classe.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



Figure (II.17) : Sable 0/3.



Figure (II.18) : Sable 0/1.



Figure (II.19) : Tamisage.



Figure (II.20) : Gravier 3/8.

3-4-Détermination de la masse volumique apparente :

Le principe de cet essai est de mesurer la masse d'un échantillon de gravier dont on connaît le volume V, La masse volumique dans ce cas est égale à la masse mesurée M sur le volume V. [21]

$$MVa = \frac{M}{V} \quad (\text{II.7})$$



Figure (II.21) : Essai de la masse volumique apparente.

3-5-Détermination de la masse volumique absolue :**Méthode de l'éprouvette graduée :**

Cette méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. [28]

- 1- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- 2- Peser un échantillon sec M de granulat et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'aires.
- 3- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est alors :

$$MV_r = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (\text{II.8})$$

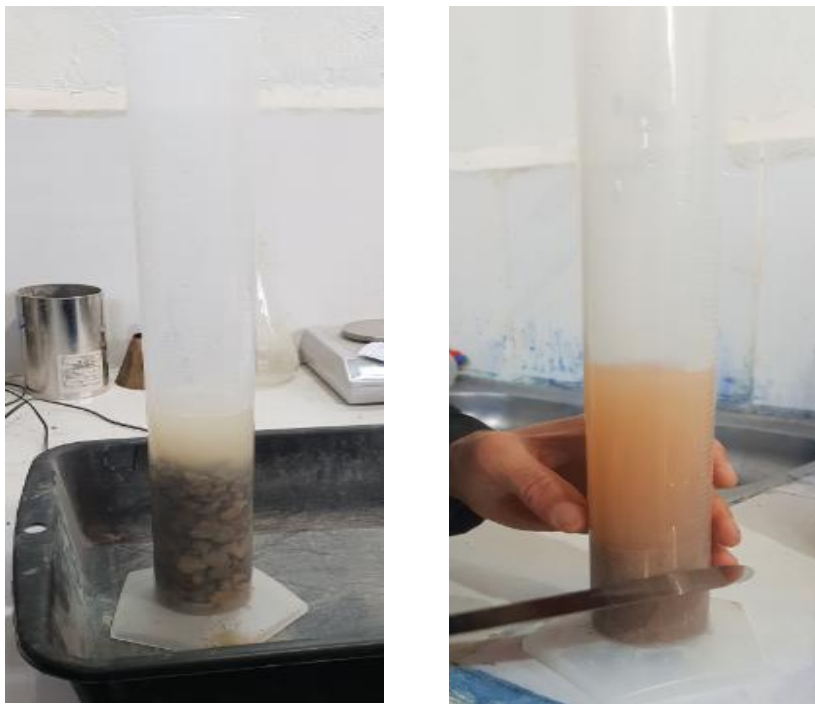


Figure (II.22) : Essai de la masse volumique absolue.

4-Formulation du béton drainant :

Afin d'obtenir un bon béton en fonction des qualités souhaitées nous devons passer par plusieurs étapes et cela à partir des caractérisations des matériaux jusqu'à la formulation.

Les performances requises pour un béton impliquent :

- L'ouvrabilité du béton, généralement définit par l'affaissement au cône d'Abrams.
- La résistance du béton, le plus souvent à 28 jours.
- La durabilité qui conduit à imposer un dosage minimum en ciment et en rapport E/C maximum.

Pour notre cas nous nous sommes basés sur une formule proposée et étudiée au paravent par la filiale « GRANU-OUEST » du groupe « GICA », le tableau suivant présente les différentes quantités pour un mètre cube de béton :

Tableau [II.14] : Composition du béton drainant adoptée.

Composants	Dosage
Sable 0/1	20Kg
Sable 0/3	80Kg
Gravier 3/8	1600Kg
Ciment	250Kg
Eau	110L
E/C	0,44



Figure (II.23) : Réalisation du béton drainant.

5-Essais sur le béton frais :

5-1 Essai au cône d'Abrams : (NF EN 12350-2) :

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en oeuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas les 40mm. [26]

a-1-Principe de l'essai :

Cet essai, consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tonique d'un béton frais.

a-2-Equipement nécessaire :

- Un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, de 20cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10cm de diamètre en sa partie supérieure ;
- Une plaque d'appui.
- Une tige de piquage.
- Un portique de mesure

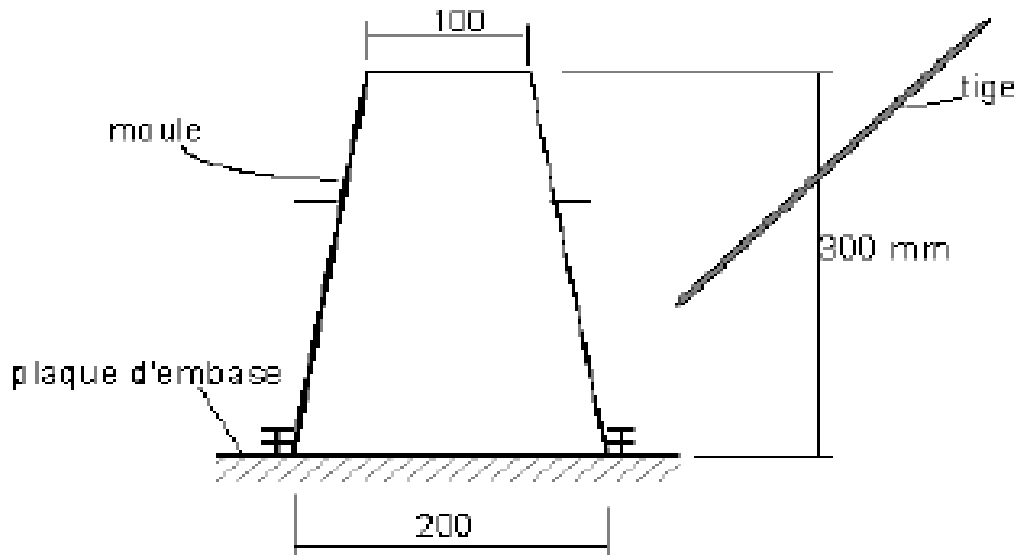


Figure (II.24) : Equipement utilisé.

a-3-description de l'essai :

Pour mesurer l'affaissement on introduit le béton frais dès la fin de sa confection en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage. Araser le moule, démouler immédiatement en soulevant le moule. Après mesurer l'affaissement à partir du point le plus bas du béton.

L'affaissement est mesurer par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage, le résultat obtenu permet de classer les bétons.

- ✓ L'essai doit être réalisé sur une surface horizontale
- ✓ L'essai complet doit être exécuté sans interruption en moins de deux minutes et demie
- ✓ Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes
- ✓ Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près.

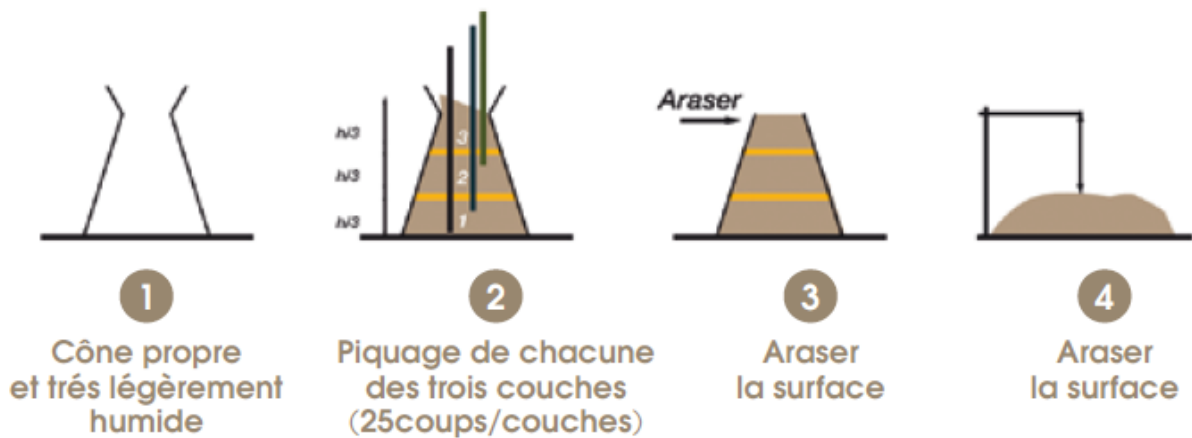


Figure (II.25) : Mode opératoire de l'essai.

Tableau [II.15] : Consistance du béton à partir de l'affaissement.

NFP 18-305 et fascicule 65A CCTG		
Consistance	Affaissement (cm)	Tolérance
Ferme (F)	0 à 4	±1cm
Plastique (P)	5 à 9	±2cm
Très Plastique (TP)	10 à 15	±3cm
Fluide (F)	≥ 16	

5-2- Essai teneur en air:(NF EN 12350-7) :

On égalise un volume d'air connu à une pression connue dans une enceinte hermétique avec le volume d'air inconnu de l'échantillon de béton. Le cadran du manomètre est étalonné en pourcentage (%) d'air correspondant à la pression résultante. [32]

b-1 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai est de déterminer le pourcentage d'air dans un béton frais à l'aide d'un manomètre.

b-2-Equipement nécessaire :

- Une tige de piquage.
- Un manomètre.



Figure (II.26) : Un manomètre.



Figure (II.27) : Tige de piquage.

b-3-description de l'essai :

Après avoir confectionné notre béton on introduit ce dernier dans le moule en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage, ensuite on arase le moule puis préparer le dispositif et introduire un volume d'eau, enfin pomper jusqu'à atteindre notre résultats.



Figure (II.28) : Mode opératoire de l'essai.

5-3-Essai Vébé : (Norme ISO 4110) :

L'essai Vébé est un essai réalisé sur le béton frais généralement d'affaissement nul ou ferme. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas les 40mm. [31]

C-1-Principe de l'essai :

Dans cet essai, la consistance est définie par le temps que met un cône de béton à remplir un volume connu sous l'effet d'une vibration donnée. Plus ce temps est court et plus le béton sera considéré comme fluide.

C-2- Equipement nécessaires :

- un récipient cylindrique de 24 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur.
- un cône d'Abrams.
- un disque horizontal transparent de 23 cm de diamètre.
- une table vibrante équipée d'un vibreur fonctionnant à la fréquence de 3000 vibrations par minute.
- une tige de piquage.



Figure (II.29) : Matériels utilisés.

C-3-Conduite de l'essai :

Le cône d'Abrams est fixé à l'intérieur du récipient cylindrique. Le béton est mis en place dans ce cône. Le cône d'Abrams est alors soulevé et à ce stade de l'essai il est donc possible de mesurer l'affaissement au cône.

L'essai se poursuit ensuite par la mise en vibration de la table durant un temps t tel que la face supérieure du béton soit entièrement aplanie et au contact du disque transparent qui accompagne la descente du béton pendant le compactage.

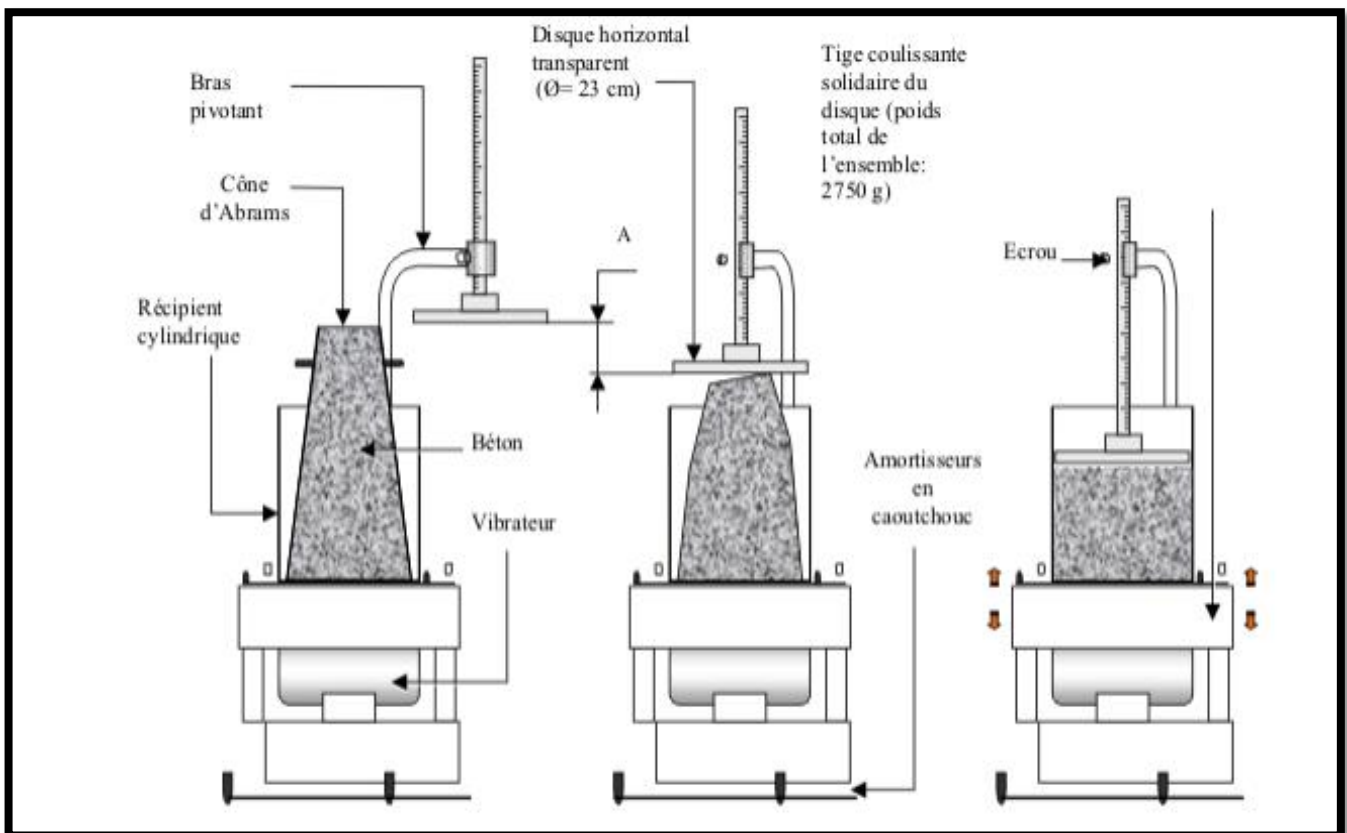


Figure (II.30) : Schéma du mode opératoire de l'essai.



Figure (II.31) : Mise en place du béton dans le cône d'Abrams.



Figure (II.32) : Soulèvement du cône et mesure de l'affaissement A.



Figure (II.33) : Mise en route du vibreur et déclenchement simultané du chronomètre.

6-Essai sur le béton durci :

6-1-Essai de porosité : (NF P18-459) :

La porosité représente le pourcentage de vides communicant entre eux et avec l'extérieur. Elle est mesurée sur une série de 3 éprouvettes 16H32cm après 24h minimum de durcissement du béton. [23]

a-1-Conduite de l'essai :

- Conserver l'éprouvette dans le moule carton pour effectuer l'essai.
- Placer l'échantillon sur la balance, tarer et verser de l'eau dessus jusqu'à ce que le niveau de l'eau atteigne la surface supérieure de l'échantillon.
- Tapoter légèrement sur le côté de l'éprouvette pour faire remonter les bulles d'air.
- Compléter de nouveau avec de l'eau.
- Noter la masse d'eau introduite (M).
- Démouler l'éprouvette, relever ses dimensions (diamètre, hauteur) et calculer son volume (V).
- Calculer la porosité ouverte : $P\% = 100 \times (M / V)$.



Figure (II.34) : Essai de porosité.

6-2-Essai de perméabilité : (NF EN 12697-19) :

La perméabilité à l'eau est déterminée en s'inspirant de la norme **NF EN 12697-19**, la présente Norme européenne spécifie une méthode pour déterminer la perméabilité d'éprouvettes cylindriques de mélanges bitumineux avec des vides communicants. [18]

b-1-Conduite de l'essai :

Une colonne d'eau de hauteur constante est appliquée à l'éprouvette cylindrique. L'eau percole à travers l'échantillon pendant un temps donné. Le principe consiste à mesurer la différence de débit entre l'alimentation du système et l'évacuation du trop-plein, qui correspond au débit traversant l'échantillon.

L'échantillon est en permanence imbibé sur toute sa hauteur.

Les échantillons de béton (éprouvettes ou carottes) doivent être de forme cylindrique.

Il est préconisé de faire l'essai sur un béton ayant une maturation de 28 jours minimum afin de mesurer sa perméabilité dans un état d'hydratation proche de son état final.



Figure (II.35) : Appareillage essai de perméabilité.

6-3-Essai d'auscultation dynamique : (NF EN 12504-4) :

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. [27]

C-1- Conduite de l'essai :

L'essai ultra son passe par trois étapes primordiales :

- **Préparation de l'éprouvette :**

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

- **Point de mesure :**

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, ...) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m, le cas des petits éléments (poteaux, poutres...) les mesures se font en six points.

- **Disposition du transducteur :**

Il est possible de mesurer la vitesse de propagation du son en plaçant les deux transducteurs sur des faces opposées « Transmission directe », sur des faces adjacentes « Transmission semi-directe » ou sur la même face « Transmission indirecte ou transmission de surface » en cas de structure ou d'éprouvette de béton.

Tableau [II.16] : Classification du béton d'après la vitesse du son.

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
>4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
<2000	Très mauvaise

6-4- Essai de compression :(NFP 18-406) :

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire sur une presse, Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions (éprouvettes cylindriques, cubiques). [29]

d-1-Conduite de l'essai :

Les éprouvettes confectionnées sont placées entre les deux plateaux de la presse. le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette étant fixe, le plateau supérieur est mobile.

En dévalant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau inférieur. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.

La charge maximale P est connue lorsque la rupture est enclenchée, on peut dire a ce moment la que l'essai de compression est achevé.



Figure (II.36) : Essai de résistance à la compression.

6-5-Essai de traction (Essai brésilien) (NF P94-422) :

L'essai de résistance à la traction transversale ou essai brésilien permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe. [30]

e-1-Conduite de l'essai :

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon 2 génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.



Figure (II.37) : Essai brésilien.

7- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des différents matériaux (ciment, sable, gravier, eau).

Les courbes granulométriques de toutes les classes granulaires ont été présentées. Les sables pris séparément ont présenté des allures non acceptables (sable fin et sable grossier), nous avons alors procédé à des corrections sur ces sables par application de la méthode dite de module de finesse. A la fin, 20 % de sable fin 0/1 et 80 % de sable grossier était la combinaison adoptée donnant ainsi un module de finesse optimal de valeur 2,7.

Enfin, nous avons confectionné un béton drainant et réalisé des essais à l'état frais puis à l'état durci selon les normes, afin de caractériser la qualité de notre béton comme l'ouvrabilité, la résistance à la compression et traction, la porosité, et la perméabilité.

Chapitre III

Résultats et Discussion

1-Introduction :

Le béton est un matériau composite, c'est-à-dire qu'il est fabriqué à partir d'un mélange de granulats, de ciment, d'eau et parfois d'adjuvants.

Donner des propriétés de résistance ou de durabilité, maniabilité, porosité pour un béton ne s'improvise pas. Il est impératif de faire des essais de contrôle en laboratoire afin d'anticiper son évolution sous contrainte et dans le temps, le béton drainant ne disposera pas des mêmes propriétés qu'un béton de structure. [16]

Il faut signaler qu'ils n'existent pas de normes particulières pour les bétons drainants, ils sont considérés comme des bétons ordinaires aux propriétés et aux compositions particulières. Ils seront cependant soumis aux mêmes normes que celles réservées aux bétons ordinaires.

Les résultats expérimentaux des essais à l'état frais et à l'état durci des bétons drainants élaborés seront présentés dans ce qui suit.

2-Résultats des essais sur béton frais :

Les essais effectués sur le béton à l'état frais ont été réalisés au sein du laboratoire du groupe « GICA », il s'agit de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, de la teneur en air et de l'essai Vèbè. Ces essais ont été réalisés selon les normes citées dans le tableau ci-dessous.

Tableau [III.1] :Essais à l'état frais.

Essais	Normes
Affaissement.	NFP 18-305
Teneur en air.	NF EN 12350-7
Vèbè.	Norme ISO 4110



Figure (III.1) : Essais à l'état frais.

2-1- Affaissement au cône d'Abrams :

L'essai au cône d'Abrams permet d'évaluer la consistance d'un béton, c'est-à-dire évaluer sa fluidité qui est fonction du rapport E/C mais aussi fonction du dosage en ciment et de la teneur en fines. Le béton drainant doit avoir un aspect ni trop sec ni trop fluide. A partir de la valeur de l'affaissement du cône (en mm), on détermine la classe de consistance du béton. [26]



Figure (III.2) : Essai au cône d'Abrams.

Nous allons déterminer la classe de notre béton à partir du tableau suivant :

Tableau [III.2] : Tableau des classes de consistance

Classe	Affaissement en (mm)	Définition	Exemple
S1	De 10 à 40 mm	Béton ferme, construction sur une pente forte	Escalier, accès en pente, béton de voirie
S2	De 50 à 90 mm	Béton plastique, construction sur une pente faible	Dalle pleine, ouvrage d'art
S3	De 100 à 150 mm	Béton très plastique, construction sur surface plane	Dalle, fondation
S4	De 160 à 210 mm	Béton fluide, construction sur surface plane	Dalle, fondation, voile
S5	≥ 220 mm	Béton très fluide, construction sur une surface plane, absence de système de vibration	Dalle, fondation

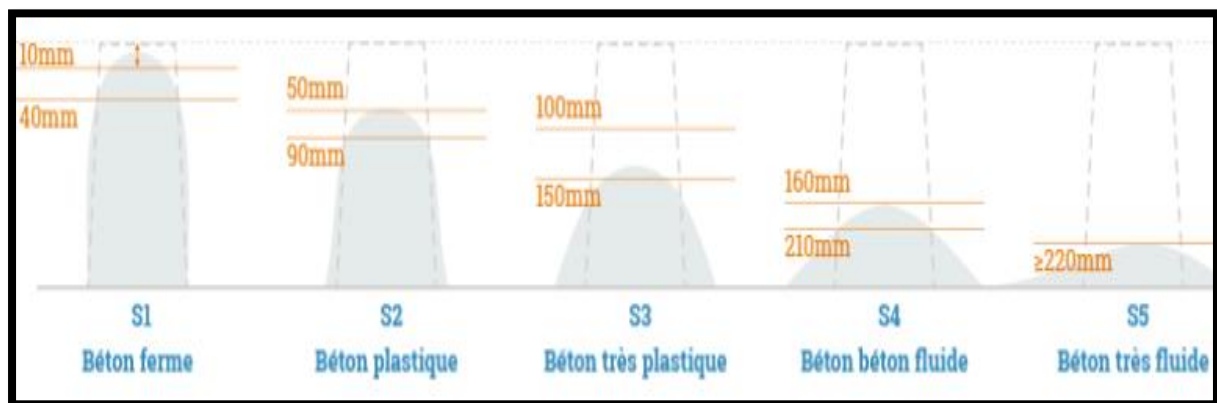


Figure (III.3) : Schéma des classes de consistance du béton.

D'après les résultats obtenus de notre essai nous avons trouvé un affaissement $A=20\text{mm}$ appartenant à l'intervalle [10-40] **donc notre béton est un béton ferme de classe S1.**

Le béton drainant étant de faible affaissement et ferme (**figure III-2**), sera difficile à mettre en œuvre et nécessite donc, un savoir faire particulier pour pouvoir l'étaler sur de grandes surfaces tels que les parkings et les aires de jeux.

2-2-Teneur en air : (AÉROMÈTRE)

La mesure de la teneur en air de notre béton à l'aide d'un Aéromètre facile d'utilisation.

La méthode est très simple, elle est basée sur la compressibilité de l'air contenu dans le béton frais. On met en relation un volume de béton connu et un volume d'air déterminé,

Et la valeur de la pression résultante nous renseigne sur le volume d'air présent, grâce à la loi de Boyle-Mariotte qui relie la pression et le volume d'un gaz à température constante.

La valeur obtenue nous renseignera sur la présence des pores et sur la compacité du mélange. [32]



Figure (III.4) : Essai de la teneur en air.

La teneur en air du béton est fonction du diamètre maximum des granulats (Dmax).

Pour un béton sans air occlus et de bonne composition granulométrique, la teneur en air serait inférieure ou égale aux valeurs suivantes :

Tableau [III.3] : Teneur en air du béton en fonction du diamètre.

D max (mm)	8	12.5	20	25	40
Teneur en air en %	3	2.5	2	1.5	1

C'est à partir du tableau [III-3] précédent qui exprime la teneur en air maximale en fonction du diamètre maximal D_{max} des granulats, qu'on peut dire si notre béton est correct.

Dans notre cas le D_{max} de notre béton est de 8 mm la teneur en air mesurée et donnée par l'aéromètre doit être inférieure ou égale à 3. Or dans notre cas la teneur en air mesurée n'est que de 2.7 %, cela veut dire que notre béton ne présente pas de défaut de compacité ou de granulométrie. Il faut rappeler que contrairement au béton ordinaire, un bon béton drainant doit avoir un taux de porosité à l'air acceptable, pour pouvoir laisser l'eau s'écouler à travers ses interstices.

2-3-Essai Vèbè :

L'essai Vèbè est un essai de détermination de la consistance d'un béton frais par la mesure du temps que met un cône de béton (moulé dans un cône d'Abrams), soumis à une vibration, pour remplir un volume cylindrique.

Cette essai n'est pas applicable au béton dont les dimensions de leur granulats est supérieure à 63 mm.

Si le résultat à l'essai Vèbé (temps Vèbé) est inférieur à (5 s) ou supérieur à (30 s), le béton présentera une consistance qui ne peut être déterminée au moyen de l'essai Vèbé. [31]



Figure (III.5) : Essai Vèbè (matériel et manipulation).

Le tableau suivant représente les classes de consistance du béton en fonction du temps, nous allons déterminer la consistance de notre béton à partir de ce tableau.

Tableau [III.4] : Tableau Classe de consistances béton

Classe	Vébé (s)
V0	≥ 30
V1	De 21 à 30
V2	De 11 à 20
V3	De 6 à 10
V4	De 3 à 5

Le temps (t) exprimé en secondes définit la consistance Vébé. Cinq classes de consistance Vébé sont définies par la norme ENV 206 en fonction du temps (t).

D'après le tableau [III.4] et d'après le résultat obtenu pour le temps t (en veillant à ce que la face supérieure du béton soit entièrement aplaniée et au contact du disque transparent) est de **11 secondes**, donc notre béton appartient à la classe V2 d'après la classification de l'essai Vébé ce qui confirme que notre béton est bien un béton ferme.

3-Résultats des essais sur béton durci :

Les essais sur le béton durci se composent en deux parties : essais destructifs (compression et traction), et essais non destructifs (essai de porosité ouverte, ultrason), ces essais ont été réalisés au sein du laboratoire « GICA » conformément aux différentes normes.

3-1-Essai de la porosité ouverte :

La porosité ouverte représente le pourcentage de vides communicant entre eux et avec l'extérieur. Elle est mesurée sur une série de 3 éprouvettes 16x32 après 24H minimum de durcissement. L'éprouvette doit être couverte de façon à la rendre imperméable sur toute sa surface, seule la face supérieure est laissée ouverte pour pouvoir la remplir d'eau (**Figure III.6**). [23]



Figure (III.6) : Essai porosité ouverte.

La porosité (p%) est calculée par la formule suivante :

$$P\% = \frac{M}{V} * 100 \quad (III.1)$$

Où:

M: Masse de l'eau ayant servi à remplir complètement les vides du béton avant débordement.

Cette masse peut être exprimée en volume (cm³)

V: Volume du béton de forme cylindrique (retirée du moule).

- La masse de l'eau versée est $M = 965\text{g} = 965\text{ cm}^3$.
- V éprouvette= $6430,7\text{ cm}^3$.

$$P\% = \frac{965}{6430.7} * 100 = 15\% \quad (III.2)$$

La porosité de notre béton est de 15%, c'est une porosité (connectée) assez élevée qui pourrait assurer le passage de l'eau de la surface extérieure vers la surface inférieure (extérieure), c'est une caractéristique recherchée pour les bétons drainants.

3-2-Essai perméabilité à l'eau :

La perméabilité à l'eau est déterminée en s'inspirant de la norme **NF EN 12697-19**.

La mesure est réalisée avec un appareil spécifique comme l'indique la figure suivante. [18]



Figure (III.7) : Essai perméabilité à l'eau.

La quantité d'eau infiltrée ou bien drainée pendant un temps fixe de (5 minutes) pour une éprouvette cylindrique 16X32 est de 4551g. **C'est-à-dire que notre béton draine une quantité d'eau 910g/min.**

Pour avoir les quantités d'eau drainée par minutes sur une surface de 1 cm^2 :

- Surface de totale l'éprouvette = 200.96 cm^2 .
- Quantités d'eau drainée par minute : $4551/5 \approx 910 \text{ g/min}$.

Donc la quantité d'eau drainée dans une surface de 1 cm^2 est de 4.5 g chaque minute.

Autrement dit, si l'on considère une surface moyenne horizontale de 10 m^2 , celle-ci pourrait drainer 45 litres d'eau chaque minute, sans tenir en compte le drainage latéral à travers l'épaisseur.

3-3-Resistances à la compression :

Il s'agit d'un des essais les plus courants, il permet de définir la classification du béton. Cette classification s'effectue à partir des valeurs caractéristiques de la résistance à la compression.

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique, cubique ou une carotte à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression. [29]



Figure (III.8) : Resistance à la compression.

Les résultats obtenus des écrasements ont été mesurés aux échéances 3, 7, 14 et 28 jours sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau : [III.5] : Résultats des écrasements d'éprouvettes.

Jours	3	7	14	28
Rc (MPa)	6,55	8,45	10,68	14,44

La variation des résistances à la compression en fonction du temps sont présentés dans la **figure (III. 9)** suivante .:

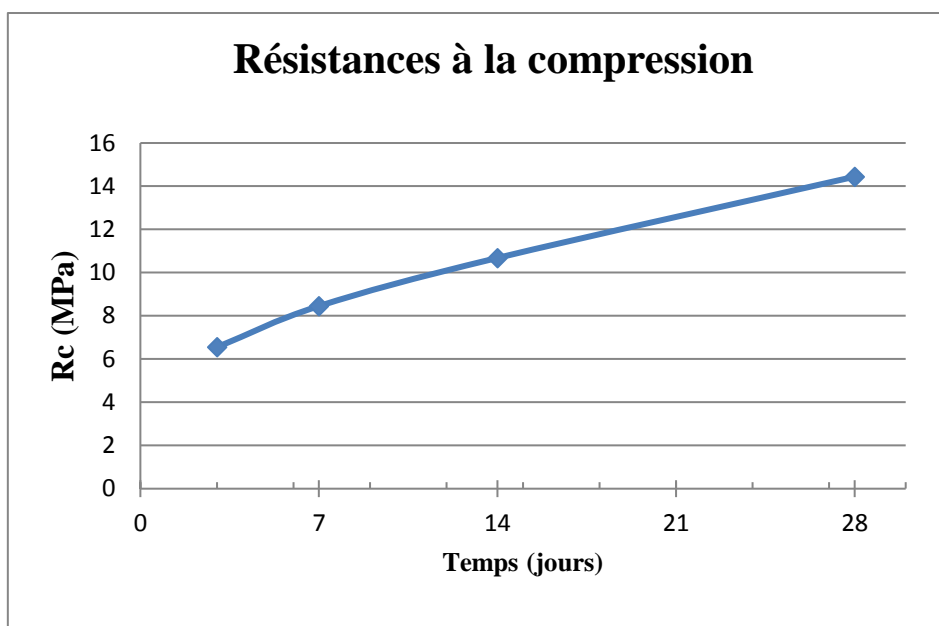


Figure (III.9) : Courbe résistance à la compression.

Du tracé de cette courbe, on constate que toutes les résistances augmentent en fonction du temps. Cette augmentation se poursuit jusqu'à 28 jours. La valeur de la résistance à 28 jours avoisine 14 MPa, ce qui est très acceptable pour un béton drainant. Les résistances à la compression minimales recommandées pour ce type de béton doivent être supérieures ou égales à 8 MPa à 28 jours [3].

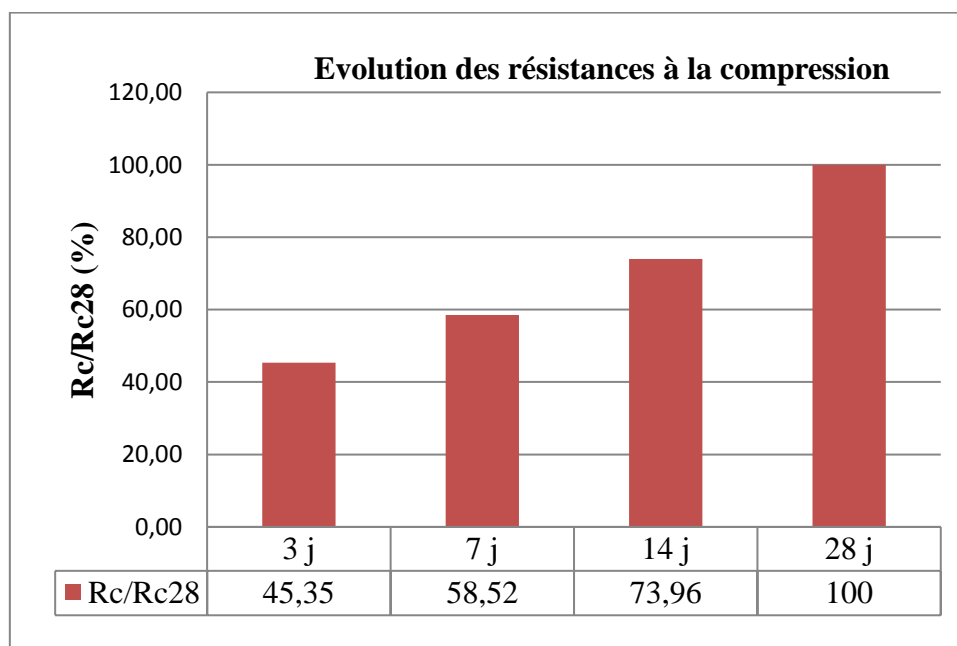


Figure (III.10) : Diagramme de l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

De la **figure (III. 10)** montrant l'évolution des résistances à la compression en fonction du temps, on constate clairement que ces évolutions augmentent de façon continue jusqu'à 28 jours. Les gains des résistances de ces évolutions entre les différentes échéances sont de plus de 13 % entre 3 et 7 jours, de plus de 15 % entre 7 et 14 jours et de plus de 26 % entre 14 et 28 jours.

La valeur de la résistance à la compression à 28 jours de 14 MPa est suffisante pour les surfaces en béton drainant pour piétons et pour circulation occasionnelle de véhicules (véhicules de service, véhicules utilitaires en stationnement dans parking) [1,3]

3-4-Resistance à la traction (Essai brésilien) :

L'essai de résistance à la traction transversale ou essai brésilien permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton.

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon 2 génératrices de l'éprouvette. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette. [30]



Figure (III.11) : Essai de traction.

Les Résultats obtenus des essais à 3, 7, 14, 28 jours sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau [III.6] : Résultats résistances à la traction.

Temps (Jours)	3	7	14	28
Rt (MPa)	1,17	1,52	1,92	2,59

Le tracé de la variation des résistances à la traction est montré dans la figure ci-dessous.

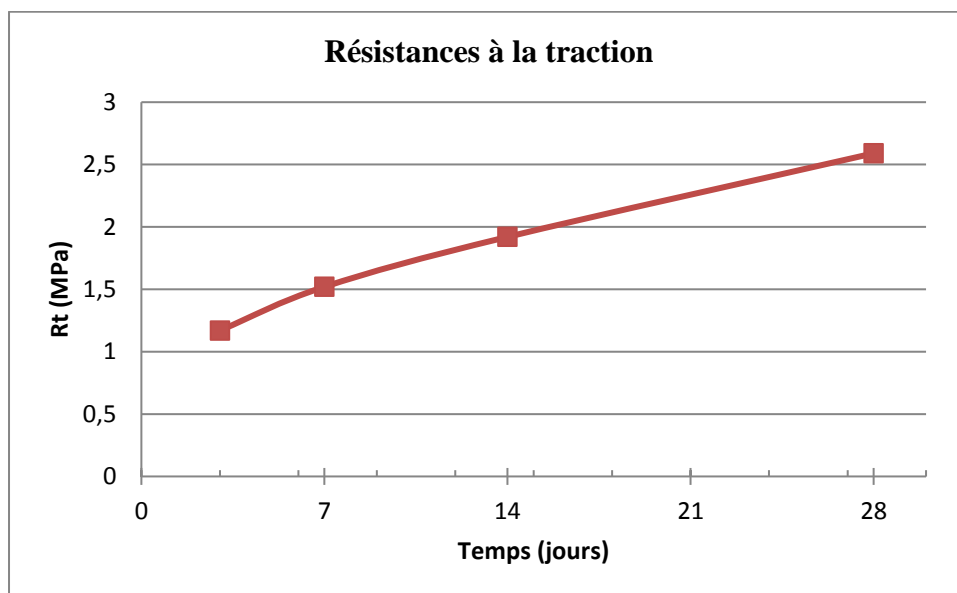


Figure (III.12) : Courbe Resistance à la traction.

La **figure (III.12)** montre que toutes les résistances augmentent d'une façon continue en fonction du temps jusqu'à l'échéance de 28 jours. Les valeurs des résistances mesurées sont faibles comparées à celle d'un béton conventionnel, mais sont suffisantes pour ce type de béton et parviennent à résister à l'arrachement de granulats qui le composent.

La **figure (III. 13)** présente l'évolution des résistances à la traction par rapport à celle de 28 jours en fonction du temps.

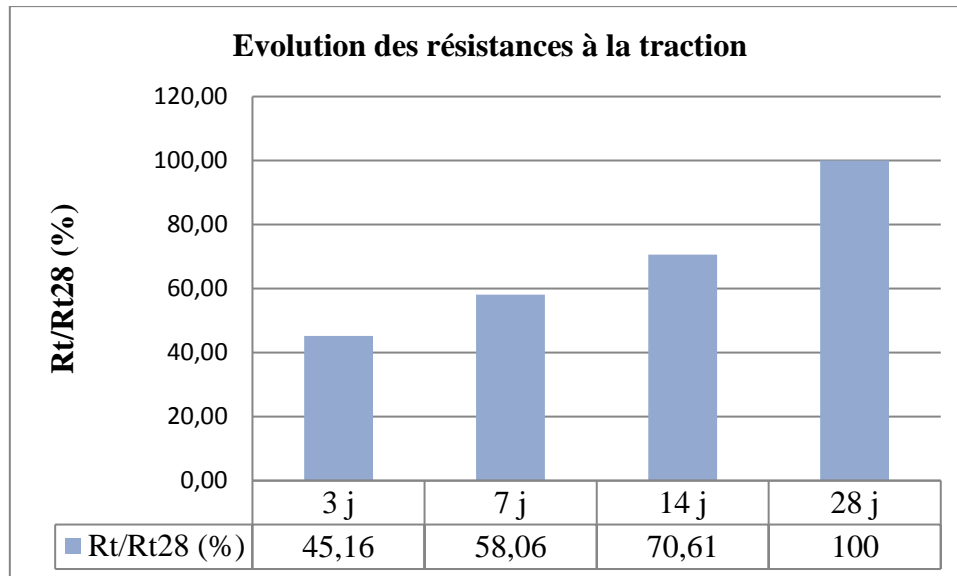


Figure (III.13) : Diagramme d'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps.

De même que les résistances à la compression, les évolutions des résistances à la traction augment continuellement en fonction du temps. Par contre, les gains des résistances de ces évolutions sont plus faibles, elles atteignent un maximal de 29,39 % entre 14 et 28 jours, ce qui est très appréciable en terme de gain de résistance.

3-5- Essai auscultation sonore (Mesure de la vitesse du son) :

La mesure de la vitesse du son dans le béton permet d'évaluer sa résistance de manière non destructive. Cette méthode est intéressante lorsqu'il faut contrôler la régularité du béton d'un élément d'un ouvrage, ou, par exemple, suivre l'évolution d'un béton dans le temps. [27]



Figure(III.14) : Essai d'auscultation sonore.

Après la réalisation de l'essai, le résultat obtenu est de 5253.4 m/s. La vitesse du son trouvée correspond à un béton de qualité excellente, on conclue alors que notre béton est homogène et sa résistance est bonne (Selon tableau ci-dessous).

Tableau [III.7] : Classification du béton d'après la vitesse du son.

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
>4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
<2000	Très mauvaise

3-6-Masse Volumique :

On détermine la masse volumique après avoir retiré les éprouvettes et les avoir laissé à l'air libre pendant 20 minutes afin qu'elles aient une humidité normale.

Juste avant l'écrasement aux différents âges, on détermine la masse volumique en pesant l'éprouvette. La masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{III.3})$$

Où:

M: est la masse de l'éprouvette en (g)

V: est le volume mesuré de l'éprouvette en (cm³)



Figure(III.15) : Mesure de la masse volumique.

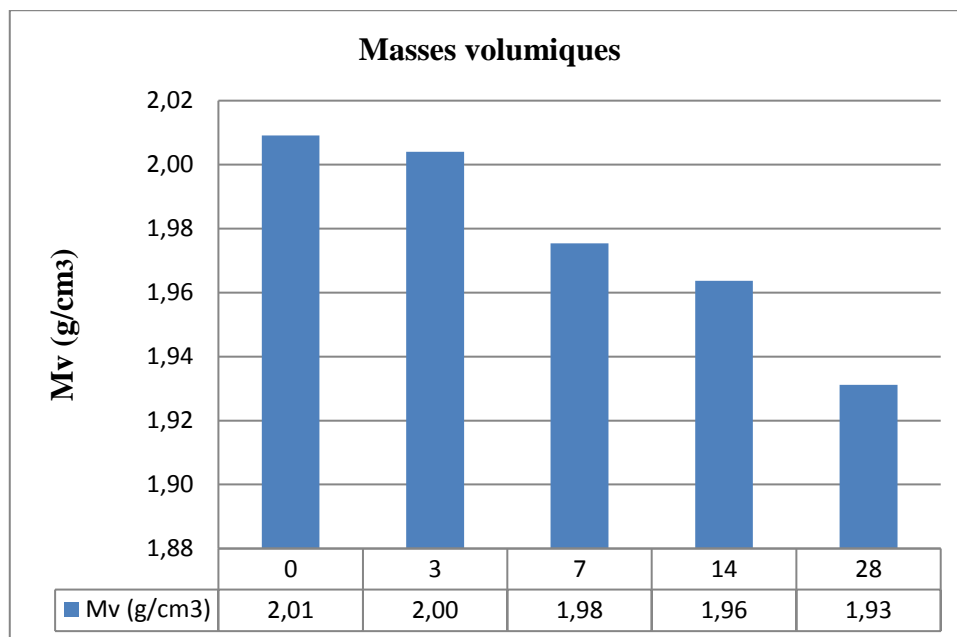
- La Masse Volumique obtenue égale à : $1,57\text{g/cm}^3$.

Les résultats obtenus de la masse volumique à différents âge du béton (3, 7, 14, 28) sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau [III.8] : Masse volumique en fonction du temps.

Temps (jours)	0	3	7	14	28
Masse volumique (g/cm^3)	2,01	2,00	1,98	1,96	1,93

Dans la figure suivante, sont présentées les variations des masses volumiques en fonction du temps. Pour ces mesures, des éprouvettes particulièrement confectionnées ont été dans l'eau à 20°C. Avant chaque mesure de masse ou de volume, les éprouvettes sont sorties, légèrement essuyées et laissées séchées durant 30 min avant de procéder aux mesures et ce, afin de laisser le temps à l'eau présente dans les interstices du béton poreux de s'écouler vers l'extérieur. Le même procédé a été respecté pour les mesures à toutes les échéances jusqu'à 28 jours.



Figure(III.16) : Diagramme de masse volumique.

Des valeurs décroissantes des masses volumiques ont été observées. Plus le béton durci, plus ces diminutions de masses augmentent.

Au départ, la masse volumique de 2,01 g/cm³ correspondait à un béton de densité moyenne. A la fin de l'échéance de 28 jours, ce même béton s'allège et présente une masse volumique de 1,93 g/cm³ synonyme de béton léger.

3-7-Perte de Masse :

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau, la perte de masse est calculer par la formule suivante :

$$P\% = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (\text{III.4})$$

Nous pouvons obtenir une courbe caractéristique de la perte de masse durent 28 premiers jours de notre béton à partir des tableaux suivant :

Tableau [III.9] : Masses des éprouvettes à partir de 0 jours jusqu'à 28 jours.

Temps (jours)	0	3	7	14	28
Masse Éprouvettes (g)	12920	12887	12703	12628	12419

Au premier constat, toutes les masses diminuent en fonction du temps jusqu'à l'échéance de 28 jours. Ces pertes sont des valeurs négatives.

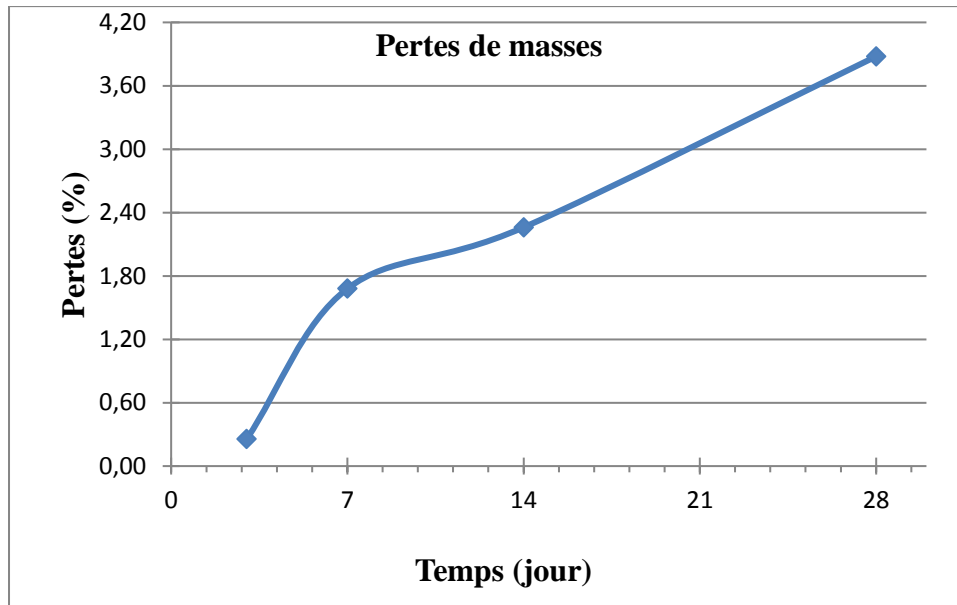
La diminution de masse calculée entre 0 et 28 jours est de l'ordre de 501 g, c'est une perte assez importante constatée. Les différentes pertes de masses sont montrées dans le tableau suivant.

Tableau [III.10] : Perte de masse en (%).

Temps (jours)	3	7	14	28
Perte de masse (%)	0,26	1,68	2,26	3,88

Aux vues des valeurs trouvées, les pertes de masses présentent des valeurs faibles comparées aux bétons ordinaires, ceci serait dû au faible rapport E/C (E/C = 0,44) et au faible dosage en ciment des bétons drainants.

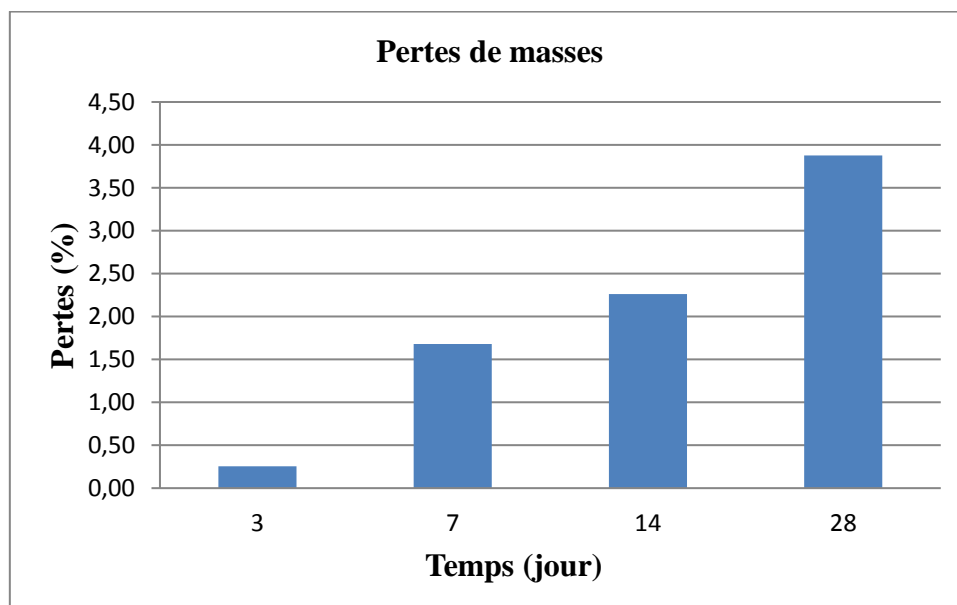
La représentation graphique de ces pertes de masses est donnée sous forme de courbe à la figure (III. 17) ci-après.



Figure(III.17) : Courbe de pertes de masses.

La perte de masse augmente en fonction du temps et cela jusqu'à 28 jours, la pente entre 3 et 7 j est plus considérable, elle diminue entre 7 et 14 j puis tout en augmentant, elle se stabilise au delà de 14 jours.

Afin de voir plus clair, nous présentons cette courbe en diagramme.



Figure(III.18) : Diagramme des pertes de masses.

Cette perte de masse augmente en fonction du temps. Ces pertes seraient essentiellement dues à deux actions simultanées. Elles sont la conséquence directe de l'évaporation de l'eau durant son séchage (avant la conservation des éprouvettes dans l'eau ou durant les différentes manipulations) et à l'action de durcissement du béton. En effet, lorsque le ciment réagit avec l'eau de gâchage, il y a production d'éléments secondaires tels que les CSH, de l'étringite et de la chaux, ces éléments auraient des densités plus faibles que les éléments primaires (qui sont le ciment et l'eau).

4-Réalisations de pavés/blocs en béton drainant :

Après la fabrication de notre béton drainant au sein de la centrale à béton du groupe « GICA », nous avons réalisé quelques blocs et pavés représentatifs en béton drainant montrés dans les figures suivantes:



Figure (III.19) : Pavé rectangulaire en Béton drainant.



Figure (III.20) : Béton drainant de différentes formes.



Figure (III.21) : Béton drainant après décoration.



Figure(III.22) : Perméabilité du béton drainant réalisé.

5-Conclusion :

Dans ce troisième et dernier chapitre, nous avons présenté les résultats des différents essais expérimentaux sur béton frais et durci ainsi que leurs interprétations avec des différentes courbes réalisées à l'aide des résultats obtenus au sein du laboratoire « GICA », ces essais ont été réalisés conformément aux normes.

Des essais sur les bétons confectionnés ont été réalisés à l'état frais et à l'état durci aux échéances conventionnelles de 3, 7, 14 et 28 jours.

La qualité du béton drainant obtenu a été vérifiée et les résultats obtenus lui confèrent une qualité très appréciable.

A la fin de notre partie pratique au sein de la centrale à béton du groupe « GICA », nous avons confectionné un béton drainant de même composition que celle sur utilisée dans les différents essais, et avons réalisé des blocs et pavés représentatifs.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une recherche technique sur un matériau appelé **béton drainant**. Ce béton allie les performances mécaniques, hydrauliques et esthétiques.

Ce projet était l'occasion idéale d'exploiter nos connaissances acquises et plus particulièrement celles de ces deux dernières années de Master. On a trouvé dans ce projet une opportunité d'apprendre et d'approfondir nos connaissances.

L'objectif principal de cette recherche était l'élaboration d'un béton drainant, après l'identification des matériaux utilisés pour sa confection, ont été effectués des essais sur ses performances à l'état frais puis, à l'état durci tels que les mesures des résistances mécaniques, de perméabilité à l'eau, de porosité (pour la détermination du volume des pores et enfin, des essais à l'ultrason (pour vérifier son homogénéité).

Pour atteindre cet objectif, l'étude a été divisée en trois parties :

La première partie concernait l'étude bibliographique, elle nous a permis de fournir le contexte scientifique et technique pour notre travail.

La deuxième partie a porté sur l'étude expérimentale, cette partie a été riche en informations car elle nous a permis de définir les caractéristiques physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés, ainsi que les méthodes des essais effectués.

La dernière partie a présenté l'ensemble des résultats obtenus ainsi que leurs analyses.

Ces résultats nous ont permis d'établir les conclusions suivantes :

- ✚ Le béton caverneux est un béton ferme de classe S1, son affaissement au cône d'Abrams est quasiment nul ou très faible comparé à un béton ordinaire.
- ✚ La perméabilité à l'eau du béton drainant est élevée par rapport au béton ordinaire, ce qui fait de lui le matériau indispensable pour le pavage des routes résidentielles et piétonnes, car il empêche toute stagnation d'eau sur sa surface et diminue les risques d'inondations.

- ✚ L'essai de l'auscultation dynamique nous a permis de constater que notre béton est homogène avec une répartition adéquate de ses granulats. L'adhérence de ce béton le rend antidérapant même sous la pluie.

- ✚ Ce béton a présenté une porosité de 15% assez élevée, interconnectée, assure un drainage aisé des eaux après les grandes pluies. c'est une caractéristique recherchée pour les bétons drainants Pour réduire l'impact des installations urbaines sur la gestion des eaux.

- ✚ La résistance à la compression et à la traction du béton drainant sont faibles comparées au béton de structure par exemple, mais elle est suffisante pour l'utilisation sur les routes carrossables et piétonnes, sa durée de vie est de plusieurs dizaines d'années.

- ✚ La formulation de notre béton n'a pas eu besoin d'utilisation d'ajout ou d'adjuvant, suivant la formule proposée du groupe « GICA » qui s'est avérée satisfaisante et fiable. Cela pourrait sûrement diminuer son prix de revient au m³, ce qui encouragerait son utilisation en remplacement au béton bitumineux le plus souvent utilisé.

Pour conclure notre travail a aboutis à régler le problème poser qui était de proposer une solution à la gestion des eaux pluviales.

A la fin du présent travail, Les objectifs initialement fixés ont été atteints, à savoir l'élaboration d'un béton drainant performant sans avoir recours aux ajouts ni aux adjuvants. Plusieurs formes de pavés ont été confectionnés pour montrer la faciliter de mise sa mise en forme. .

Quelques perspectives à ce travail peuvent être dégagées, parmi elles :

- ✚ Choisir de confectionner un nouveaux béton drainant avec ajouts et/ou adjuvants afin d'étudier ses caractéristiques et les comparer avec un béton sans ajouts ni adjuvants.

- ✚ Faire varier les rapports E/C à fixer à l'avance, après caractérisations aux états frais et durcis, faire une étude microstructurale pour suivre l'évolution de la porosité et en déduire une porosité optimale pour le béton.

- ✚ Etudier quelques aspects de durabilités de ces bétons, notamment le comportement d'un béton drainant soumis aux cycles séchage / mouillage.

Références bibliographique

- [1] **FISRWG**. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG), October 1998, ISBN-0-934213.
- [2] **CONSEIL DU BATIMENT DURABLE DU CANADA (CBDCA)**. Guide de référence LEED Canada, 2010
- [3] **CHANVILLARD.G**, 1999 : Connaissances générales sur le matériau béton, Ed. Aléas.
- [4] **WINER.R.R.** National Pollutant Removal Database for Storm water Treatment Practices, second edition, Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD, 2000, 29 p.
- [5] **LEMING. M. L., MALCOM. H. R. AND TENNIS.P. D.**, Hydrologic Design of Pervious Concrete, EB303, Portland cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, SilverSpring, Maryland, USA, 2007, 72 p.
- [6] **KEVERN J. T., SCHAEFER V. R. , WANG. K ET SULEIMAN .M.T.**, Pervious Concrete Mixture Proportions for Improved Freeze-Thaw Durability, Journal of ASTM International, Vol. 5, No. 2, 2008
- [7] **ACI**. Report on Pervious Concrete. American Concrete Institute. États-Unis, 2011, 522R-10 (révisé en 2011), 40 p.
- [8] **GEORGES DREUX, JEAN FIESTA**, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles, 1998 (8e édition).
- [9] **NASR-EDDINE.K**, PROPRIETES ET PATHOLOGIE DU BETON, OPU, 1991.
- [10] **CSA. BETON** : Constituants et exécution des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton. Canada. Association canadienne de normalisation, 2009, 674 p. (CSA A23.1-F09/A23.2-F09).
- [11] **AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION**. Albedo: A Measure of Pavement Surface Reflectance, Research and Technology Update #3.05, juin 2002.
- [12] **BARON J, OLLIVIER J.P.**, « La durabilité des bétons », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [13] **COSTA.U, MASSAZA.F**, « From materials science to construction materials engineering », Proc. 1st Int. Rilemcongress, Vol. 1 (Versailles, 1987), 159.
- [14] **S.C.I.Z GROUPE ERCO CIMENTRIE ZAHANA**, Fiche technique : CIMENT PORTLAND COMPOSE (CPG 42.5 CEM II). Edition du 08/10/06
- [15] **GABRYSIK. F** – Matériaux – Les bétons – Chapitre 4.

- [16] **RAZOUG.R, ZINE-EDDINE.W**, « La technologie du béton ».
- [17] **DUPAIN.R ET LANCHON.R ET SAINT ARROMAN J. C.**, « Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire), Castelle, 2000 ».
- [18] **NORMES AFNOR (NF EN 12697-19)** “ Bétons – Essai de perméabilité ”
- [19] **ASHBY M.F, JONES D.R.H**, « Matériaux.2 », Dunod, édition 1991.
- [20] **GERVAIS. G. (2000)** “3Etudes des méthodes de mesures de la masse volumique et de teneur en eau des matériaux ” Université du QUEBEC.
- [21] **NORME FRANÇAISE. (1990), P18-554** “ Granulats- détermination de la masse volumique des sables ”, AFNOR, Paris.
- [22] **NORME FRANÇAISE. (1991), P18-598**, “ Granulats- Equivalent de sable ”, AFNOR, Paris.
- [23] **NORME FRANÇAISE. (1990)** “Granulats -mesure de masse volumique, de la porosité et de la teneur en eau ”, AFNOR, Paris.
- [24] **NORMES AFNOR. (1981), P18-404** “R Bétons – Essai d’étude, de convenance et de contrôle Et confection et conservation des éprouvettes”.
- [25] **NORMES AFNOR. (1997), P 18-622**“Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – partie 1 : Détermination de la granularité- Analyse granulométrique par tamisage “
- [26] **NORMES AFNOR. (1981)**, “ Bétons – Essai d’affaissement ”
- [27] **NORMES AFNOR. (1989), P18-418** “ Bétons – Auscultation sonique – Mesure du temps de propagation d’ondes soniques dans le béton”.
- [28] **NORMES AFNOR. (1990), P18-558** “ Granulats – Mesures des masses volumiques”.
- [29] **NORMES AFNOR. (1981), P18-406** “ Bétons – Essai de compression”.
- [30] **NORMES AFNOR. (1981) P18-408** “ Bétons – Essai de fendage”.
- [31] **NORME ISO 4110** “ Béton - Essai Vébé ”.
- [32] **NORMES AFNOR. (1985) NF EN 12350-7:** “ Essai Teneur en air”.