

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)**  
**Faculté du génie de la construction**  
**Département de génie civil**



## **MEMOIRE DE MASTER**

*En vue de l'obtention du diplôme de master*  
*De l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

**Filière : Génie civil**

**Spécialité : Structures**

### ***Thème***

**Effet des additions minérales sur les propriétés  
mécaniques des bétons drainants**

*Présenté par : M<sup>r</sup> GHOUBRINI Yazid*

Devant le jury composé de :

<b>Mme C. ALI AHMED</b>	Maître de conférences à l'UMMTO	Présidente
<b>Mme F. MEZIANI</b>	Maître de conférences à l'UMMTO	Examinatrice
<b>Mme O. FEDAOUI-AKMOUSSI</b>	Maître de conférences à l'UMMTO	Encadreur
<b>Mme O. HADDAD-MALEK</b>	Maitre-assistant (e) à l'UMMTO	Co-Encadreur

Promotion : 2023/2024

Soutenu le 03/07/2024

## Résumé

Le béton drainant, également connu sous les noms de béton poreux ou béton perméable, est un type spécialisé de béton caractérisé par sa haute porosité, permettant l'absorption des eaux de pluie et facilitant leur infiltration naturelle dans le sol. Son utilisation s'est considérablement accrue ces dernières décennies à l'échelle mondiale en raison de ses propriétés de drainage. Il est couramment utilisé dans diverses applications telles que les aires de stationnement, les chemins piétonniers et routiers, les piscines, les aires de jeux et les terrains de tennis. Cependant, le béton drainant présente des caractéristiques mécaniques inférieures à celles du béton ordinaire, en raison de sa porosité relativement élevée. Par conséquent, l'objectif principal pour les concepteurs est de trouver un équilibre optimal entre les propriétés mécaniques et drainantes selon les exigences spécifiques du projet. Cette étude se concentre particulièrement sur le béton drainant, également appelé béton perméable ou caverneux. Elle explore une formulation spécifique de béton drainant en variant les pourcentages d'un ajout cimentaire, en l'occurrence de la vase de barrage calcinée. L'étude comprend une caractérisation détaillée des matériaux utilisés, suivie d'une analyse du processus de fabrication du béton étudié. Ensuite, des tests de compression, de flexion, de porosité et de perméabilité ont été réalisés sur différents échantillons de béton. Les résultats obtenus montrent que cette approche permet de produire un béton performant avec des caractéristiques optimisées pour ses applications spécifiques.

Mots clés : Béton drainant, vase calcinée, formulation, Essai de compression et flexion, porosité, perméabilité.

## **Abstract**

Permeable concrete, also known as porous concrete or permeable pavement, is a specialized type of concrete characterized by its high porosity, allowing the absorption of rainwater and facilitating its natural infiltration into the soil. Its global use has significantly increased in recent decades due to its drainage properties. It is commonly used in various applications such as parking lots, pedestrian and road pathways, pools, playgrounds, and tennis courts. However, permeable concrete exhibits lower mechanical characteristics compared to ordinary concrete, primarily due to its relatively high porosity. Therefore, the main objective for designers is to find an optimal balance between mechanical and drainage properties according to specific project requirements. This study focuses specifically on permeable concrete, also referred to as permeable or cavernous concrete. It explores a specific formulation of permeable concrete by varying the percentages of a cementitious additive, specifically calcined reservoir sediment. The study includes a detailed characterization of the materials used, followed by an analysis of the manufacturing process of the concrete under study. Subsequently, compression, flexural, porosity, and permeability tests were conducted on different concrete samples. The results obtained demonstrate that this approach allows for the production of high-performance concrete with characteristics optimized for its specific applications.

**Keywords:** Permeable concrete, calcined mud, formulation, compression and flexural testing, porosity, permeability.



## REMERCIEMENTS

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

**Je tiens à exprimer mon plus profond remerciement à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail. En particulier Je tiens à exprimer mes sincères gratitudes envers ma promotrice Mme O. FEDAOUI-AKMOUSSI pour sa disponibilité permanente, ses orientations, son savoir, ses conseils et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail.**

**Mes remerciements vont également à Mme O. HADDAD et Mme F. AMIAR pour leurs orientations, leurs conseils et leurs disponibilités.**

**Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.**

**Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERY de TIZI OUZOU, en particulier Mr R. BOUHRAOUA et tous les ingénieurs du laboratoire de génie civil.**

**Mes sincères remerciements vont également à mes parents, mes sœurs, mes frères, mes amis et tous ceux qui ont contribué de près et de loin à l'aboutissement de ce projet de fin d'étude sans oublier S. HASSANI pour son aide durant la confection des éprouvettes.**

**Je suis fier de mon travail et je suis reconnaissant envers tous ceux qui m'ont aidé à le réaliser.**



# Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes parents, cher père Slimane et chère maman fatma pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Leur amour et leur foi en moi m'ont donné la force de persévérer et d'atteindre mes objectifs.

Je dédie ce travail à mes professeurs particulièrement ma promotrice de mémoire, dont les conseils avisés et la patience m'ont guidé tout au long de ce parcours. Leur expertise et leur soutien ont été essentiels à l'aboutissement de ce projet.

Je dédie ce mémoire à ma famille, mes frères Belkacem, Madjid, Mourad, Jugurtha et mes sœurs Farida, Ghania, Nadia, Karima, Leila pour leur amour, leur patience et leur soutien sans faille. Leur confiance en moi m'a motivé à donner le meilleur de moi-même.

À mes amis et camarades, pour leur soutien moral et leur camaraderie. Votre présence et vos encouragements ont rendu ce voyage académique beaucoup plus agréable et enrichissant.

À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Votre confiance et votre soutien m'ont été d'une aide précieuse.



# LISTE DES FIGURES

## Chapitre1: Béton drainant

FIGURE I. 1 : ÉPROUVETTE EN BETON DRAINANT .....	6
FIGURE I. 2 : LE CIMENT.....	6
FIGURE I. 3 : LES GRANULATS (3/8).....	7
FIGURE I. 4 : LE SABLE (0/3).....	8
FIGURE I. 5 : VARIATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION EN FONCTION DU VOLUME DES VIDES. .....	10
FIGURE I. 6 : VARIATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION EN FONCTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION [ACI552]. .....	10
FIGURE I. 7 : VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION PAR RAPPORT AU VOLUME DES VIDES .....	11
FIGURE I. 8 : VARIATION DE LA MASSE VOLUMIQUE EN FONCTION DU RAPPORT E/C.....	12
FIGURE I. 9 : VARIATION DU TAUX D'INFILTRATION EN FONCTION DU VOLUME DES VIDES .....	12
FIGURE I. 10 : UNE PLACE PUBLIQUE EN BETON DRAINANT.....	14
FIGURE I. 11 : LES DIFFERENTES COUCHES D'UNE CHAUSSEE EN BETON DRAINANT .....	14
FIGURE I. 12 : STADE DE TENNIS EN BETON DRAINANT .....	15

## Chapitre II : Les ajouts cimentaires

FIGURE II. 1 : POUDRE DE CIMENT GRIS .....	19
FIGURE II. 2 : POUDRE DE CIMENT GRIS .....	22
FIGURE II. 3 : LAITIER DE HAUT FOURNEAU.....	23
FIGURE II. 4 : CENDRES VOLANTES .....	25
FIGURE II. 5 : CENDRES VOLANTES A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE.....	25
FIGURE II. 6 : VASE DE BARRAGE TAMISE AVANT CALCINATION.....	27
FIGURE II. 7 : VASE DE BARRAGE APRES CALCINATION.....	27

## Chapitre III : Matériaux et Méthodes

FIGURE III. 1 : LE CIMENT UTILISE .....	33
FIGURE III. 2 : L'EAU DE ROBINET .....	35
FIGURE III. 3 : UN ECHANTILLON DU SABLE (0/3) .....	35
FIGURE III. 4 : SCHEMA EXPLICATIF D'EQUIVALENT DE SABLE.....	36
FIGURE III. 5 : L'AGITATEUR UTILISE POUR L'ESSAI D'EQUIVALENT DU SABLE .....	37
FIGURE III. 6 : UN ECHANTILLON DU GRAVIER (3/8) UTILISE.....	38
FIGURE III. 7 : LES DIFFERENTES ETAPES DU TRAITEMENT DE LA VASE .....	39
FIGURE III. 8 : LA TAMISEUSE UTILISEE.....	40
FIGURE III. 9 : COURBES GRANULOMETRIQUES .....	42
FIGURE III. 10 : L'AGITATEUR UTILISE POUR L'ESSAI D'EQUIVALENT DU SABLE.....	43
FIGURE III. 11 : PREPARATION DES PESEES POUR LA CONFECTION DES BETONS ETUDIES .....	45
FIGURE III. 12 : LES MOULES UTILISES .....	46
FIGURE III. 13 : CONFECTION DES MELANGES.....	47
FIGURE III. 14 : MISE EN MOULES .....	47

FIGURE III. 15 : CONSERVATION DES EPROUVETTES DANS L'EAU .....	47
FIGURE III. 16 : LES ETAPES DE L'ESSAI AU CONE D'ABRAMS.....	48
FIGURE III. 17 : ILLUSTRATIONS SUR L'ESSAI DE COMPRESSION.....	50
FIGURE III. 18 : ILLUSTRATIONS SUR L'ESSAI DE FLEXION .....	51
FIGURE III. 19 : ILLUSTRATION D'ESSAI DE POROSITE OUVERTE .....	52
FIGURE III. 20 : ILLUSTRATION D'ESSAI DE PERMEABILITE A L'EAU .....	53

## **Chapitre IV : Résultats et Interprétation**

FIGURE IV- 1 : ESSAI D'ECRASEMENT EN COMPRESSION .....	57
FIGURE IV- 2 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS ETUDIES (V-700°C).....	58
FIGURE IV- 3 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS ETUDIES (V-750°C).....	58
FIGURE IV- 4 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BETONS ETUDIES (V-800°C).....	59
FIGURE IV- 5 : RESISTANCE A LA COMPRESSION : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CALCINATION DE LA VASE .....	60
FIGURE IV- 6 : RESISTANCE A LA FLEXION DES BETONS ETUDIES (V-700°C).....	61
FIGURE IV- 7 : RESISTANCE A LA FLEXION DES BETONS ETUDIES (V-750°C). .....	62
FIGURE IV- 8 : RESISTANCE A LA FLEXION DES BETONS ETUDIES (V-800°C). .....	62
FIGURE IV- 9 : RESISTANCE A LA FLEXION : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CALCINATION DE LA VASE .....	63
FIGURE IV- 10 : POROSITE DES BETONS ETUDIES .....	64
FIGURE IV- 11 : PERMEABILITE DES BETONS ETUDIES .....	65
FIGURE IV- 12 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA POROSITE.....	66
FIGURE IV- 13 : EVOLUTION DE LA PERMEABILITE EN FONCTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION .....	66

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre II : Les ajouts cimentaires

TABLEAU II- 1 : COMPOSITION CHIMIQUE TYPE DE CERTAINES FUMÉES DE SILICE .....	22
TABLEAU II- 2 : COMPOSITION CHIMIQUE TYPE DE LAITIERS DE HAUT FOURNEAU .....	24
TABLEAU II- 3 : COMPOSITION CHIMIQUE TYPE DE CERTAINES CENDRES VOLANTES D'APRES AITCIN .....	26
TABLEAU II- 4 : POURCENTAGE ET DOSAGE RECOMMANDE .....	30

### Chapitre III : Matériaux et Méthodes

TABLEAU III- 1 : CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANIQUES .....	34
TABLEAU III- 2 : LES VALEURS D'EQUIVALENT DE SABLE INDIQUENT LA NATURE ET LA QUALITE DU SABLE .....	37
TABLEAU III- 3 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA VASE DE BARRAGE .....	39
TABLEAU III- 4 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE (0/3) .....	41
TABLEAU III- 5 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU GRAVIER (3/8) .....	41
TABLEAU III- 6 : CONSISTANCE DU BETON A PARTIR DE L'AFFAISSEMENT .....	49

### Chapitre IV : Résultats et Interprétation

TABLEAU IV- 1 : AFFAISSEMENT DES DIFFERENTS BETONS .....	56
TABLEAU IV- 2 : LES RESISTANCES A LA COMPRESSION DES BETONS ETUDIES .....	57
TABLEAU IV- 3 : LES RESISTANCES A LA FLEXION DES BETONS ETUDIES .....	61

# Table des matières

<u>Introduction Générale</u> .....	2
<b>Chapitre 1 : Béton drainant</b>	
<u>I.1 INTRODUCTION</u> .....	5
<u>I.2 COMPOSITION DU BETON DRAINANT</u> .....	5
<u>I.2.1 Ciment</u> .....	6
<u>I.2.2 Granulats</u> .....	7
<u>I.2.2.1 Granulats grossiers</u> .....	7
<u>I.2.2.2 Granulats fins</u> .....	7
<u>I.2.3 Eau de gâchage</u> .....	8
<u>I.2.4 Adjuvants</u> .....	8
<u>I.2.5 Les fibres</u> .....	9
<u>I.3 PROPRIETES DU BETON DRAINANT</u> .....	9
<u>I.3.1 La résistance à la flexion</u> .....	9
<u>I.3.2 La résistance à la compression</u> .....	11
<u>I.3.3 La masse volumique</u> .....	11
<u>I.3.4 Porosité et perméabilité</u> .....	12
<u>I.3.5 Durabilité face aux cycles gel/dégel</u> .....	13
<u>I.3.6 Le retrait</u> .....	13
<u>I.4 DOMAINE D'APPLICATION DU BETON DRAINANT</u> .....	13
<u>I.5 AVANTAGES DU BETON DRAINANT</u> .....	15
<u>I.5.1 Avantages d'ordre sécuritaire</u> .....	15
<u>I.5.2 Avantages d'ordre économique</u> .....	16
<u>I.5.3 Avantages d'ordre écologique</u> .....	16
<u>I.6 INCONVENIENTS DU BETON DRAINANT</u> .....	17
<u>I.7 CONCLUSION</u> .....	17
<b>Chapitre II : Les ajouts cimentaires</b>	
<u>INTRODUCTION</u> .....	19
<u>II.1 DEFINITION DU CIMENT</u> .....	19
<u>II.1.1 Composition et Principe de fabrication des ciments courants</u> .....	20

II.1.2 Différents types de ciment .....	20
II.2 LES AJOUTS MINÉRAUX .....	21
II.2.1 Définition des ajouts minéraux .....	21
II.2.2 Fumée de silice (FS) .....	21
II.2.2.1 La composition chimique de la fumée de silice.....	22
II.2.2.2 Avantages de la fumée de silice .....	22
II.2.3 Laitier granulé de hauts fourneaux (LGHF) .....	23
II.2.3.1 La composition chimique type des laitiers de haut fourneau .....	24
II.2.3.2 Avantage des laitiers granulé des hauts fourneaux.....	24
II.2.4 Les cendres volantes .....	24
II.2.4.1 La composition chimique de cendres volante .....	25
II.2.4.2 Avantages des cendres volantes .....	26
II.2.5 Vases de barrages.....	26
II.2.5.1 La définition de la vase de barrage.....	27
II.2.5.2 Composition de la Vase de Barrage.....	27
II.2.5.3 Les avantages d'utilisation de la vase barrage .....	28
II.3 LES ADJUVANTS CHIMIQUES .....	28
II.3.1 Super plastifiant .....	28
II.3.2 Retardateur de prise.....	29
II.3.3 Les accélérateurs de prise .....	30
II.3.4 Les stabilisateurs d'air .....	31
<b>Chapitre III : Matériaux et Méthodes</b>	
III.1 INTRODUCTION .....	33
III.2 LES MATERIAUX UTILISES .....	33
III.2.1 le ciment .....	33
III.2.2 L'eau de gâchage .....	34
III.2.3 Le sable .....	35
III.2.3.1 Caractéristiques du sable .....	35
III.2.4 Le gravier .....	38
III.2.5 La vase du barrage.....	38
III.2.6 Adjuvant .....	40

III.3 <u>ANALYSE GRANULOMETRIQUE</u> .....	40
III.4 <u>MODULE DE FINESSE</u> .....	42
III.5 <u>EQUIVALENT DU SABLE</u> .....	42
III .6 <u>FORMULATION DES BETONS</u> .....	44
III.6.1 <u>Préparation des compositions</u> .....	44
III.6.2 <u>Les moules utilisées</u> .....	45
III.6.3 <u>La confection de béton</u> .....	46
III.6.4 <u>Mode opératoire</u> .....	46
III.7 <u>ESSAIS SUR LE BETON FRAIS</u> .....	48
III-7-1 <u>Essai au cône d’Abrams : (NF EN 12350-2)</u> .....	48
III.8 <u>Essai de compression (NF P 18-406)</u> .....	49
III.9 <u>Essai de traction par flexion trois points (NF P 18-407)</u> .....	50
III.10 <u>Essai de porosité ouverte : (NF P 18 – 459)</u> .....	51
III .11 <u>ESSAI DE PERMEABILITE A L’EAU</u> .....	52
III .12 <u>CONCLUSION</u> .....	53
 <b>Chapitre IV : Résultats et Interprétation</b>	
IV.1 <u>INTRODUCTION</u> .....	55
IV.2 <u>FORMULATION DES BETONS</u> .....	55
IV.3 <u>Essai d’affaissement au cône d’Abrams</u> .....	56
IV.4 <u>ESSAI DE COMPRESSION</u> .....	56
IV.5 <u>ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS</u> .....	60
IV.6 <u>ESSAI DE POROSITE OUVERTE</u> .....	64
IV.7 <u>ESSAI DE PERMEABILITE A L’EAU</u> .....	65
IV.7.1 <u>Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité</u> .....	66
IV.7.2 <u>Evolution de la perméabilité en fonction de la résistance à la compression</u> .....	66
IV.8 <u>CONCLUSION</u> .....	67
<u>CONCLUSION GENERALE</u> .....	69

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le béton drainant, également connu sous le nom de béton perméable, est un matériau innovant caractérisé par son réseau de vides interconnectés. Ce matériau offre une solution attrayante pour lutter contre l'imperméabilisation des surfaces urbaines. Grâce à sa structure poreuse, il permet aux eaux pluviales et de ruissellement de s'infiltrer durablement vers un exutoire.

La porosité du béton drainant varie entre 15 et 35 % de son volume total, ce qui lui permet d'évacuer des quantités considérables d'eau, allant de 85 à 730 litres par minute et par mètre carré de surface, avec une valeur moyenne d'environ 200 L/min/m<sup>2</sup>. Cette propriété fait du béton drainant un matériau écologique, principalement dû à sa formulation unique qui comprend un mélange de gros granulats, un faible dosage en ciment, une certaine quantité d'eau et, souvent, une suppression totale ou partielle du sable fin.

En plus des granulats et du ciment, le béton drainant peut inclure des ajouts cimentaires tels que la fumée de silice et des fibres pour améliorer ses performances mécaniques sans compromettre ses qualités hydriques. Des adjuvants sont également utilisés pour faciliter la mise en œuvre et améliorer les propriétés du béton à l'état frais et durci.

Ce thème porte sur l'effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des bétons drainants qui représente une partie du travail de la doctorante Mme AMIAR Farida.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de l'ajout de la vase de barrage dans la formulation du béton drainant en déterminant ses caractéristiques mécaniques, notamment sa porosité, sa perméabilité, sa résistance à la compression et à la flexion, une démarche visant à améliorer les propriétés mécaniques et hydriques de ce matériau. La vase de barrage, souvent considérée comme un déchet, pourrait représenter une ressource précieuse pour le développement de matériaux de construction plus durables et performants.

Ce travail est réparti en quatre chapitres :

- Le premier chapitre comporte une revue bibliographique sur le sujet traité, il englobe un aperçu général sur les bétons drainants dit également béton perméable ou béton poreux dans la production du béton.

- Le second chapitre présente les différents ajouts cimentaires et leurs caractéristiques ;
- Le troisième chapitre présente les matériaux utilisés pour cette étude ainsi que leurs caractérisations (physique et mécanique). Une méthodologie des tests menés sur les échantillons est également mentionnée dans ce chapitre. La formulation des bétons drainants. Les différents essais sur les échantillons confectionnées à l'état frais et à l'état durci.
- Le chapitre quatre est consacré à la présentation des résultats et les interprétations des phénomènes qui en découlent. Dans ce chapitre est envisagé d'évaluer l'effet des différents facteurs recensés influençant les comportements des bétons drainants. Ces facteurs concernent la variation du dosage des différents degrés de calcination pour la vase de barrage en vue d'améliorer la résistance mécanique des bétons.

On termine ce travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Béton Drainant**

## I.1 INTRODUCTION

Le béton drainant est un matériau innovant par son réseau de vide interconnecté, Il constitue une solution attrayante, pour lutter contre l'imperméabilisation des surfaces urbaines. En effet, ce matériau permet aux eaux pluviales et de ruissellement de s'infiltrer à travers sa structure poreuse vers un exutoire, et ce de façon durable.

Le béton perméable est doté d'une porosité qui varie entre 15 et 35 % de son volume total. Selon certains auteurs [1-2], il permet d'évacuer environ 85 à 730 litres d'eau par minutes et par mètre carré, avec une valeur moyenne de 200L/mn/m<sup>2</sup>. Cette propriété qui a fait de ce béton un matériau écologique est due à sa formulation, qui est assez spécial. En effet, le béton perméable est constitué d'un mélange de gros granulats, d'un faible dosage en ciment, d'une quantité d'eau avec suppression totale ou partielle du sable fin [1].

Le béton poreux a été utilisé pour la première fois en Angleterre en 1852 [1-2], pour la construction de deux maisons. Par ailleurs, après la deuxième guerre mondiale, la plupart des infrastructures en Europe ont été détruites, alors, pour rebâtir l'Europe à nouveau en temps de crise et avec de faibles ressources en matériaux, il a fallu trouver un matériau ayant une composition pauvre en matériaux de construction, ce qui a fait du béton drainant la solution idéale pour cette situation. Toutefois, le béton drainant représentait un inconvénient pour l'époque, qui était ses performances mécaniques. Ce qui avait restreint ses utilisations à des constructions dont le nombre d'étages était limité [2].

L'application du béton drainant pour la première fois dans les pavages a été aux U.S.A. Cette pratique constitue une avancée significative dans le domaine de la construction durable et de l'aménagement urbain. Conçu pour favoriser l'infiltration des eaux de pluie dans le sol, Le béton perméable offre une alternative efficace et durable aux défis croissants liés à l'urbanisation et aux changements climatiques.

## I.2 COMPOSITION DU BETON DRAINANT

Le béton drainant est composé de ciment, de granulats grossiers, de l'eau avec peu ou pas de granulats fins. En outre, des ajouts cimentaires comme la fumée de silice, ainsi que des fibres, peuvent être ajoutés lors de la formulation du béton drainant, et ce dans le but d'améliorer les performances mécaniques du matériau, sans pour autant compromettre ses qualités d'infiltration hydriques.

Par ailleurs, afin de faciliter la mise en œuvre du béton poreux et d'améliorer ses propriétés à l'état frais et à l'état durci, des adjuvants sont employés. [3]



Figure I. 1 : Éprouvette en béton drainant.

### I.2.1 Ciment

Pour la formulation du béton drainant, on utilise généralement le ciment portland qui répond aux exigences des normes ASTM C150/C150M, Le dosage en ciment dépend de la formulation, c.à.d., du volume des granulats utilisés, du rapport E/C, de la porosité effective souhaitée. Dans ce contexte, le volume de la pâte de ciment doit être suffisant : d'un côté pour envelopper tous les granulats et assurer la liaison intergranulaire, ce qui donne une résistance mécanique acceptable. D'un autre côté, conserver un réseau de vide interconnectés qui assure la fonction d'infiltration [5].

Quant à la teneur en ciment dans la formulation du béton drainant, elle varie entre 250 et 400 Kg/m<sup>3</sup>.



Figure I. 2 : Le ciment.

## I.2.2 Granulats

### I.2.2.1 Granulats grossiers

Dans la formulation du béton perméable, les gros granulats Ils doivent répondre aux recommandations de la norme ASTM D448 et C33/C33M [ACI211]. Par ailleurs, le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci est assimilable au comportement du béton conventionnel dans le sens qu'il est très influencé par la proportion des granulats dans le mélange du béton, leur distribution granulaire, leur type ainsi que leur texture,[6].

Quant au volume des granulats dans le mélange du béton perméable, il dépend de la formulation ainsi que des performances désirées que ça soit en termes, de résistances mécaniques, ou bien des propriétés hydriques. En outre, afin de maximiser les vides dans la mixture du béton poreux, il est préférable d'employer une granularité discontinue.



Figure I. 3 : Les granulats (3/8).

### I.2.2.2 Granulats fins

Afin d'obtenir les performances désirées en termes de résistances mécaniques, de durabilité et de performances d'infiltrations acceptables, il est préférable d'incorporer dans le mélange une proportion de granulats fins ne dépassant pas 7% du volume des granulats grossiers.



**Figure I. 4 : Le sable (0/3).**

### **I.2.3 Eau de gâchage**

Pour la quantité d'eau de gâchage dans le béton drainant, tout comme béton conventionnel les mélanges sont généralement confectionnés avec de faibles rapports E/C selon [ACI522].[7] Dans ce contexte, une quantité d'eau insuffisante conduira à une cohésion insuffisante à l'état frais et un béton moins performant à l'état durci. En contrepartie, une eau en excès sera à l'origine du drainage de la pâte de ciment ce qui provoquera l'obstruction des pores et affectera ainsi les propriétés hydriques du mélange à l'état durci. D'une manière générale, le rapport E/C du béton perméable varie entre 0.26 et 0.44 selon [ACI 522] [7]. Par ailleurs, L'eau de gâchage doit satisfaire aux mêmes exigences que le béton conventionnel.

### **II.2.4 Adjuvants**

Différents types d'adjuvants peuvent être utilisés dans la formulation des bétons drainants les plus utilisés sont :

- **Les retardateurs de prise** : dans les formulations de béton drainant on utilise généralement de faible rapport E/C, associés à une importante porosité, ce qui conduit à une perte rapide de maniabilité d'où la nécessité de l'usage d'un retardateur de prise, notamment en temps chaud.[8]
- **Les agents de viscosités** : ils peuvent offrir une meilleure cohésion de la pâte de ciment sur la surface des granulats, ceci évitera le drainage de la pâte de ciment vers le bas sous l'effet de la pesanteur, ce qui pourrait obstruer les pores du matériau.
- **Les réducteurs d'eau** : Ils sont employés pour de faibles rapports E/C. il est nécessaire d'utiliser un agent réducteur d'eau ou un super-plastifiant pour améliorer la

Maniabilité et les propriétés mécaniques à l'état durci

**Les entraineurs d'air :** Ils permettent d'améliorer la durabilité du béton drainant aux cycles gel/dégel.

### **I.2.5 Les fibres**

L'usage des fibres dans le béton drainant serait bénéfique pour le mélange, dans le sens qu'elles amélioreraient le comportement du matériau en flexion, notamment si elles sont combinées avec la fumée de silice [zhifu, 2011], [Wang et al.2006]. En outre, les fibres de polypropylène auraient une influence positive sur la durabilité du béton face aux cycles gel/dégel [Zhifu, 2011].[9]

## **I.3 PROPRIETES DU BETON DRAINANT**

Les propriétés du béton drainant sont fortement influencées par sa formulation initiale, ainsi que les conditions de sa mise en place.

Les propriétés les plus importantes du béton drainant sont : la porosité / perméabilité, la résistance à la compression et à la flexion ainsi que la durabilité face aux cycles de gel dégel. Toutes confondues, elles sont fortement affectées par le rapport E/C, le volume de la pâte de ciment, ainsi que le volume, le type et la taille des granulats. Pour qu'un mélange de béton drainant, atteigne les performances souhaitées, il est nécessaire d'établir un compromis entre toutes ces caractéristiques [1] et [2].

### **I.3.1 La résistance à la flexion**

La résistance à la flexion est étroitement liée à la résistance à la compression. Elles sont toutes les deux fortement influencées par la variation de la porosité. Tout d'abord, la résistance à la flexion est inversement proportionnelle au volume des vides. De ce fait, pour le béton drainant avec une porosité typique qui varie entre 15 et 30%, sa résistance à la flexion est relativement faible (elle varie entre). Quoique, l'ajout d'une petite quantité de sable fin (environ 5 %) [ACI522] serait bénéfique pour cette résistance tout en préservant ses propriétés drainantes.

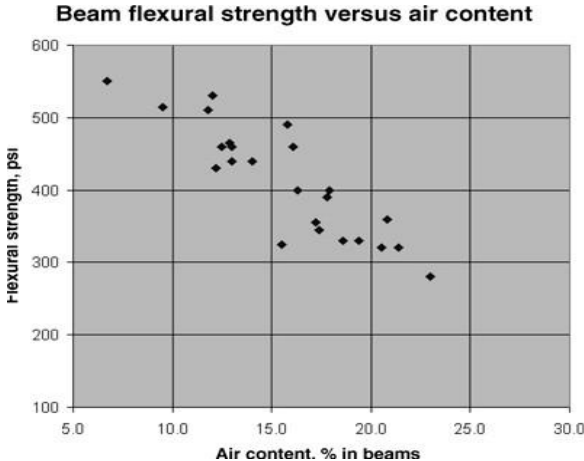


Figure I. 5: variation de la résistance à la flexion en fonction du volume des vides [ACI552].

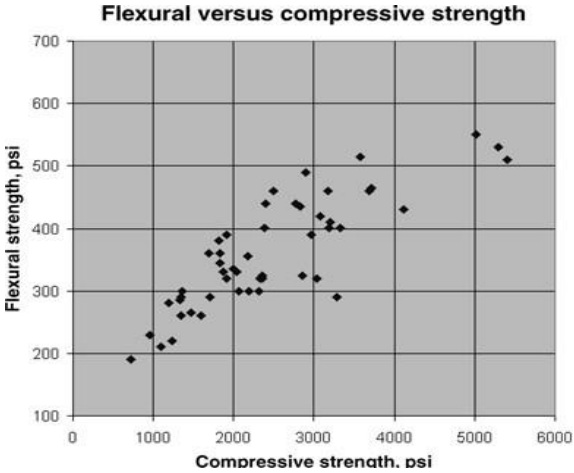


Figure I. 6 : variation de la résistance à la flexion en fonction de la résistance à la compression [ACI552].

### I.3.2 La résistance à la compression

La résistance à la compression dépend principalement des volumes des matériaux dans le mélange du béton drainant, mais aussi de l'énergie de consolidation et les moyens de mise en place [10]. En outre, la résistance à la compression est inversement proportionnelle au niveau de compactage. C'est-à-dire plus le niveau de consolidation est important, plus la résistance à la compression est grande, moins est la porosité, car une bonne consolidation élimine des vides en les remplissant par des agrégats, par conséquent la résistance à la compression augmente. Ce sont deux propriétés contradictoires pour lesquelles il faut trouver le juste équilibre. La résistance à la compression du béton drainant varie 2.8 et 28 Mpa selon [Silivija Mrakovic et al. Gradivinar 2014] [10].

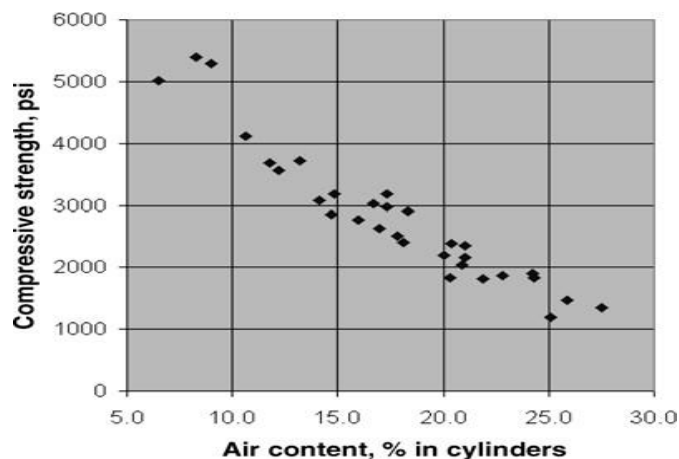


Figure I. 7 : Variation de la résistance à la compression par rapport au volume des vides.

#### La masse volumique

La masse volumique est fortement affectée par l'énergie de consolidation lors de la mise en place, et ce, bien sûr est lié à la variation du volume des vides. Par ailleurs, d'autres facteurs peuvent influencer la masse volumique dont on peut citer les propriétés des granulats (la densité et la granulométrie), le rapport E/C, la présence du sable fin ou pas [ACI522].

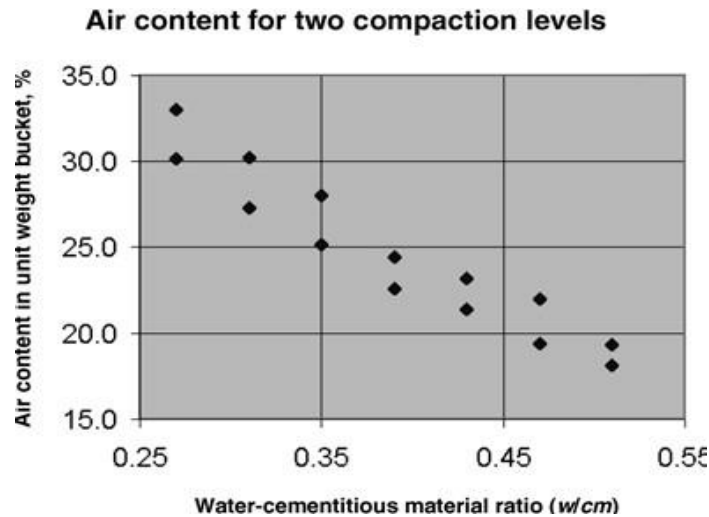


Figure I. 8 : Variation de la masse volumique en fonction du rapport E/C [ACI552].

### I.3.3 Porosité et perméabilité

L'originalité du béton drainant est sa capacité à faire passer l'eau à travers sa structure poreuse c'est ce qu'on appelle « perméabilité ». Elle est la vitesse à laquelle un liquide peut s'infiltrer à travers ce matériau. Elle dépend du volume des vides interconnectés que contient cette composition, des dimensions des granulats, de la rugosité de leurs parois ainsi que de la viscosité du liquide considéré. La porosité minimale pour obtenir un taux de percolation acceptable pour le béton drainant est de 15%. La vitesse d'infiltration augmente de façon significative avec la teneur en vide du béton. Le principal défi réside à trouver le compromis idéal entre un taux de percolation acceptable et une résistance à la compression suffisante [11].

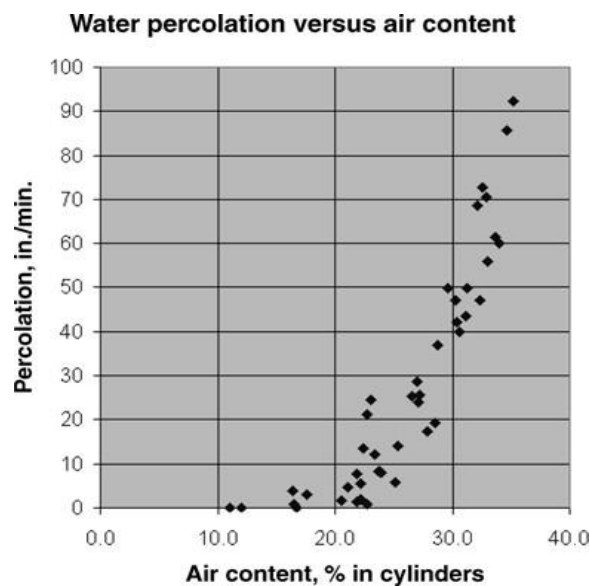


Figure I. 9: Variation du taux d'infiltration en fonction du volume des vides [ACI552].

### I.3.4 Durabilité face aux cycles gel/dégel

Le béton perméable, est connu pour son volume de vide important comparé au béton conventionnel. Ce qui fait de ce béton un matériau fortement affecté par les variations de températures extrêmes, notamment le froid des pays nordiques. En effet, la transformation physique de l'eau dans les pores du béton drainant en glace, est accompagnée d'un accroissement de volume de 9 %, et dans le cas où ce volume supplémentaire ne trouve pas d'espace, il provoque la fissuration de la matrice cimentaire, ce qui fragiliserait le béton et qui conduirait à sa rupture [12].

Selon certain chercheur, le béton drainant aurait une capacité à résister aux cycles de gel dégel qui varie entre 100 à 300 cycles. Par ailleurs, les cycles gel /dégel en se combinant avec les cycles mouillage séchage, seraient la cause principale de la faible durabilité du béton drainant. En outre, d'autres études ont montré que l'addition d'un entraîneur d'air aurait une influence positive sur la durabilité des bétons perméables [12].

### I.3.5 Le retrait

Lors de la formulation du béton drainant, le séchage étant très rapide. Ce qui serait probablement dû aux faibles rapports E/C utilisés pour ce genre de béton. Une importante surface exposée (due à un volume des vides important) induit une perte rapide de l'eau lors du malaxage et la cure. En contrepartie, le béton drainant est caractérisé par un retrait deux fois inférieure à celui du béton conventionnel. Ceci est à l'origine dû aux faibles dosages en ciment employés pour le béton perméable. Ce qui permet de dire que le retrait du béton drainant est fortement influencé par la quantité de ciment dans le mélange et du rapport granulats/ciment (G/C) [2].

## I.4 DOMAINE D'APPLICATION DU BETON DRAINANT

Le béton drainant est employé dans une gamme d'application bien variée dans divers domaines de construction et d'aménagement. Ses propriétés drainantes ainsi que sa gestion efficace et durable des eaux pluviales, en font de ce béton un matériau polyvalent très bien adapté à un large panel de situations notamment :

➤ **Aménagement urbain** : il est idéal pour les aménagements urbains ce qui permet de réduire le risque d'accumulation d'eau stagnante et prévenir les risques d'inondation. Parmi ces aménagements :

1. Revêtement des zones piétonnes comme les trottoirs et les places publiques, figure (I.10).
2. Aires de stationnement et zones pavés.
3. Revêtement des voiries.



Figure I. 10 : Une place publique en béton drainant .

**Travaux routiers :** Le béton perméable est employé dans l'édification des routes et d'autoroutes à faibles trafic pour assurer une infiltration rapide des eaux de pluies lors de forte précipitation ce qui permet d'éviter les risques d'aquaplanage. Il est utilisé en particulier pour :

1. Revêtement des chaussées à faible trafic.
2. Bande d'arrêt d'urgence.

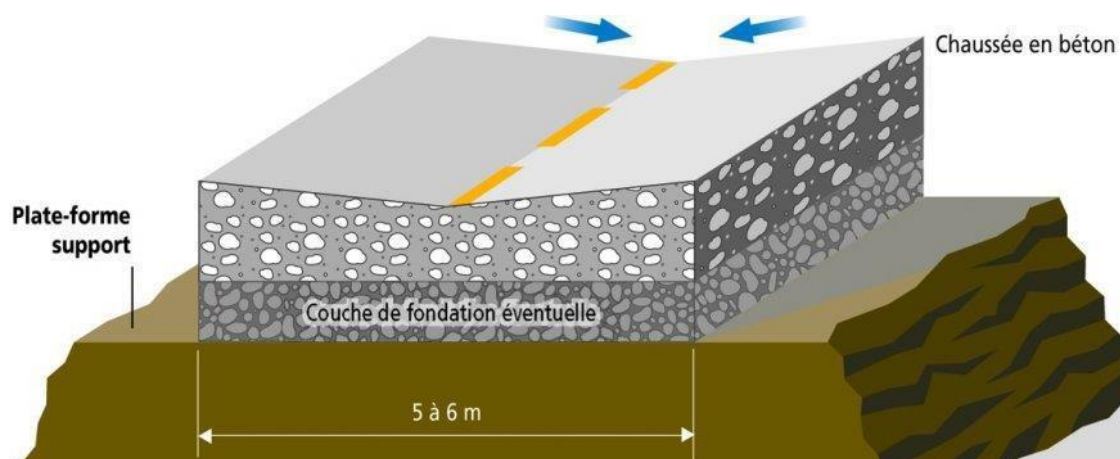


Figure I. 11 : les différentes couches d'une chaussée en béton drainant [13].

➤ **Infrastructures sportives et récréatives :** on utilise le béton drainant afin d'éviter la formation de flaques d'eau ce qui pourrait rendre le terrain impraticable.



Figure I. 12: Stade de tennis en béton drainant .

➤ **Travaux de génie civil** : il est également utilisé dans les travaux de génie civil où la gestion des eaux de pluie est un défi majeur tel que les murs de soutènement, les canaux de drainage.

## I.5 AVANTAGES DU BETON DRAINANT

L'emploi du béton poreux dans les espaces urbains offre des avantages écologiques, sécuritaires, économiques et assure le bien être aux usagers, on distingue :

### I.5.1 Avantages d'ordre sécuritaire

- ❖ Le réseau poreux du béton perméable permet à d'importantes quantités d'eaux pluviales de passer à travers ses pores interconnectés, ce qui réduit le ruissellement vers les systèmes de drainage traditionnels et éviter le risque d'inondation ;
- ❖ La faculté d'infiltration que possède le béton poreux, diminue le risque de pollution des milieux aquatiques préservant ainsi la santé publique. En effet, les agents polluants en surface pénètrent progressivement à l'intérieur du revêtement drainant, puis dans les couches sous-jacentes, ce qui donne le temps aux bactéries de fixer ces agents polluants. Ce phénomène réduit considérablement la pollution de l'eau infiltrée. Cette dernière rejoint ainsi le cours d'eau ou son exutoire dans un état plus sain [14] ;
- ❖ D'autres avantages relatifs à la sécurité des véhicules et des passants, dont : élimination des flaques d'eau durant les fortes pluies, élimination des reflets du pavage humide, réduction

des risques d'aquaplanage et de glissement. Enfin, Le béton drainant plus pâle offre une surface plus sécuritaire et mieux éclairée la nuit [14].

### **I.5.2 Avantages d'ordre économique**

L'usage du béton perméable dans les aménagements urbains est aussi un choix économique car :

- Le risque d'inondation est désormais maîtrisé par l'infiltration des eaux pluviales, ce qui permet d'économiser les frais des dégâts qu'occasionne cette catastrophe ;
- Les aménagements de drainage urbains traditionnels et de rétention d'eau peuvent être réduits voire éliminés, économisant ainsi les frais de leur construction et de leur entretien [14]
- Plus besoin de forme de pente dans les chaussées en béton drainant, ce qui facilite les travaux

### **I.5.3 Avantages d'ordre écologique**

Le béton drainant est avant tout un choix écologique. En effet grâce à sa capacité d'infiltrer de l'eau directement dans le sol, contribue à :

- Accroître les quantités d'eaux de pluies qui s'infiltrent là où elles tombent ce qui réduit le ruissellement vers les aménagements de drainage urbains traditionnel (avaloirs, égout etc...), et ainsi prévenir le risque d'inondations.
- Réduire la pollution des cours d'eaux et des milieux aquatiques ;
- La recharge progressive des nappes phréatiques par les eaux de pluies infiltrées dans le revêtement drainant puis dans le sol naturel.
- Réduire l'érosion des berges, que causent les eaux de ruissellement lors de fortes pluies [15].
- Éviter « l'effet îlot de chaleur urbain », grâce à ce revêtement qui respire de par ses pores, la chaleur est absorbée ce qui améliore la qualité de vie des usagés lors des canicules
- [cimbéton, lutter contre les imperméabilisations des surfaces urbaines] .
- Réduction du bruit de frottement des pneus sur la chaussée. En effet, la structure poreuse du béton drainant est un écran acoustique qui absorbe le bruit ce qui aide à améliorer la qualité de vie des habitants.
- Harmoniser les couleurs en fonction de l'environnement et de l'aménagement extérieurs avec des couleurs du choix du constructeur, ce qui permet de personnaliser ces lieux.

## I.6 INCONVENIENTS DU BETON DRAINANT

- **Coût plus élevé** : le béton poreux avec sa composition originale ainsi que les techniques requises pour sa mise en place, génèrent des coûts d'installation qui peuvent être plus élevés que le béton conventionnel.
- **Entretien régulier nécessaire** : afin d'assurer son efficacité en matière de drainage ainsi que sa durabilité, le béton poreux nécessite un entretien régulier, notamment le nettoyage des pores obstrués par des débris ou des sédiments.

## I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur le béton drainant a été effectuée. L'historique d'utilisation de ce matériau a été évoqué en premier. En second lieu, les différents composants de cette mixture ont été bien définis, en s'intéressant à l'influence de chacun d'eux sur la formulation du béton drainant ainsi que sur ses propriétés à l'état frais et à l'état durci. Par la suite, les propriétés les plus importantes du béton perméable ont été évoquées. Puis, les divers domaines d'application de ce matériau sont exposés. Enfin, un aperçu a été mis sur les avantages et inconvénients du béton drainant.

Pour conclure, le béton perméable se distingue parfaitement du béton ordinaire par sa capacité de percolation rapide des liquides à travers sa structure poreuse. Cette qualité, fait de ce matériau une alternative efficace et durable dans la gestion des eaux pluviales et de ruissellement. Ce qui élargie le champ de ses utilisations aux différents espaces urbains où l'imperméabilité des surfaces est essentielle pour maintenir l'équilibre naturel du cycle de l'eau et affronter les effets du changement climatiques.

**Chapitre II**  
**Les Ajouts cimentaires**

## INTRODUCTION

Les ajouts cimentaires sont des poudres minérales qui sont élaborées par le concassage de matières premières (naturelles) ou de sous-produits issus des déchets industriels. Leur granulométrie est voisine de celle du ciment ou plus fine. Elles peuvent soit avoir un caractère hydraulique latent, soit avoir un caractère pouzzolanique, soit être inertes chimiquement. Dans tous les cas du fait de leur finesse, ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis de la compacité, de la viscosité et donc de la durabilité [15].

Les formulations courantes des bétons contiennent désormais des ciments avec ajouts, ainsi que des adjuvants ou des charges ultrafines telles que la fumée de silice. L'usage des ajouts cimentaires permet de diversifier la formulation des bétons afin d'obtenir différentes propriétés tout en réduisant le coût de revient.

### II.1 DEFINITION DU CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps à travers des processus chimiques. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et les aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment.



**Figure II. 1 : poudre de ciment gris**

### II.1.1 Composition et principe de fabrication des ciments courants

Si le procédé de fabrication du ciment est universel, le matériau n'en demeure pas moins complexe, avec six grands types dont la composition (nature et proportions des constituants) varie en fonction de l'application de destination du matériau. Ils sont définis dans la norme produit européenne NF EN 197-1, et leur répartition est brièvement présentée ci-dessous avec l'annotation conventionnelle des constituants entre-parenthèses.

- Le CEM I ou ciment Portland, contient au moins 95 % de clinker (K) et au plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint, là où une résistance élevée est recherchée ainsi qu'un décoffrage rapide.
- Le CEM II/A ou B ou ciment Portland composé, contient au moins 65% de clinker (K) et au plus 35 % d'autres constituants secondaires : laitier de haut-fourneau (S), fumée de silice (D) (entre 6 et 10 %, pouzzolane naturelle (P), cendres volantes siliceuses (V), schiste calciné (T) et calcaire (L ou LL). Les CEM II sont adaptés pour le béton armé en général, coulé sur place ou préfabriqué, ainsi que pour des travaux massifs exigeant une élévation de température modérée.
- Le CEM III/A, B ou C ou ciment de haut-fourneau, contient entre 36 et 80 % de laitier de haut-fourneau (S) et 20 à 64 % de clinker (K). Le CEM III/ C (également dit ciment de haut-fourneau) contient au moins 81 % de laitier de haut fourneau (S) et 5 à 19% de clinker (K).
- Le CEM IV/A ou B est un ciment pouzzolanique.
- Le CEM V/A ou B ou ciment pouzzolanique au laitier contient de 20 à 64 % de clinker (K), de 18 à 49 % de laitier de haut fourneau (S) et de 18 à 49 % de cendres volantes siliceuses (V).

Les CEM III, CEM V qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations, aux travaux en milieu agressif, aux travaux à la mer, aux bétons de masse et généralement aux travaux nécessitant une faible chaleur d'hydratation. Leur utilisation permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants [16].

### II.1.2 Différents types de ciment

Les constituants utilisés dans les ciments améliorent certaines qualités mécaniques et physiques du ciment (accroissement de la résistance, de la maniabilité, de la compacité, diminution de la perméabilité...). Certains constituants peuvent avoir plusieurs de ces propriétés, à un degré plus

ou moins développé. Ainsi, en fonction de la nature des constituants utilisés et de leur dosage, il existe une grande variété de types de ciments, On peut citer [16] :

- Les ciments courants
- Les ciments adaptés à des usages spécifiques
- Les ciments blancs
- Les ciments spéciaux
- Les liants hydrauliques routiers.

## II.2 LES AJOUTS MINÉRAUX

Les ajouts cimentaires, tels que les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes et les fillers calcaires, sont essentiels dans la composition des bétons pour en améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques.

Ces ajouts permettent de réduire la quantité de ciment nécessaire, contribuant ainsi à une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> associées à sa production. Ils améliorent la résistance au gel-dégel, aux UV et la durabilité du béton, tout en régulant la prise du ciment et renforçant sa résistance mécanique. L'utilisation de ces ajouts minéraux offre des avantages techniques, économiques et écologiques, en permettant la production de bétons performants et durables tout en réduisant l'impact environnemental de la production de ciment.

### II.2.1 Définition des ajouts minéraux

Les ajouts minéraux dans le béton sont des matériaux à granulométrie très fine incorporés principalement au ciment pour améliorer les propriétés du béton ou lui conférer des caractéristiques spécifiques. Contrairement aux adjuvants, ils doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton. Ces ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou réactifs, et incluent divers matériaux tels que les fumées de silice, les cendres volantes et les laitiers de haut fourneau [17].

### II.2.2 Fumée de silice (FS)

Les fumées de silice se présente sous forme de particules sphériques très fines, qui se caractérisent par une grande surface spécifique (20 à 25 m<sup>2</sup>/g) et par un très petit diamètre d'environ 0,1µm. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de Ferro-silicium. Elles sont recueillies par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion [18].

La fumée de silice présente une très forte teneur en silice amorphe et elle est généralement utilisée comme ajout cimentaire, pour des raisons d'économie ainsi que pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [18].



Figure II. 2 : poudre de fumée de silice [19]

### II.2.2.1 La composition chimique de la fumée de silice

La composition chimique typique de certaines fumées de silice est majoritairement constituée de dioxyde de silice ( $\text{SiO}_2$ ), représentant généralement entre 85 % et 96 % de leur masse. La fumée de silice est principalement composée de silice amorphe, ce qui en fait un matériau idéal pour améliorer les performances du béton.

Tableau II. 1 : Composition chimique type de certaines fumées de silice [20].

Composés (%)	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
$\text{SiO}_2$	93.7	87.3	90.0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.6	1.0	1.0
$\text{CaO}$	0.2	0.4	0.1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.3	4.4	2.9
$\text{MgO}$	0.2	0.3	0.2
$\text{Na}_2\text{O}$	0.2	0.2	0.9
$\text{K}_2\text{O}$	0.5	0.6	1.3
Perte au feu	2.9	0.6	1.2

### II.2.2.2 Avantages de la fumée de silice

**❖ À l'état frais**

L'incorporation de la fumée de silice dans le béton réduit la chaleur d'hydratation, ce qui peut être bénéfique pour le bétonnage par temps chaud ou pour les éléments de grande masse, minimisant ainsi le risque de fissuration thermique.

**❖ À l'état durci**

La fumée de silice améliore la liaison des différents constituants d'un béton, ce qui augmente la résistance à la compression, à la flexion et à la traction, renforçant la structure globale du matériau [21].

**II.2.3 Laitier granulé de hauts fourneaux (LGHF)**

Le laitier granulé de hauts fourneaux (LGHF) est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est généralement utilisé comme matière première dans la production du ciment et du béton, en raison de ses propriétés pouzzolaniques. Le laitier est un matériau non-métallique formé essentiellement de silicates et aluminosilicates de calcium.

L'addition du laitier granulé de hauts fourneaux au ciment présente un intérêt économique dans l'industrie du ciment et un intérêt technique dans le domaine de la construction [22].



**Figure II. 3 : Laitier de haut fourneau.**

### II.2.3.1 La composition chimique type des laitiers de haut fourneau

La composition chimique type des laitiers de haut fourneau varie en fonction de plusieurs facteurs, voir le tableau (II-2).

Tableau II- 2: Composition chimique type de laitiers de haut fourneau [23].

OXYDES (%)	Laitier Français	Laitier Nord U S A	Laitier Algérien
SiO <sub>2</sub>	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	0.3 à 20	2.0
MgO	6	3 à 12	4.7

### II.2.3.2 Avantage des laitiers granulés des hauts fourneaux

Les laitiers granulés des hauts fourneaux offrent plusieurs avantages, tant à l'état frais qu'à l'état durci :

- ❖ À l'état frais, le laitier granulé de haut fourneau améliore l'ouvrabilité et la cohésion du béton, facilitant ainsi son transport, son coulage et son compactage sur le chantier. Son utilisation n'a pas d'incidence significative sur le phénomène de remontée d'eau à la surface du béton, maîtrisant ainsi le ressuage.
- ❖ À l'état durci, le béton contenant du laitier granulé de haut fourneau présente plusieurs avantages. Sa résistance à long terme peut être équivalente, voir supérieure à celle du béton Portland. De plus, ce béton nécessite moins d'eau pour atteindre la même consistance que le béton ordinaire, limitant ainsi le retrait au séchage. Enfin, le laitier semble réduire le fluage du béton en augmentant sa résistance finale et son module d'élasticité. [24]

### II.2.4 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules fines récupérées par les systèmes de dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Leur composition chimique est étroitement liée aux impuretés contenues dans le charbon brûlé dans la centrale thermique. Ces cendres volantes peuvent être utilisées comme substitut partiel du ciment dans le béton pour améliorer sa

Résistance et sa durabilité, tout en réduisant la quantité de ciment nécessaire. Cette pratique peut être bénéfique d'un point de vue environnemental, en diminuant la quantité de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) émise lors de la production de ciment [25].



Figure II. 4: Cendres volantes [25]

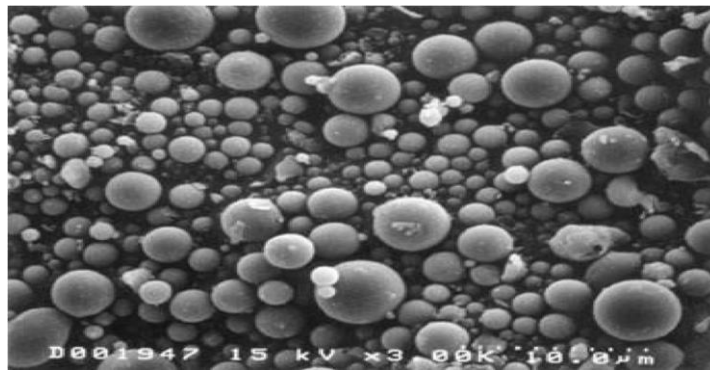


Figure II. 5 : Cendres volantes à l'échelle microscopique [25]

#### II.2.4.1 La composition chimique des cendres volantes

La composition chimique des cendres volantes est variable mais généralement riche en silice, alumine et oxyde de fer, avec des teneurs en chaux et en éléments traces qui dépendent de la classe et de la source du charbon.

Tableau II- 3 : Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitcin [26].

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo – Calcique	Sulfo- Calcique
<b>SiO<sub>2</sub></b>	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
<b>CaO</b>	2.6	16.6	26.5	24.0	56
<b>MgO</b>	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2.2	0.4	2.2	0.8	.....
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
<b>Perte au feu</b>	2.0	1.5	0.6	.....	.....
<b>SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	90.7	74.9	60	59.5	22.5
<b>Chaux libre</b>	.....	...	.....	.....	28.0

#### II.2.4.2 Avantages des cendres volantes

La cendre volante est constituée principalement de verre de silicate contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone [26].

Le principal intérêt des cendres volantes est leur impact environnemental réduit. Le remplacement d'une partie du ciment par une cendre volante lors de la fabrication du béton, ainsi que son utilisation dans la fabrication de certains ciments composés, constituent une solution complémentaire pour diminuer de manière importante les émissions de CO<sub>2</sub>.

#### II.2.5 Vases de barrages

Les vases de barrages, également appelées sédiments ou boues de barrages, sont des accumulations de matières solides et liquides qui se déposent au fond des retenues des barrages. Ces vases peuvent poser des problèmes d'envasement en réduisant la capacité de stockage d'eau des barrages et en affectant leur fonctionnement. En Algérie, où l'envasement des barrages est un sujet préoccupant, des campagnes de dévasement sont menées pour enlever ces vases et ainsi augmenter la capacité de stockage des barrages, contribuant à maintenir leur efficacité et leur durabilité.

### II.2.5.1 La définition de la vase de barrage

La vase de barrage, également appelée sédiments de retenue, est un matériau composé de particules fines, de matière organique et parfois de contaminants, qui s'accumule au fond des réservoirs et des barrages [27].



Figure II. 6: Vase de barrage tamisé avant calcination [27]



Figure II. 7: vase de barrage après calcination [27]

### II.2.5.2 Composition de la Vase de Barrage

- **Particules Fines** : Inclut de l'argile, du limon et du sable, qui sont transportés par les cours d'eau et se déposent dans le réservoir.
- **Matière Organique** : Restes de plantes, d'algues et d'autres matières en décomposition.
- **Nutriments** : Tels que l'azote et le phosphore, souvent présents en raison du ruissellement agricole et de la décomposition de la matière organique.

- **Contaminants** : Peut contenir des métaux lourds, des pesticides, et d'autres produits chimiques résultant des activités humaines en amont du barrage.

### II.2.5.3 Les avantages d'utilisation de la vase barrage

La valorisation de la vase des barrages dans le domaine de génie civil présente divers avantages significatifs :

- ❖ **Alternative écologique et économique** : La valorisation de la vase de barrage offre une alternative écologique en réutilisant un matériau souvent considéré comme un déchet, contribuant ainsi à une gestion plus durable de l'environnement.
- ❖ **Diversification des sources de granulats** : L'utilisation de la vase permet de diversifier les sources de granulats pour compenser le manque de matériaux de construction, offrant ainsi une solution face à la pénurie de ressources (Chaussées).
- ❖ **Réduction de l'envasement des barrages** : En réutilisant la vase pour des applications constructives, on libère des espaces occupés par la vase, contribuant ainsi à réduire l'encombrement des barrages et à optimiser leur capacité de stockage [28].

## II.3 LES ADJUVANTS CHIMIQUES

Les adjuvants chimiques sont des produits ajoutés à faible dose dans les matériaux cimentaires, tels que les bétons et les mortiers, pour modifier certaines de leurs propriétés. Ces adjuvants peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur action sur les matériaux. Certains adjuvants, comme les plastifiants et les superplastifiants, agissent sur la plasticité et la compacité des matériaux, tandis que d'autres, tels que les accélérateurs de prise et de durcissement, ainsi que les retardateurs, influent sur les délais de prise et de durcissement. De plus, il existe des adjuvants comme les entraîneurs d'air, les antigels, et les hydrofuges de masse, qui agissent sur la résistance des matériaux aux agents extérieurs. Les adjuvants chimiques sont des composants essentiels pour ajuster et améliorer les propriétés des matériaux cimentaires en fonction des besoins spécifiques de chaque application.

### II.3.1 Super plastifiant

#### A) Description et fonction

Le super plastifiant, également connu sous le nom de haut réducteur d'eau, est un adjuvant utilisé pour matériaux cimentaires tels que les coulis, les mortiers et les bétons. Sa fonction principale est d'améliorer l'ouvrabilité du mélange sans ajout d'eau supplémentaire, ou de

Diminuer la quantité d'eau nécessaire pour augmenter les résistances mécaniques sans modifier l'ouvrabilité du béton [29].

### **B) Effets sur les propriétés du béton**

L'utilisation de super plastifiants dans le béton frais augmente sa fluidité, ce qui facilite sa mise en place et permet de diminuer la proportion d'eau (rapport eau/ciment). Cela améliore considérablement la résistance mécanique et la durabilité du béton. Ils peuvent également ralentir le temps d'hydratation du ciment, ce qui est bénéfique dans certaines conditions de construction.

### **C) Dosages et méthodes d'incorporation**

Les super plastifiants sont ajoutés aux matériaux cimentaires à des ratios généralement entre 0,8 et 3 % de la masse de ciment utilisé. Ils sont introduits dans le béton peu avant la mise en œuvre pour assurer une distribution homogène dans le mélange. La plage de dosage classique des super plastifiants va de 0,15 à 1,2%. Il est courant de doser un super plastifiant à 0,30% de la masse de ciment .

## **II.3.2 Retardateur de prise**

Un retardateur de prise est un adjuvant ajouté aux matériaux cimentaires, comme les coulis, les mortiers de ciment et les bétons de ciment, pour ralentir la réaction d'hydratation du ciment, prolongeant ainsi le temps d'hydratation des liants. Ils sont souvent utilisés dans des conditions de température élevée pour éviter une prise trop rapide du béton.

### **A) Effets sur les propriétés du béton**

L'utilisation de retardateurs de prise peut influencer le béton de plusieurs manières :

- **Sur le béton frais :** Ils régulent le dégagement de chaleur due à l'hydratation du ciment, ce qui est particulièrement utile pour éviter les fissurations dues à la chaleur dans les grandes coulées de béton.
- **Sur le béton durci :** Ils peuvent améliorer l'imperméabilité et la résistance à la compression du béton. Cependant, ils peuvent aussi dégrader l'apparence finale du béton, augmenter les différences de couleur sur sa surface, accroître le retrait et accentuer l'efflorescence [30].

### **B) Dosages et méthodes d'incorporation**

Le dosage des retardateurs de prise varie généralement entre **0,2 et 1%** du poids du ciment, selon l'effet recherché. Il est crucial de consulter la fiche technique du produit pour déterminer le dosage précis. L'adjuvant est généralement mélangé à l'eau de gâchage. Il est introduit dans

La gâchée après l'ajout de l'eau. Des essais doivent être réalisés pour ajuster le dosage en fonction des conditions spécifiques du chantier, notamment la température [30].

### II.3.3 Les accélérateurs de prise

Les accélérateurs de prise sont des adjuvants qui réduisent le temps de prise du béton, permettant ainsi un durcissement plus rapide. Ils sont utilisés pour accélérer les travaux de construction, en particulier dans des conditions climatiques défavorables, comme par temps froid, pour éviter le gel du béton.

#### A) Effets sur les propriétés du béton

L'utilisation d'accélérateurs de prise peut avoir plusieurs effets sur le béton :

- **Béton frais** : Ils permettent une prise plus rapide, ce qui est bénéfique pour les travaux urgents ou par temps froid pour éviter le gel du béton ;
- **Béton durci** : Ils contribuent à une augmentation de la résistance mécanique initiale, ce qui permet un décoffrage plus précoce et une mise en service plus rapide de l'ouvrage ;
- **Autres effets** : Ils peuvent aussi améliorer la maniabilité du béton et réduire la ségrégation [31].

#### B) Dosages et méthodes d'incorporation

Le dosage recommandé des accélérateurs de prise varie généralement entre 0.6% et 3.5% de la masse du ciment [31]. Il est essentiel de respecter le dosage recommandé pour garantir des résultats optimaux. L'accélérateur de prise doit être versé dans la goulotte de remplissage de la toupie de béton servant au mélange et il est indispensable de malaxer le tout durant un temps minimum de 5 minutes.

Tableau II- 4 : Pourcentage et dosage recommandé

Type de béton	Dosage recommandé (En % de la masse de ciment)
Béton courant	0.6% - 1.5%
Béton par temps froid	1.5% - 3.5%

### II.3.4 Les stabilisateurs d'air

Les stabilisateurs d'air, sont des adjuvants ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés. Leurs caractéristiques et utilisations sont cités ci-dessous :

#### A) Description et fonction

Les stabilisateurs d'air sont des substances qui permettent d'augmenter la quantité d'air dans le béton sous forme de fines bulles très stables et de tailles régulières. Ces bulles agissent comme des "roulements à billes" qui améliorent l'ouvrabilité du béton et facilitent sa mise en œuvre. Ils sont particulièrement utiles pour les bétons soumis aux cycles de gel-dégel, car ils augmentent la durabilité du béton en réduisant le risque de ségrégation et en améliorant sa résistance aux sels de déverglaçage [31].

#### B) Effets sur les propriétés du béton

L'ajout de stabilisateurs d'air au béton a plusieurs effets bénéfiques :

- **Amélioration de l'ouvrabilité** : Le béton devient plus maniable et facile à travailler.
- **Augmentation de la durabilité** : Les bulles d'air agissent comme des vases d'expansion pour l'eau interne du béton, ce qui améliore la résistance au gel-dégel.
- **Meilleure résistance à la ségrégation** : Les stabilisateurs d'air aident à maintenir l'homogénéité du béton.

#### C) Dosages et méthodes d'incorporation

Le dosage recommandé des stabilisateurs d'air varie généralement entre 0,01 et 2,00 % du poids du ciment ou du liant. La quantité d'air entraîné dépend de plusieurs facteurs, y compris la composition du béton, la plasticité, le temps de malaxage et la température du béton.

**Chapitre III**  
**Matériaux et méthodes**

### III.1 INTRODUCTION

Le béton drainant est un matériau composé de ciment, de graviers, de sable, d'eau et éventuellement d'un adjuvant afin d'améliorer ses propriétés. Pour garantir la qualité du béton, il est essentiel que ses constituants respectent les normes en vigueur. Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication du béton, ainsi que les différentes méthodes d'essais employées (essai de compression, essais de flexion, essai de porosité ouverte et essai de perméabilité à l'eau).

### III.2 LES MATERIAUX UTILISES

#### III.2.1 le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland MATINE NA442 CEM II/B-L 42,5 N. C'est un ciment gris pour bétons de haute performance destiné à la construction des ouvrages d'art infrastructures et super structure pour bâtiments [32].



Figure III. 1: Le ciment utilisé.

Le ciment portland au laitier ou au calcaire CEM II/B 42,5 L est composé de :

- 65% à 79% de clinker
- 21% à 35% de calcaire
- 0% à 5% de constituants secondaires

Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé sont présentées dans le tableau (III-1) ci-dessous :

Tableau III- 1 : Caractéristiques physico-mécaniques.[41]

Caractéristiques techniques		Valeurs
Propriétés chimiques	Perte au feu (%)	8.0 ±2
	Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> ) (%)	2.5±0.5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
	Teneur en chlorures (%)	0.02-0.05
Composition minéralogique du clinker	C3S (%)	60±3
	C3A (%)	7.5±1
Propriétés physiques	Consistance normale (%)	26.5±2.0
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3400
	Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
	Expansion	≤ 3.0
Temps de prise à 20°	Début de prise (min)	150±30
	Fin de prise (min)	230±50
Résistance à la compression	2 jours (MPa)	≥ 10.0
	28 jours (MPa)	≥ 42.5

### III.2.2 L'eau de gâchage

Nous avons utilisé pour le gâchage de nos différents types de bétons, l'eau du robinet disponible au niveau du laboratoire pédagogique de génie civil.



**Figure III. 2: l'eau de robinet.**

### **III.2.3 Le sable**

Le sable utilisé est un sable concassé (0/3 mm) de Tizi-Ouzou.



**Figure III. 3 : un échantillon du sable (0/3).**

#### **III.2.3.1 Caractéristiques du sable**

##### **a) Essai équivalent de sable**

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses ou ultrafines contenues dans le sable, le pourcentage de poussières nuisibles et les éléments argileux qui diminuent la qualité du béton et mortier, l'essai d'équivalent de sable est déterminé selon la norme NF P 18-598.

##### **b) Principe de l'essai**

L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer le coefficient d'équivalent de sable qui quantifie sa propreté. Pour cet essai on a besoin d'une éprouvette graduée munie d'un bouchon en caoutchouc, d'un agitateur manuel et d'un piston avec un poids bien défini.

On pèse un échantillon de sable de 120 g. Entre-temps, on remplit l'éprouvette graduée avec de l'eau jusqu'au trait repère inférieur figurant sur l'éprouvette puis on verse les 120 g du sable dans cette dernière et on attend quelques minutes puis on la ferme avec le bouchon et on la fixe sur la machine d'agitation de façon horizontale, Une fois l'essai est terminé, on remplit l'éprouvette d'eau jusqu'au trait supérieure puis on laisse reposer pendant 20 min sans perturbation. A l'issue de ce délai, on mesure la hauteur totale (sable + fines) qu'on appellera  $h_1$  et la hauteur du sable seul sans fine qu'on appellera  $h_2$ .

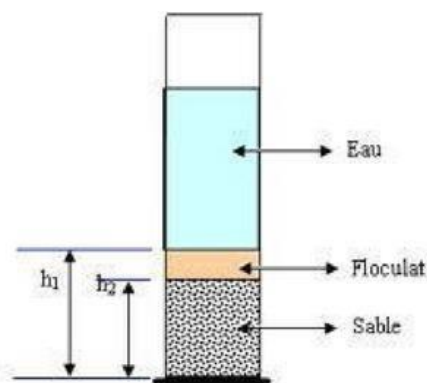
La hauteur  $h_1$  = sable propre + éléments fins

La hauteur  $h_2$  = sable propre seulement

L'équivalent de sable est alors calculé par la formule suivante :  $Es = (h_2 / h_1) \times 100\%$

**c) Appareillages utilisés :**

- Truelle ronde
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200ml.
- Balance.
- Chronomètre.
- Règle graduée.
- Eprouvettes



**Figure III. 4: Schéma explicatif d'équivalent de sable.**

Tableau III- 2: les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité du sable.

Es au piston	Nature et qualité du sable
$Es < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un Essai au bleu de Méthylène
$60\% \leq Es < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du Béton
$70\% \leq Es < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$Es \geq 80\%$	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

### III.2.4 Le gravier

Le granulat que nous avons utilisé est un gravier de diamètre (3/8). Il a été lavé puis séché à l'étuve à température 105°C pendant 24 heures et conservé dans des sacs propres à l'intérieur du laboratoire.



Figure III. 6: Un échantillon du gravier (3/8) utilisé.

### III.2.5 La vase du barrage

La vase qu'on a utilisé est celle de barrage du K'sob. Il se trouve dans la Wilaya de M'sila à 15 km au nord de M'sila. Le barrage a été mis en eau en 1940. Le rejet de la vase dragué du barrage K'sob se fait à l'aval à 4km. Dans des bassins de stockage et de décantation. L'analyse chimique de la vase utilisée est donnée dans le tableau (III-3). La vase est fournie sous forme de poudre grossièrement broyée. Après séchage à 105°C dans une étuve, nous avons finement broyé et tamisé la vase à travers un tamis de 80 µm. Ensuite on a calciné la vase à des températures différentes.

Tableau III- 3: Composition chimique de la vase de barrage.

Composants	%
SiO <sub>2</sub>	38.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.96
CaO	17.53
MgO	2.06
SO <sub>3</sub>	0.19
K <sub>2</sub> O	1.61
Na <sub>2</sub> O	0.26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25
TiO <sub>2</sub>	0.68
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.018
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.053
ZnO	0.009
SrO	0.04
PAF	20.25
Cl	0.016
Moisture	8.9



Figure III. 7: Les différentes étapes du traitement de la vase.

### III.2.6 Adjuvant

Les essais de laboratoire ont été effectués en utilisant un super-plastifiant commercialisé sous le nom de Sikaplast 40 Pro, c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération utilisé dans les bétons.

### III.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres figure (III-8). Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Avant l'opération de tamisage, les échantillons sont lavés puis séchés à l'étuve à une température de 105°C. Pour l'analyse granulométrique du sable (0/3), on a utilisé les dimensions des tamis suivants : 3,15 ; 2 ; 1 ; 0,8 ; 0,5 ; 0,315 ; 0,16 ; 0,125 ; 0,08 ; Fond. Pour le gravier (3/8) on a utilisé les dimensions des tamis suivants : 10 ; 8 ; 6,3 ; 5 ; 2,5 ; 0,125 ; 0,63 ; 0,5 ; Fond. Pour chaque échantillon, nous avons pris une masse de 2500g.



Figure III. 8: La tamiseuse utilisée.

Tableau III- 4: Analyse granulométrique du sable (0/3).

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
3,15	0	0	0	100
2	67,1	67,1	2,684	97,316
1	792,1	859,2	34,368	65,632
0,8	206,5	1065,7	42,628	57,372
0,5	96,0	1161,7	46,468	53,532
0,315	585,7	1747,4	69,896	30,104
0,16	499,3	2246,7	89,868	10,132
0,125	63,0	2309,7	92,388	7,612
0,08	103,7	2413,4	96,536	3,464
Fond	86,6	2500	100	0

Tableau III- 5: Analyse granulométrique du gravier (3/8).

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
10	0	0	0	100
8	28,2	28,2	1,128	98,872
6,3	488,5	516,7	20,668	97,332
5	1127,0	1643,7	65,748	34,252
2,5	833,3	2477,0	99,08	0,92
0,125	18,1	2495,1	99,804	0,196
0,63	3,2	2498,3	99,932	0,068
0,5	0	2498,3	99,932	0,068
Fond	1,7	2500	100	0

Les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour le sable et le gravier, voir Figure (III-9).

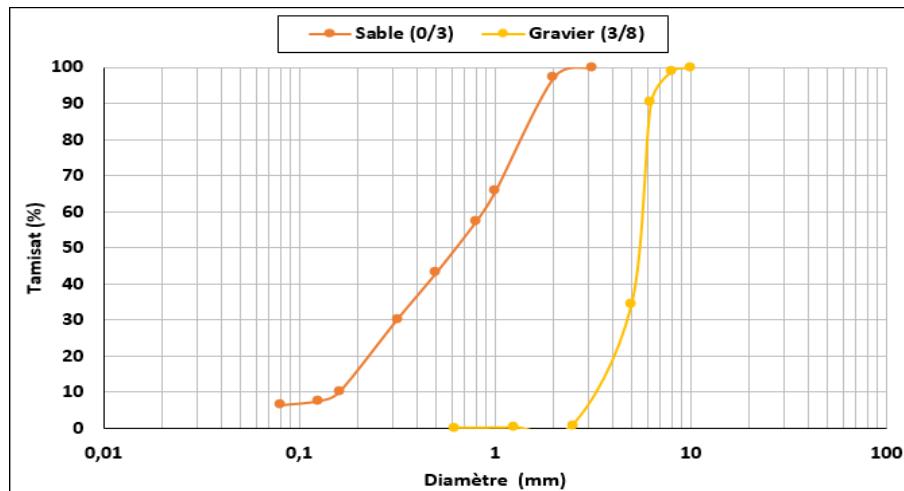


Figure III. 9: Courbes granulométriques.

### III.4 MODULE DE FINESSE

Afin d'évaluer la granulométrie des granulats, on a calculé le module de finesse. Le calcul est effectué à partir des résultats de l'analyse granulométrique et permet d'obtenir une mesure globale de la répartition des tailles de particules. Selon la norme française [NFP18-540], le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm

$$Mf = \frac{1}{100} \sum_{i=0.16}^5 Ri$$

Ri : refus cumulé en pourcentage (%) des tamis.

Lorsque Mf est entre :

1.8 < Mf < 2.2 : le sable est à majorité de grains fins

2.2 < Mf < 2.8 : le sable est préférentiel

2.8 < Mf < 3.3 : le sable est grossier

Après calcul, on trouve Mf = 2,68 donc notre sable est préférentiel.

### III.5 EQUIVALENT DU SABLE

L'équivalent du sable est un test utilisé pour évaluer la qualité d'un sable. Il représente la quantité d'éléments fins, principalement d'origine argileuses, végétales ou organiques, présents à la surface des grains.

**a) Equipement nécessaire :**

- Spatule et cuillère ;
- Récipients de pesée ;
- Balance ;
- Chronomètre ;
- Règle graduée ;
- Eprouvettes ;
- L'agitateur ;
- Le piston.

**b) Mode opératoire :**

- Prélever un échantillon de sable de 120g ;
- Verser de l'eau dans une éprouvette jusqu'au repère 1 ;
- Verser l'échantillon de sable dans cette éprouvette ;
- Agiter le tout pendant 90 cycles en 30 secondes (utiliser un agitateur manuel) ;
- Compléter l'éprouvette avec de l'eau jusqu'au repère 2
- Laisser reposer pendant 20 minutes (positionner l'éprouvette verticalement).



**Figure III. 10: L'agitateur utilisé pour l'essai d'équivalent du sable.**

Nous avons effectué les mesures suivantes :

La hauteur h1 : sable propre + éléments fins

La hauteur h2 : sable propre seulement

L'équivalent de sable est déduit :  $ES = (h1/h2) \times 100 \%$

**Sable (0/3) :**

$$ES = (h_2/h_1) \times 100 \%$$

$$ES = (7.6/9.1) \times 100 \%$$

$ES = 81.51 > 80$  (On déduit que le sable est très propre).

**III.6 FORMULATION DES BETONS**

Pour obtenir un béton répondant aux exigences spécifiques, il est essentiel de suivre plusieurs étapes, allant de la caractérisation des matériaux jusqu'à la formulation. Les performances attendues du béton comprennent notamment son ouvrabilité, généralement évaluée par L'affaissement au cône d'Abrams, sa résistance, souvent mesurée à 28 jours, et sa perméabilité, ce qui nécessite un dosage approprié en ciment et en eau (rapport eau/ciment).

**III.6.1 Préparation des compositions**

Pour la formulation de nos bétons, nous avons utilisé trois échantillons de vase, chacune est calcinée à une température « T ». Aussi, nous avons étudié trois pourcentages d'ajout de vase : (5% ; 10% et 15%). Nous avons confectionné 108 éprouvettes, destinés pour les essais de compression, essais de flexion, essai de porosité et essais de perméabilité à l'eau avec un rapport  $E/C = 0,36$ .



Figure III. 11: Préparation des pesées pour la confection des bétons étudiés.

### III.6.2 Les moules utilisés

Après les pesés des composants nécessaires pour la formulation des bétons, on prépare les moules qu'on va utiliser pour la confection des bétons. Dans ce programme expérimental, trois types de moules ont été utilisés :

- ❖ **Les éprouvettes cylindriques** normalisées, conformes à la norme NF P 18-400, NA 2600, de dimension ( $\phi 10 \times 20$ ) cm, destinées pour mesurer les résistances à la compression.
- ❖ **Les éprouvettes prismatiques** normalisées (NF P18-400, NA2600) de dimensions (7x7x28) cm<sup>3</sup> pour la détermination des résistances à la flexion.
- ❖ **Les éprouvettes cubiques** normalisées (NF P18-400, NA2600) de dimensions (10x10x10) cm<sup>3</sup> destinées pour les essais de porosité et essais de perméabilité.



Figure III. 12: Les moules utilisés.

### II.6.3 La confection de béton

Tous les mélanges ont été gâchés en suivant le même protocole, le béton a été réalisé dans un malaxeur à axe verticale. Pour chaque gâchée du béton, trois éprouvettes prismatiques, trois cubiques et trois cylindriques ont été confectionnées.

### III.6.4 Mode opératoire

Le malaxage du béton se fait comme suit :

- Déversement du sable, gravier, vase de barrage et ciment dans le malaxeur et mise en marche pendant 1 mn jusqu'à l'homogénéisation des matériaux ;
- Introduction de l'eau de gâchage avec le superplastifiant et malaxage pendant 2 mn.
- Les moules sont remplis en deux couches d'égale épaisseur, chaque couche étant compactée par la mise en marche de la table vibrante pendant 10 secondes.
- Conservation des éprouvettes Après la confection des échantillons, ces derniers sont recouverts d'un sac en plastique afin d'éviter toute évaporation d'eau.
- Démoulage après 24 heures, Mise en cure des échantillons dans un endroit humidifié (dans un bac à eau) et conservés pendant 28 jours.



Figure III. 13 : Confection des mélanges.



Figure III. 14 : Mise en moules.



Figure III. 15 : Conservation des éprouvettes dans l'eau.

### III.7 ESSAIS SUR LE BETON FRAIS

#### III-7-1 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 œuvre. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas les 40 mm. Cet essai, consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tonique d'un béton frais.

L'essai d'affaissement est réalisé comme suit :

- ✓ Disposer un moule conique en métal humidifié sur une surface plane et horizontale ;
- ✓ Remplissage du moule en trois couches successives par le béton frais, en effectuant 25 coups de piquage avec une tige après chaque couche pour éliminer les bulles d'air ;
- ✓ Arraser la surface du béton avec la tige de piquage pour obtenir un niveau uniforme ;
- ✓ Retirer immédiatement le moule verticalement et sans mouvement de torsion, en 5 à 10 secondes maximum ;
- ✓ Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près. L'affaissement correspond à la différence de hauteur entre le bord supérieur du moule et le point le plus haut de la surface du béton tassé.



Figure III. 16 : Les étapes de l'essai au cône d'Abrams.

Tableau III- 7: Consistance du béton à partir de l'affaissement.

<b>Consistance</b>	<b>Affaissement (cm)</b>
<b>Ferme (F)</b>	0 à 4
<b>Plastique (P)</b>	5 à 9
<b>Très Plastique (TP)</b>	10 à 15
<b>Fluide (F)</b>	≥ 16

### **III.8 Essai de compression (NF P 18-406)**

Les essais de compression ont été réalisés sur la machine IBERTEST, avec un montage approprié à la compression figure (III.17). Ces essais ont été réalisés sur les éprouvettes cylindriques ( $\phi 10 - 20$ ) cm avec une vitesse de chargement de 0,5 kN/s. La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton, c'est le paramètre fondamental de notre étude. Notre objectif dans cette étude est de déterminer les résistances à la compression des différents bétons à 28 jours. La résistance en compression a été évaluée selon la norme (NF P 18 – 406).



Figure III. 17 : Illustrations sur l'essai de compression.

### III.9 Essai de traction par flexion trois points (NF P 18-407)

L'essai de traction par flexion trois points est effectué sur des prismes  $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ . Le prisme est placé dans une presse hydraulique pilotée par un ordinateur. Sa capacité maximale est de 200 kN. La distance « L » entre appuis est égale à 21 cm. Afin d'éviter les effets parasites provoqués par les défauts de parallélisme et de planéité de la face supérieure de l'éprouvette, nous avons appliqué le chargement sur les faces latérales de l'éprouvette. Cette dernière est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 kN/s.



Figure III. 18 : Illustrations sur l'essai de flexion.

### III.10 Essai de porosité ouverte : (NF P 18 – 459)

Il s'agit d'une méthode pour déterminer le pourcentage volumique de vides communicants d'un béton drainant. Elle est mesurée sur une série de 3 éprouvettes après 24h minimum de durcissement du béton.

#### a) Mode Opératoire :

- Placer l'échantillon dans son moule 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 si nécessaire jusqu'à ce que son niveau atteigne la surface supérieure de l'échantillon ;
- Noter la masse  $M_e$  d'eau totale introduite à 0,001 kg près.

Calculer la porosité ouverte par la formule suivante :

$$P\% = 100 \frac{M_e}{\rho_e V}$$

Avec :

P% : La porosité ouverte, en % ;

Me : La masse d'eau totale introduite, en kg ;

$\rho_e$  : La masse volumique de l'eau, prise égale à 1 kg/l ;

V : Le volume nominal du moule, en L.



Figure III. 19 : Illustration d'essai de porosité ouverte.

### III.11 ESSAI DE PERMEABILITE A L'EAU

Le dispositif de mesure de perméabilité à l'eau utilisé est représenté sur la figure (III-19). L'essai a été réalisé selon la norme ASTM C-1701. Nous avons calculé la perméabilité à l'eau selon l'équation suivante :

$$I = \frac{k.M}{D^2.t}$$

Avec :

I : Le taux d'infiltration, en mm/s ;

K : constante : 4583666000

(mm<sup>3</sup>.s/kg.h) ; M : Masse d'eau, en kg ;

D : Diamètre intérieur du tuyau d'infiltration, en cm ;

t : Le temps nécessaire à la quantité d'eau mesurée pour s'infiltrer dans le béton, en s.



Figure III. 20: Illustration d'essai de perméabilité à l'eau.

### III .12 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs caractéristiques, la formulation des différents mélanges. Nous avons fait varier deux paramètres qui sont la température de calcination de la vase et le taux de substitution du ciment par la vase. Aussi nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette recherche (essai de compression, essai de flexion trois points, essai de porosité ouverte et essai de perméabilité) et le choix de corps d'épreuve.

# Chapitre IV

## Résultats et interprétation

## IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats des différents essais menés sur les bétons étudiés. Les performances mécaniques des bétons sont étudiées. Nous avons élaboré des compositions en faisant varier le type et le pourcentage de la vase. Cette dernière a été calcinée à des températures différentes (700°C ; 750°C et 800°C). Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les bétons drainants à l'état frais et l'état durci :

A l'état frais,

- ❖ L'essai de l'affaissement au cône d'Abrams.

A l'état durci,

- ❖ Les essais de résistances à la compression sur **Les éprouvettes cylindriques** normalisés et d'élanement de (10×20) cm, conformes à la norme NF P 18-400, NA 2600.
- ❖ Les essais de flexion ont été effectués sur des échantillons prismatiques de dimensions (7×7×28 cm<sup>3</sup>).
- ❖ L'essai de porosité.
- ❖ Les essais de perméabilité à l'eau

## IV.2 FORMULATION DES BETONS

Dans ce travail, nous avons étudié trois compositions de béton :

Composition 1 (V-700°C) : La vase est calcinée à 700°C ;

Composition 2 (V-750°C) : La vase est calcinée à 750°C ;

Composition 3 (V-800°C) : La vase est calcinée à 800°C.

Pour chaque composition, nous avons utilisé trois pourcentages de vase (5% ; 10% et 15%) en substitution du ciment. Nous avons nommé les bétons comme suit :

B5V : Béton avec 5% de vase ;

B10V : Béton avec 10% de vase ;

B15V : Béton avec 15% de vase.

### IV.3 Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams a été réalisé sur les différents mélanges de béton. C'est un essai qui nous permet de connaître la plasticité de notre béton et d'ajuster notre dosage en fonction des performances recherchées. L'ouvrabilité est une caractéristique à ne pas négliger surtout lorsqu'il s'agit de la mise en place du béton sur un chantier dans le sens où il donne une idée sur l'éventuelle difficulté de leurs mises en œuvre. Les résultats d'affaissement sont présentés dans le tableau (IV-1).

Tableau IV- 1 : Affaissement des différents bétons.

<b>Les types de béton</b>	<b>Affaissement (cm)</b>
<b>BT</b>	<b>19.5</b>
<b>B5V (700°C)</b>	<b>19</b>
<b>B10V (700°C)</b>	<b>20</b>
<b>B15V (700°C)</b>	<b>19.5</b>
<b>B5V (750°C)</b>	<b>19</b>
<b>B10V (750°C)</b>	<b>20</b>
<b>B15V (750°C)</b>	<b>19.5</b>
<b>B5V (800°C)</b>	<b>19</b>
<b>B10V (800°C)</b>	<b>20</b>
<b>B15V (800°C)</b>	<b>19</b>

Nous avons confectionné un béton fluide. L'affaissement varie entre 19 et 20 cm.

### IV.4 ESSAI DE COMPRESSION

Il s'agit d'un essai qui va nous permettre de définir la résistance à la compression à 28 jours des bétons étudiés. Le principe de l'essai est de soumettre les éprouvettes cylindriques à une force croissante et constante jusqu'à la rupture. Les résultats sont présentés dans le tableau (IV-2) et les figures (IV-2), (IV-3) et (IV-4).



**Figure IV- 1 : Essai d'écrasement en compression.**

Les résultats des essais à la compression sont présentés dans le tableau (IV-2) :

Tableau IV- 2: les résistances à la compression des bétons étudiés.

Echantillons	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecartype (MPa)	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecartype (MPa)	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecartype (MPa)
	700°C			750°C			800°C		
<b>BT-1</b>	9,118	8,4	1	9,118	8,4	1	9,118	8,4	1
<b>BT-2</b>	-			-					
<b>BT-3</b>	7,758			7,758					
<b>B5V -1</b>	8,518	8,7	0,4	9,671	8,7	0,8	8,141	7,8	0,5
<b>B5V -2</b>	9,158			8,23			8,009		
<b>B5V -3</b>	8,448			8,276			7,236		
<b>B10V -1</b>	6,552	6,8	0,2	9,669	10,4	1,4	8,914	8,0	0,9
<b>B10V -2</b>	6,931			9,571			7,923		
<b>B10V -3</b>	6,827			11,976			7,217		
<b>B15V -1</b>	6,859	6,9	0,6	8,245	8,4	0,6	8,451	8,3	0,5
<b>B15V -2</b>	6,263			9,069			7,689		
<b>B15V -3</b>	7,454			7,814			8,689		

La variation des résistances à la compression en fonction du taux de substitution du ciment par la vase sont présentés dans les figures (IV-2), (IV-3), (IV-4) et (IV-5).

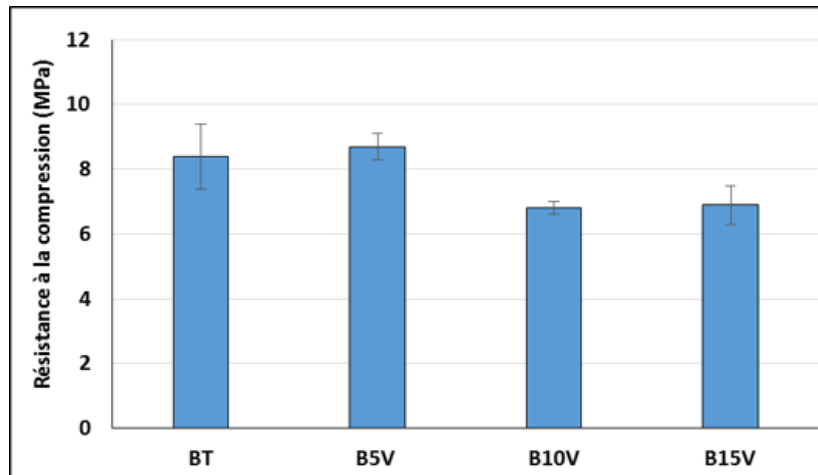


Figure IV- 2: Résistance à la compression des bétons étudiés (V-700°C).

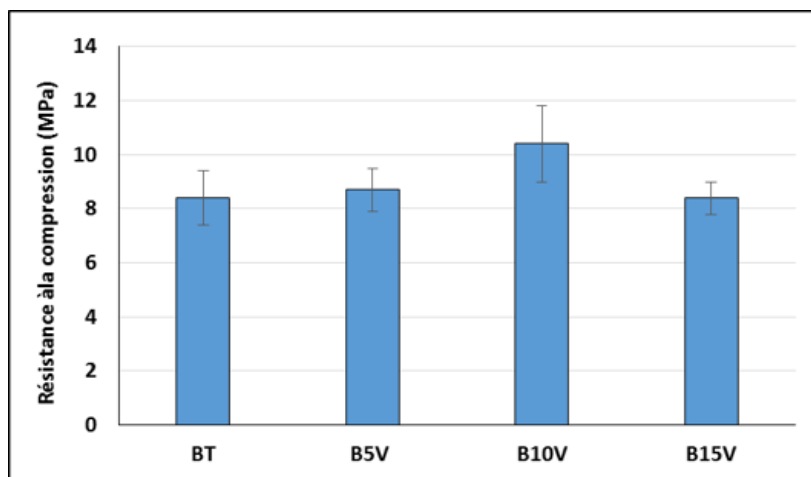
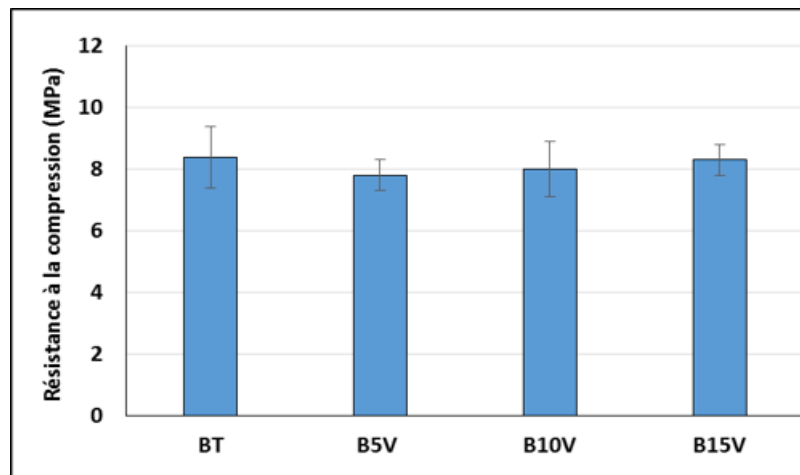


Figure IV- 3: Résistance à la compression des bétons étudiés (V-750°C).



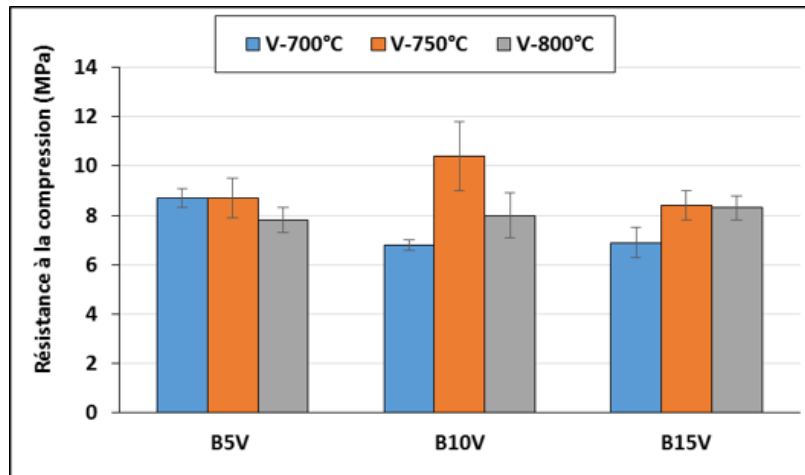
**Figure IV- 4: Résistance à la compression des bétons étudiés (V-800°C).**

Les figures (IV-2), (IV-3) et (IV-4) montrent l'évolution de résistance à compression des différentes variantes étudiées. Pour la première composition (V-700°C), on remarque qu'il y'a une augmentation de la résistance pour le béton (B5V) qui est de 14% par rapport au béton témoin. Alors que pour les autres bétons (B10V) et (B15), il y'a une diminution de résistance qui est respectivement de 10% et 9%.

En ce qui concerne la deuxième composition (V-750°C), on constate une augmentation de résistance à la compression de tous les bétons étudiés par rapport au béton témoin. Cette augmentation est de 14% pour la variante (B5V), 36% pour la variante (B10V) et 10% pour la variante (B15V).

Pour la troisième composition (V-800°C), on constate une légère diminution de la résistance à la compression pour toutes les variantes des bétons étudiés.

L'évolution de la résistance à la compression en fonction de la température de calcination de la vase est montrée sur la figure (IV-5).



**Figure IV- 5: Résistance à la compression : influence de la température de calcination de la vase.**

La figure (IV-5) montre l'évolution de la résistance à la compression des différentes compositions en fonction de la température de calcination de la vase. Pour une calcination à 750°C, on constate que la résistance à la compression des trois pourcentages de substitution du ciment par la vase est plus grande par rapport aux autres températures étudiées (700°C et 800°C), qui est particulièrement marquée par la variante B10V qui est de l'ordre de 10,4 MPa.

#### **IV.5 ESSAI DE FLEXION TROIS POINTS**

Pour tous les essais de flexion trois points, nous avons confectionné 30 éprouvettes (7×7×28) cm<sup>3</sup>. Soit trois éprouvettes pour chaque variante. Les résultats suivants donnent les valeurs des résistances à la flexion des différents bétons drainants étudiés.

Les résultats des essais à la flexion sont présentés dans le tableau (IV-3) :

Tableau IV- 3: les résistances à la flexion des bétons étudiés.

Echantillons	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecartype (MPa)	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecartype (MPa)	Résistance (MPa)	Moyenne (MPa)	Ecartype (MPa)
	700°C			750°C			800°C		
<b>BT-1</b>	3,421	3,3	0,1	3,421	3,3	0,1	3,421	3,3	0,1
<b>BT-2</b>	3,309			3,309			3,309		
<b>BT-3</b>	3,211			3,211			3,211		
<b>B5V -1</b>	3,188	3,3	0,1	3,344	3,2	0,2	2,924	2,9	0,2
<b>B5V -2</b>	3,36			2,989			3,1		
<b>B5V -3</b>	3,229			3,213			2,74		
<b>B10V -1</b>	3,053	2,8	0,2	3,268	3	0,3	3,273	3,2	0,1
<b>B10V -2</b>	2,871			3,012			3,088		
<b>B10V -3</b>	2,61			2,726			3,272		
<b>B15V -1</b>	2,107	2,5	0,4	2,34	2,7	0,3	2,249	2,7	0,4
<b>B15V -2</b>	2,833			2,688			3,105		
<b>B15V -3</b>	2,481			2,984			2,813		

Les résistances à la flexion en fonction du pourcentage d'ajout de la vase calcinée à des températures de 700°C, 750°C et 800°C sont présentées dans les figures (IV-6), (IV-7), (IV-8).

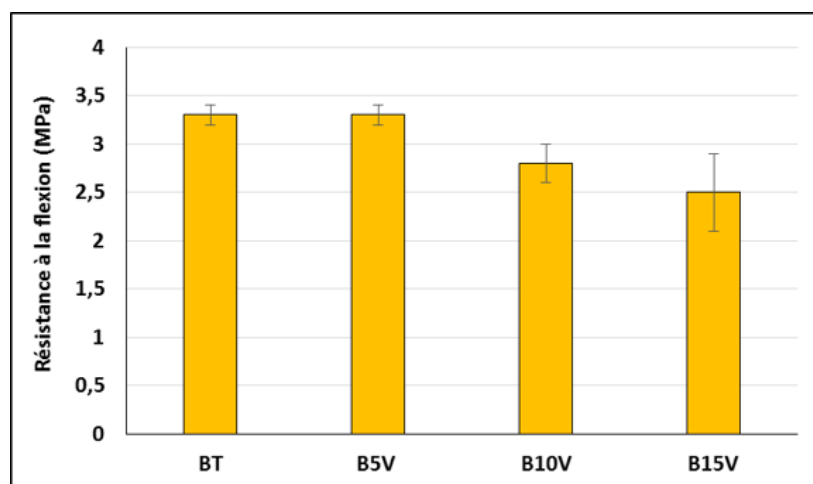


Figure IV- 6 : Résistance à la flexion des bétons étudiés (V-700°C).

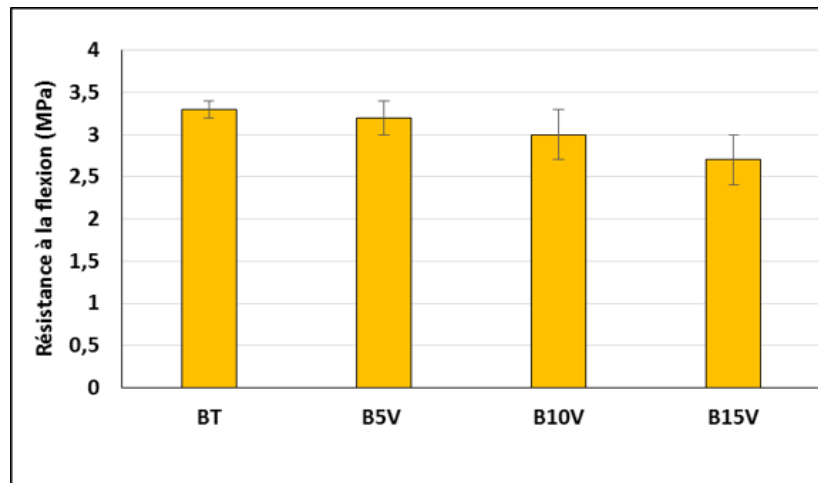


Figure IV- 7: Résistance à la flexion des bétons étudiés (V-750°C).

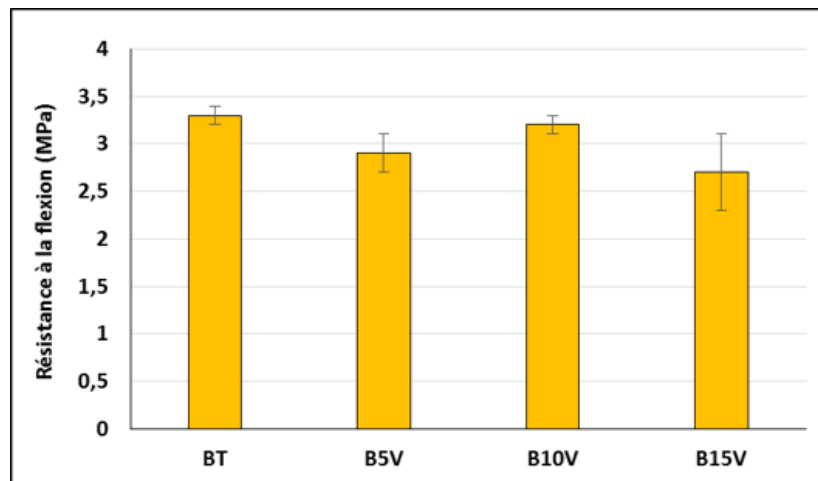


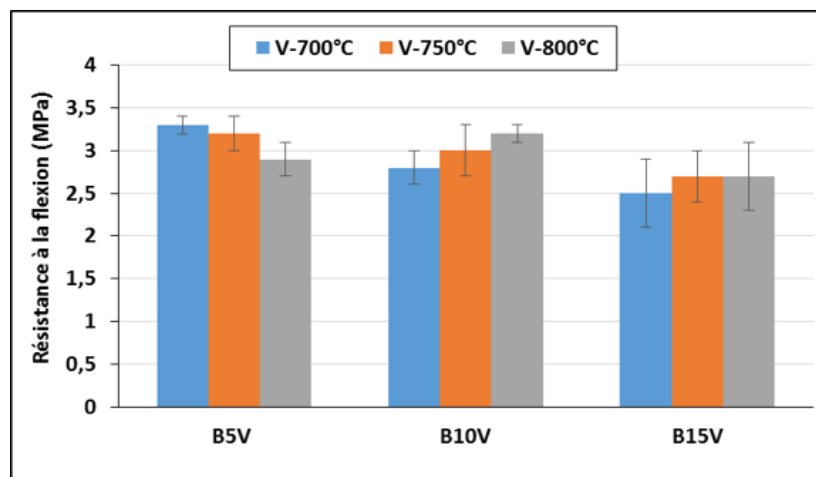
Figure IV- 8: Résistance à la flexion des bétons étudiés (V-800°C).

Pour la première composition (V-700°C), le béton (B5V) et le béton témoin (BT) ont pratiquement la même résistance à la flexion qui est de l'ordre de 3,3 MPa. Alors que pour les deux autres variantes, on constate une diminution de la résistance à la flexion par rapport au béton témoin qui est de 15% pour le béton B10V et de 24% pour la variante B15V.

En ce qui concerne la deuxième composition (V-750°C), la résistance à la flexion de la variante B5V diminue légèrement par rapport à la résistance du béton témoin. Alors que pour les variantes B10V et B15V, il y'a une diminution respectivement de 9% et 18%. La résistance à la flexion diminue en fonction du taux de substitution de la vase.

Pour la troisième composition (V-800°C), la résistance à la flexion est du même ordre pour la variante B10V et le béton témoin. Une légère diminution de la résistance par rapport au béton témoin est constaté pour les variantes B5V et B15V qui est respectivement de 12% et 18%.

L'évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température de calcination de la vase est montrée sur la figure (IV-9).



**Figure IV- 9: Résistance à la flexion : influence de la température de calcination de la vase.**

La résistance à la flexion diminue lorsque la température de calcination de la vase augmente et cela pour un taux de substitution de 5%. Alors que pour les deux autres pourcentages de substitution (10% et 15%), on remarque que la résistance à la flexion augmente avec la température de calcination de la vase.

## IV.6 ESSAI DE POROSITE OUVERTE

Les résultats des essais de porosité à l'eau sont présentés dans la figure (IV.10).

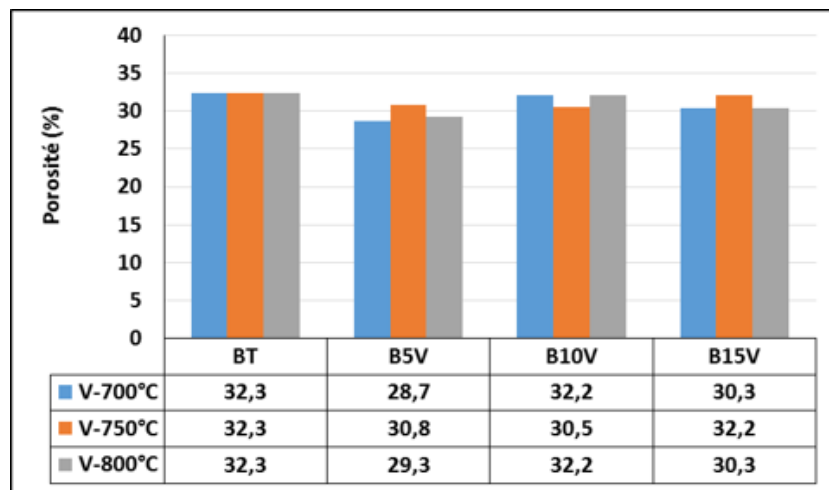


Figure IV- 10: Porosité des bétons étudiés.

La porosité de nos bétons varie entre 28% et 32%, c'est une porosité très élevée qui pourrait assurer facilement le drainage de l'eau, c'est une caractéristique très recherchée pour les bétons drainants. On constate que les bétons avec ajout de vase calcinée comme substitution du ciment ont présenté une porosité à l'eau légèrement inférieure à celle du béton témoin et cela pour les trois compositions étudiées. La variante B5V a présenté une porosité légèrement inférieure aux autres variantes (B10V et B15V).

### IV.7 ESSAI DE PERMEABILITE A L'EAU

Les différents résultats de perméabilité à l'eau sont donnés dans la figure (IV-11).

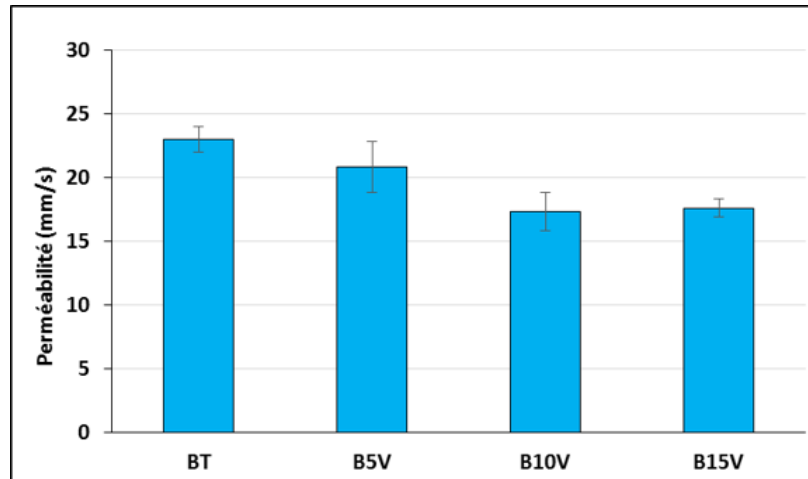


Figure IV- 11 : Perméabilité des bétons étudiés.

Le coefficient de perméabilité des bétons étudiés varie entre 17mm/s et 23 mm/s. Les bétons (B5V, B10V et B15V) ont une perméabilité inférieure à celle du béton témoin. En ce qui concerne les variantes B10V et B15V, on constate qu'elles ont le même coefficient de perméabilité. Donc on remarque que plus on fait augmenter le taux de substitution en vase, la perméabilité diminue.

### IV.7.1 Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité

L'évolution de la perméabilité en fonction de la porosité est montrée sur la figure (IV-12).

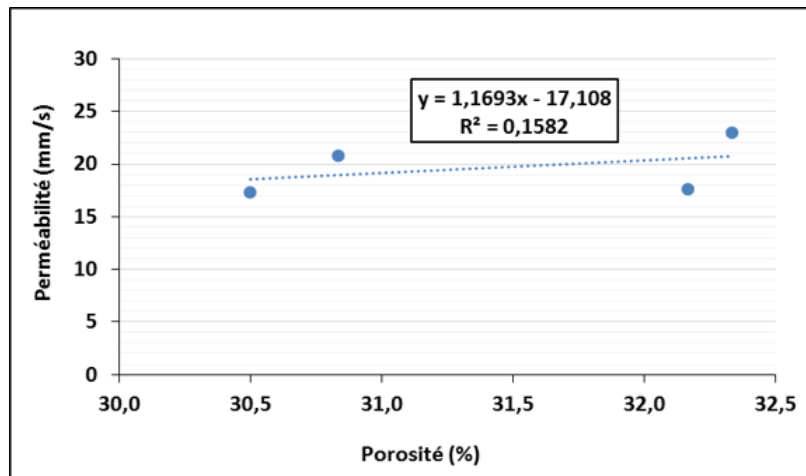


Figure IV- 12: Evolution de la perméabilité en fonction de la porosité.

### IV.7.2 Evolution de la perméabilité en fonction de la résistance à la compression

La figure (IV-13) montre l'évolution de la perméabilité en fonction de la résistance à la compression.

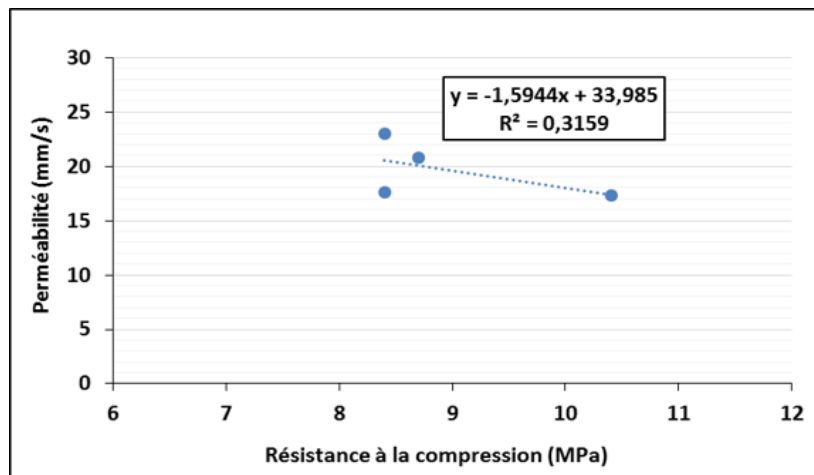


Figure IV- 13: Evolution de la perméabilité en fonction de la résistance à la compression.

Lorsque la résistance à la compression d'un béton est élevée cela engendre une faible perméabilité de ce béton et inversement une résistance faible génère une forte porosité, ce qui produit un béton plus perméable. Ceci est confirmé par les figures (IV-11) et (IV-12). Il est connu que la résistance à la compression est étroitement liée à la porosité donc à la perméabilité du béton. Sur la figure (IV-12), on remarque que la perméabilité diminue lorsque la résistance à la compression augmente.

## IV.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats des essais qu'on a réalisés sur les bétons étudiés au laboratoire du génie civil. On a confectionné trois compositions différentes en faisant varier le taux de substitution de la vase. Lorsque le taux de substitution de la vase augmente, la perméabilité diminue mais la résistance à la compression augmente pour la composition (V-750°C).

# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, nous avons essayé d'introduire la vase calcinée de barrage, souvent considérée comme un déchet, dans la formulation d'un béton drainant qui présentera de bonnes caractéristiques mécaniques et une bonne perméabilité. Afin de diminuer la consommation du ciment qui est très polluant pour l'environnement, nous avons utilisé cette vase en substitution du ciment.

Les résultats obtenus par cette étude ont montré :

- Pour la deuxième composition (V-750°C), les bétons ont présenté des résistances à la compression supérieure à celle du béton témoin. Cette augmentation est de 14% pour la variante (B5V), 36% pour la variante (B10V) et 10% pour la variante (B15V). Alors que pour les deux autres compositions (V-700°C) et (V-800°C), les résultats ont montré qu'il y'a une légère diminution de la résistance à la compression, mais c'est des résultats qui restent acceptable pour un béton drainant.
- La résistance à la flexion diminue lorsque la température de calcination de la vase augmente et cela pour un taux de substitution de 5%. Alors que pour les deux autres pourcentages de substitution (10% et 15%), on remarque que la résistance à la flexion augmente avec la température de calcination de la vase.
- La porosité de nos bétons varie entre 28% et 32%, c'est une porosité très élevée qui pourrait assurer facilement le drainage de l'eau, c'est une caractéristique très recherchée pour les bétons drainants. On constate que les bétons avec ajout de vase calcinée comme substitution du ciment ont présenté une porosité à l'eau légèrement inférieure à celle du béton témoin et cela pour les trois compositions étudiées.
- Le coefficient de perméabilité des bétons étudiés varie entre 17mm/s et 23 mm/s. Les bétons (B5V, B10V et B15V) ont une perméabilité inférieure à celle du béton témoin. On remarque que plus le taux de substitution en vase et la résistance à la compression augmentent, la perméabilité diminue.

- La substitution du ciment par de la vase calcinée dans les bétons drainants présente beaucoup d'avantages : bonnes caractéristiques mécaniques, bonne perméabilité, meilleure économie du ciment, réduction de la consommation d'énergie et d'émission de CO<sub>2</sub>.

Références  
Bibliographiques

- [1] : **Doe, J., & Smith, A.** (2020). Hydraulic Properties of Pervious Concrete. *Journal of Civil Engineering*, 45(3), 150-160
- [2]: **Brown, L.** (1998). Historical Use of Pervious Concrete in England. *Construction History*, 19(2), 75-85.
- [3] : **G. CHANVILLARD**, « Connaissances générales sur le matériau béton », Ed. Aléas, 1999  
Référence.[4]. <https://encryptedtbn0.gstatic.com>
- [5] : **J ABDO** « Ciments », C920, Edition Techniques de l'ingénieur, première Edition, p4, 2008.
- [6]: **American Concrete Institute.** (2011). ACI 211.3R-02: Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. ACI.
- [7] : [ACI 522-R10, Report on Pervious Concrete Farmington Hills, MI, 2010]
- [8]: **Wang, Y., & Lee, S.** (2010). Effect of Admixtures on Properties of Pervious Concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(8), 1234-1240
- [9]: **Zhifu, P.** (2011). Influence of Fibres on Permeable Concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3241-3247.
- [10] **S. Mrakovčić, N. Čeh, V. Jugovac**, « Effect of aggregate grading on pervious concrete properties » revue *Gradevinar*, 2014.
- [11]: **Association Béton Québec.** (2012). Guidelines for Pervious Concrete. ABQ Publications [12]: **Yang, Z., & Wang, X.** (2006). Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete. *Cold Regions Science and Technology*, 44(3), 123-130.
- [13] : [https://www.infociments.fr/sites/default/files/styles/image\\_contenu\\_article/public/images](https://www.infociments.fr/sites/default/files/styles/image_contenu_article/public/images)

[14] :[https://www.maisons-fevrier.com/beton drainant/caracteristiques-et-avantages-du-beton-permeable-3710\\_A](https://www.maisons-fevrier.com/beton-drainant/caracteristiques-et-avantages-du-beton-permeable-3710_A)

[15] : **G. CHANVILLARD**, « Le matériau béton : connaissances générales ». Les cours de l'ENTPE, Edition ENTPE ALEAS, (1999).

[16] : **J ABDO** « Ciments », C920, Edition Techniques de l'ingénieur, première Edition, p4, 2008.

[17] **ACI Committee 232** *Use of Fly Ash in Concrete*. ACI 232.2R-12. American Concrete Institute. (2012).

[18] : **A. DELAGRAVE**, Étude des mécanismes de pénétration des ions chlore dans les bétons conventionnels et à haute performance. Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada (1996).

[19] :<https://www.acpresse.fr/wp-content/uploads/2020/06/4-Fumee-Silice-NRL.jpg>

[20]: **OUSSAMA OUCHOUGRANE** and **MOHAMED AMINE BOUMEDIENE**. Caractérisation mécanique d'un béton à base de fumée de silice condensée. PhD these, Université Ibn Khaldoun, 2019

[21]: **M.Thomas J.P.Hudec, R.L.Johnson**. Heat evolution and hydration of portland cement with silica fume. Cement and concrete research, 1987.

[22] : **HADIDANE Hocine**. Contribution a l'amélioration du comportement des corpsde chaussées par l'utilisation de laitier d'EL HADJAR. PhD thesis, 2008

[23] : **HERAKTIA Khadija**. Lixiviation du laitier par des acides organiques. PhD thesis, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2018.

[24] : [https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/laitiers\\_de\\_hauts-fourneaux.php4](https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/laitiers_de_hauts-fourneaux.php4)

[25] : **AYRINHAC Fabien**. Valorisation des cendres volantes de chaudière à Lit uidisé circulant dans la lière du génie civil. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2005.

[26] : **S. H. KOSMATKA, B. KERKHOFF, W. C. PANARESSE, N. F. MACLEOD, R. J. MCGRATH**, « Dosage et contrôle des mélanges de béton ». Bulletin d'ingénierie EB101, Association canadienne du ciment, 7<sup>ème</sup> édition canadienne, (2004).

[27] : <https://www.aps.dz/economie/165855-campagne-dedevasement-des-barrages-2020-2025-plus-de-30-millions-m3-de-vase-seront-enleves>

[28] : **Linsley, R.K., Franzini, J.B., & Freyberg, D.L.** (2006). *Water Resources Engineering*. McGraw-Hill.

[29]: **Bartos, P. J. M.** "Concrete Admixtures: Properties and Uses." *Cement & Concrete Composites*, 22(3), 235-244(2000).

[30]: FICHE TECHNIQUE Sika® Aer-200

[31] : Les adjuvants du béton : types, utilisations, dosages - Tout sur le béton

[32] : <https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/docs/fiche-produit-ciment-matine-tm-en-francais.pdf>

