REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème

Etude de l'influence de la finesse du sable sur le comportement du béton caverneux

---

Présenté par :

SELAMI YAAQOUB

BABA ABD EL HAFIDH

Proposé et dirigé par :

Encadreur : Pr DEBIEB Farid

Co-Encadreur : Doctorante DJIREB Imane Fatna

Co-Encadreur : Dr SAHRAOUI Mohamed

Juin 2024

Remerciements

Louange et remerciements à Allah, le tout puissant qui nous a donné la volonté, l‘aide, la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements au **Professeur DEBIEB Farid** qui a accepté de nous encadrer et qui nous a fait bénéficier de son savoir et de ses conseils éclairés afin de perfectionner ce travail.

Nous remercions également notre Co-encadreur**, Melle DJIREB Imane Fatna** d'avoir acceptée d'encadrer cette thèse. Son expertise, sa disponibilité, sa patience et ses conseils éclairés ont grandement contribué à la réussite de notre projet. Nous sommes profondément reconnaissants de vous avoir comme guide et mentor. Votre aide inestimable a été un véritable moteur de motivation. Merci infiniment pour tout ce que vous avez fait pour nous.

De la même façon et d‘une grande chaleur, Nos vifs remercîments à notre **Co encadreur le Docteur SAHRAOUI Mohamed** d‘avoir accepté de diriger ce travail de thèse. Merci pour votre disponibilité, votre patience et vos encouragements Votre expertise, votre patience et vos conseils éclairés ont grandement contribué à la réussite de notre projet, Trouvez dans ce travail l‘expression de notre respect et de notre gratitude.

Nos sincères remercîments sont alloués aussi à l'ingénieur **Abderrahmane kerbouci** qui a été notre premier guide et assistant dans notre travail de laboratoire, grâce à qui le travail a été mené à bien, nous vous remercions pour votre soutien, votre gratitude et votre présence à nos côtés, et vous avez tout notre respect et notre appréciation.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement les Membres du jury qui nous ont fait l‘honneur de faire partie de ce jury et examiner ce modeste travail de recherche.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l‘élaboration de ce travail.

Dédicaces

A nos très **CHERS PARENTS**, Aucune phrase, aucun mot ne saurait exprimer à sa juste valeur le respect et l'amour que je vous porte.

Vous nous m'avez entouré d'une grande affection, et vous nous avez été toujours pour moi un grand support dans mes moments les plus difficiles. Sans vos précieux conseils, vos prières, votre générosité, je n'aurai pu surmonter le stress de ces longues années d'études. Vous êtes pour moi l'exemple de droiture, de lucidité et de persévérance.

Chacun de nous remercie toute sa généreuse **famille** et les proches pour leur soutien et leur présence à nos côtés.

Nous remercions tous les responsables du laboratoire pour leur aide et leurs conseils**, Yousef, Kawthar, Moussa, Oussama, hamza, Loubna**.

Nous remercions également tous nos camarades de classe et demandons à Dieu le succès pour nous et pour eux.

Enfin, nous remercions tous **nos amis** et tous ceux qui ont contribué à notre travail et qui nous ont prêté main forte.

Nous demandons à Dieu le succès, le bien-être et le succès dans notre vie professionnelle.

SELAMI YAAQOUB

BABA ABD ELHAFIDH

ملخص

خرسانة الصرف، أو الخرسانة النفوذة، هي مادة عالية المسامية تسهل تسرب مياه الأمطار إلى التربة، وتُستخدم في مواقف السيارات، والممرات، والطرق، والمنشآت الرياضية. يُحسن إضافة الرمل، وهو ممارسة شائعة في البناء، من مقاومة الضغط والشد لخرسانة الصرف، مما يعزز أدائها. تقيّم هذه الدراسة تأثير الرمل على الخرسانة النفوذة في الحالة الطازجة والصلبة، باستخدام نسبة 10% وثلاثة أنواع مختلفة من الرمل (ناعم، متوسط وخشن). تظهر النتائج أن إضافة الرمل تقلل من السيولة، والنفاذية، والمسامية، وتزيد من التوصيل الحراري، بينما تحسن الكثافة، والمقاومة الميكانيكية، والفحص الديناميكي. تُحقق زيادة بنسبة 10% من الرمل المتوسط توازنًا بين المسامية، والتوصيل الحراري، والمقاومة الميكانيكية. تم تحديد علاقة إيجابية بين نعومة الرمل والمقاومة الميكانيكية، وكذلك بين التوصيل الحراري وكثافة الخرسانة. علاوة على ذلك، أظهرت النتائج وجود روابط جيدة بين مقاومة الضغط، الكثافة، التوصيل الحراري والفحص الديناميكي

الكلمات المفتاحية: خرسانة الصرف، السيولة، الكثافة، النفاذية، المسامية، التوصيل الحراري، المقاومة الميكانيكية، الفحص الديناميكي.

Résumé

Le béton drainant, ou béton perméable, est un matériau à haute porosité facilitant l'infiltration des eaux pluviales dans le sol, utilisé dans les parkings, allées piétonnes, chaussées et installations sportives. L'ajout de sable, une pratique courante en construction, améliore la résistance à la compression et à la traction du béton drainant, optimisant ainsi ses performances. Cette étude évalue l'influence du sable sur le béton drainant à l'état frais et durci, avec un taux d'incorporation de 10% et trois granulométries différentes (fine, moyenne et grossière). Les résultats montrent que l'ajout de sable réduit la fluidité, la perméabilité, la porosité et augmente la conductivité thermique, tout en améliorant la densité, la résistance mécanique et l'auscultation dynamique. Une augmentation de 10% de sable moyen permet d'obtenir un équilibre entre la porosité, la conductivité thermique et la résistance mécanique. Une corrélation positive a été établie entre la finesse du sable et la résistance mécanique, ainsi qu'entre la conductivité thermique et la densité du béton. De plus, de bonnes corrélations ont été observées entre la résistance à la compression, la densité, la conductivité thermique et l'auscultation dynamique du béton étudié.

Mots clés : béton drainant, fluidité, densité, perméabilité, porosité, conductivité thermique, résistance mécanique, auscultation dynamique.

Abstract

Pervious concrete, or permeable concrete, is a high-porosity material that facilitates the infiltration of rainwater into the soil. It is used in parking lots, walkways, pavements, and sports facilities. The addition of sand, a common practice in construction, improves the compressive and tensile strength of pervious concrete, enhancing its performance. This study evaluates the influence of sand on pervious concrete in both fresh and hardened states, using a 10% sand incorporation rate with three different particle sizes (fine, medium, and coarse). The results show that adding sand reduces workability, permeability, and porosity, while increasing thermal conductivity. However, it also improves density, mechanical strength, and dynamic auscultation. An increase of 10% medium sand achieves a balance between porosity, thermal conductivity, and mechanical strength. A correlation has been established between sand fineness and mechanical strength, as well as between thermal conductivity and concrete density. Additionally, significant correlations were observed between compressive strength, density, thermal conductivity, dynamic auscultation, and the density of the studied concrete.

Keywords: pervious concrete, workability, density, permeability, porosity, thermal conductivity, mechanical strength, dynamic auscultation.

Table des matières

Remerciement ……..… II

Dédicaces ……..…III

Résume ……..…IV

Table des matières……...……..…VII

Liste des tableaux ……XII

Liste des figures ……XIII

Liste des symboles ……...…….....XVI

Introduction générale…….…..……1

Chapitre I. Etude bibliographique

1.1. Introduction……...……...……..……4.

1.2. Les composants du béton drainant……...…….....…5

1.2.1 Ciment…… ……..… ……..…5

1.2.2 Granulats…… …….....…6

1.2.2.1 Définitions…… ……..…….....6

1.2.2.2 Classification…… ……..…….6

1.2.2.3 Les types de granulats…… ……..……...7

1.2.2.3.1 Gros granulats……...7

1.2.2.3.2 Granulats fins……..…….8

1.2.3 Eau…… ……9

1.2.4 adjuvants…… ……...…….…..10

1.3. Propriétés du béton drainant……...……...11

1.3.1 Propriétés à l'état frai……....11

1.3.1.1 Ouvrabilité du béton frais……...…11

1.3.1.2 Affaissement au cône d'Abrams…… ……...12

1.3.2 Propriétés à l'état durci…… …….....13

1.3.2.1 Densité …… …….....13

1.3.2.2 Porosité…… ……..……14

1.3.2.3 Perméabilité…… …….....16

1.3.2.4 Résistance à la compression du béton drainant…….…17

1.3.2.5 La résistance à la traction…….....19

1.3.2.6 Résistance à l'abrasion……..…....21

1.3.2.7 Auscultation dynamique…….....23

1.3.2.8 Conductivité thermique…….....24

1.3.2.9 Résistance au cycle du gel/dégel……...……26

1.3.2.10 Retrait et Gonflement……...27

1.3.2.11 Module d'élasticité…….…..29

1.4. Facteurs influençant sur les bétons drainants……...….....30

1.4.1 Influence du rapport E/C…….……..30

1. 4.1.1 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C……...…30

1.4.1.2 Perméabilité en fonction du rapport E/C…… ……...….. 31

1.4.1.3 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C…… …….…32

1. 4.2 Effet de la granulométrie des granulats pour le béton drainant…… ……...……..33

1.4.3 Effet de l'énergie de consolidation …… ……..…33

1.4.4 Effet de la porosité sur la résistance à la compression……...…..34

1.4.5 Influence de la taille et du conditionnement des granulats dans le béton drainant…...35

1.4.6 Influence du volume de pâte cimentaire (CPV) ……..…...…37

1.4.7 Effet de la porosité effective …….....38

1.5. Applications du béton drainant…….....…39

1.6. Mise en place……..….....41

1.6.1 Préparation du sol…… ……..… .41

1.6.2 Pose des joints de dilatation …… ……..….…….42

1.6.3 Etalage du béton drainant …… ……...….42

1.6.4 Fin du chantier …… ……..43

1.7. Histoire des revêtements perméables……..….....44

1.8. Avantages et les inconvénients du béton drainant……..….....44

Chapitre II. Matériaux et méthodes expérimentales

2.1. INTRODUCTION……...…….. ...…47

2.2. Matériaux utilisés …….....47

2.2.1 Ciment……...…47

2.2.2 Super plastifiants……..…..48

2.2.3 Gravier……...….50

2.2.4 Sable……...…50

2.3. ESSAIS……...……52

2.3.1 Essai de caractérisation des matériaux…….…...……52

2.3.1.1 les différents essais de caractérisation du graviers et sable……..…...52

2.3.1.1.1 Analyse granulométrique par tamisage…….……..52

2.3.1.1.2 Masses volumique…….……...……53

2.3.1.1.3 Masse volumique pilonné……...…..…54

2.3.1.1.4 Absorption d'eau……..……55

2.3.1.1.5 Coefficient de Los Angeles …….……...56

2.3.1.1.6 Démoulage et conservation des éprouvettes …….…..…57

2.3.2 Essais à l'état frais.……58

2.3.2.1 Essai au cône d'Abrams……..……..58

2.3.2.2 Densité à l'état frais……...……60

2.3.3 Essai sure le béton à l'état durci……..…..…...….61

2.3.3.1 Densité à l'état durci…….....…...…..61

2.3.3.2 Essai de porosité …….. …62

2.3.3.3 Essai de perméabilité ……...…..…63

2.3.3.4 Essai de la résistance à la compression.……....…64

2.3.3.5 Essai de traction……...….65

2.3.3.6 Essai d'auscultation dynamique ……...……66

2.3.3.7 Essais de la conductivité thermique.…….…….....67

2.3.3.8 Essai d'abrasion……..…….……...68

2.4. Confection des bétons étudiés…….…….…….69

2.5. Formulation du béton drainant…….……..70

Chapitre III : Résultats et discussions

3.1. Introduction……75

3.2. Béton drainant associe a changement de type de sable……...…….75

3.2.1 Affaissement au cône d'Abram……..…..…….……..76

3.2.2 Densité a l'état frais et durci…….……78

3.2.3 Les résistances à la compression……..…....79

3.2.4 La résistance à la traction……...……..80

3.2.5 Porosité connectée……...….81

3.2.6 perméabilité hydraulique……..……82

3.2.7 Conductivité thermiques……..…...….83

3.2.8 Auscultation dynamique……...…....84

3.2.9 Résistance à l'abrasion…….…..……85

3.2.10 Relation entre la porosité connectée et la résistance……..…..……..…..86

3.2.11 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique…….….87

3.2.12 Relation entre la densité et la résistance…….….88

3.2.13 Relation entre la densité et la conductivité thermique…….……89

3.2.14 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique……..…....90

Conclusions générales et Recommandations …….……

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Classement de la consistance d'un béton……..……13

Tableau 1.2 Porosité des granulats fins et gros ……..…..15

Tableau 2.1 : Caractéristiques du ciment utilisé……..….48

Tableau 2.2 Caractéristiques du TEMPO-10……..…….….49

Tableau 2.3 Masse volumique absolue et apparente des granulats…….…….. ..54

Tableau 2.4 résultats de la masse volumique pilonnée …….…….. ….....55

Tableau 2.5 Résultats de l'essai de l'absorption d'eau…….56

Tableau 2.6 Résultats de l'essai de los Angeles…….……..57

Tableau 2.7 Classes de consistance selon la norme NF EN 206-1…….……..59

Tableau 2.8 Les valeurs effectives de b/b0 selon ACI 522……..….72

Tableau 2.9 Quantités utilisées pour fabriquer du béton drainant par $1m^3$ …….……72

Tableau 3. 1 Résultats des essais réalisés(a) …….…….……..76

Tableau 3. 2 Résultats des essais réalisés(b)……...76

Liste des figures

Figure 1.1 : Echantillon d'un béton drainant……...……...4
Figure 1.2 Procédé de fabrication du ciment ……6
Figure 1.3 Caractéristiques et types de granulats ……..8
Figure 1.4 : Echantillon de sable 0/1 ……...……. .9
Figure 1.5 : échantillon de sable 0/3……..……9
Figure 1.6 : Échantillons de béton perméable avec différentes teneurs en eau :(a) insuffisance d'eau, (b) quantité d'eau appropriée (c) excès d'eau ……..……..10
Figure 1.7 : Le mode d'action de super plastifiant ……..…...11
Figure 1.8 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams ……...…12
Figure 1.9 Masse volumique du béton à 28 jours en fonction de l'énergie de compactage et du Rapport graviers/ciment (G/C) ……14
Figure 1.10 Distinction des différents pores des bétons drainants ……..15
Figure 1.11 Relation entre la perméabilité et la teneur en vide d'air ……..…..16
Figure 1.12 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression du béton sans Fines ……19
Figure 1.13 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression du béton sans fines……..…..19
Figure 1.14 Essai de traction par fendage sur une éprouvette de béton…….....20
Figure 1.15 Essai de traction par flexion ……20
Figure 1.16 Essai par traction directe ……..…..21
Figure 1.17 Évolution de l'usure à l'abrasion en fonction de la teneur en asphalte……22
Figure 1.18 L'essai Cantabro : (a) le tambour Los Angeles ; (b) illustration de L'esse……23
Figure 1.19 Test de vitesse d'impulsion ultrasonore : (a) diagramme formel UPV, (b) test D'échantillon……..…..24
Figure 1.20 : Coefficient de conductivité thermique et la densité ……25
Figure 1.21 Mise en place de l'essai de résistance au gel/dégel ……...27
Figure 1.22 Evolution de la perte de masse des bétons drainants témoins soumis à des cycles De gel/dégel avec de l'eau potable……..… .27
Figure 1.23 Évolution du retrait de séchage en fonction du temps …….....….....29

Figure1.24 Evolution du module élastique statique en fonction Du taux de substitution ne granulats… ……..…….30
Figure 1.25 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C des bétons de graviers nature ……...31
Figure 1.26 Perméabilité en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels ...……32
Figure 1.27 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels …….……...….33
Figure 1.28 Effet de l'énergie de consolidation sur la masse volumique ……..…..34
Figure 1.29 Relation entre la résistance à la compression et la teneur en vides ……..…35
Figure 1.30 comparaison visuelle d'échantillons de béton drainant avec des granulats de Différentes dimensions et combinaisons ……..……36
Figure 1.31 Corrélations entre CPV et a) densité, b) porosité, c) perméabilité, d) résistance à La compression et énergie d'impact ……..…..38
Figure 1.32 Relation entre la taille des granulats et la porosité effective ……...39
Figure 1.33: Autour d'une maison en béton drainant……..40
Figure 1.34: Parking en béton drainant……40
Figure 1.35: stade de tennis en béton drainant…….40
Figure 1.36 Préparation du sol …….……41
Figure 1.37 Pose des joints de dilatation ……42
Figure 1.38 Etalage du béton drainant ……..…43
Figure 1.39 Damage du béton drainant ……..…..43

Figure 2.1 Le ciment utilisé……..….. 47
Figure 2.2 Super plastifiant Sika TEMPO-10……....….49
Figure 2.3 échantillons de graviers 3/8 utilisés…… ……...……...…50
Figure2.4 échantillons de sable fins…….……51
Figure2.5 échantillons de sable moyen……51
Figure2.6 échantillons de sable grossier……..…….51
Figure 2.7 Courbe granulométrique de gravier 3/8 utilisé……...……52
Figure 2.8 Courbes granulométriques des sables utilisés ……53
Figure 2.9 Mesure de la masse volumique absolue……..…54
Figure 2.10 Appareillage utilisé pour déterminer la masse volumique pilonnée……...…..55
Figure 2.11 Essai de l'absorption d'eau……....56

Figure 2.12 Essai de Los Angeles……..….....57
Figure 2.13 Conservation des éprouvettes……...….58
Figure 2.14 : Mode opératoire……..59
Figure 2.15 Essai de cône d'Abram……..….60
Figure 2.16 La densité à l'état frais……..61
Figure 2.17 Densité à l'état durci…….62
Figure 2.18 Essai de porosité……...…63
Figure 2.19 Essai de perméabilité à charge variable……64
Figure 2.20 Essai de résistance à la compression……..65
Figure 2.21 Résistance à la traction par fendage……..66
Figure 2.22 Essai d'auscultation dynamique……...……67
Figure 2.23 Essai de conductivité thermique……...……68
Figure 2.24 Essai d'abrasion ……69
Figure 2.25 Malaxeur à axe vertical…….70
Figure 2.26 Relation entre le volume de pâte et le volume de vide……..71

Figure 3. 1 Affaissement en fonction de type de béton ……..……77
Figure 3.2 Évolutions de la densité en fonction de type de béton ……..78
Figure 3.3 Évolutions de la résistance à la compression en fonction de type de béton ….....79
Figure 3.4 Évolutions de la résistance à la traction en fonction de type de béton ……...80
Figure 3.5 Évolutions de la porosité connectée et Rc 28j en fonction de type de béton ……81
Figure 3.6 Perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de type de béton ……..82
Figure 3.7 Evolution de la conductivité thermique et la porosité en fonction de type de béton ……..……83
Figure 3.8 Auscultation dynamique et Rc28j en fonction de type de béton ……..84
Figure 3.9 la résistance à l'abrasion en fonction de type de béton ……..……85
Figure 3.10 Corrélations entre la porosité connectée et Rc28……86
Figure 3.11 Corrélation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique……...…87
Figure 3.12 Corrélation entre la densité et la résistance à la compression……..88
Figure 3.13 Relation entre la densité et la conductivité thermique……....89
Figure 3.14 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique……90

Liste des symboles

ACI : American Concrète Institute
AD: Auscultation dynamique
ASTM: American Society of Testing Materials
BD : Béton drainant
BDS1 : béton drainant à base de sable grossier
BDS2 : béton drainant à base de sable moyen
BDS3 : béton drainant à base de sable fin
CT : Conductivité thermique
E/C : Rapport Eau/Ciment en masse
E/L : Rapport Eau/Liant en masse
EN : Norme Européenne
G/C : Rapport granulat/ ciment
GN : Granulats naturels
K : Coefficient de perméabilité hydraulique
K : kelven
Kg : Kilogramme
Kg/m^3 : Kilogramme sur mètre cube
KWh : kilowatt heur
L : Litre
m : Mètre
m^3 : Mètre cube
mg : Milligramme
mm : Millimètre
MPa : Méga pascal
NA : Norme Algérienne
NF : Norme française
Rc : Résistance à la compression
S : Seconde
S/C : Rapport super plastifiant /ciment
Sp : Super plastifiant
V p/V vg : Volume de pâte en fonction du volume de vides inter-granulaire
VOU : Vitesse d'onde ultrasonique
Vvg : Volume de vides inter-granulaires
Δt : Rapport de temps
λ : Coefficient de Conductivité thermique
µm : Micromètre
ρ : Porosité effective

Introduction générale

Le béton drainant, un type spécifique de béton doté d'une porosité élevée, est conçu pour absorber efficacement les eaux de pluie et faciliter leur infiltration dans le sol. Sa structure particulière permet à l'eau de s'écouler à travers, réduisant ainsi les risques d'accumulation et contribuant à la prévention des inondations. Ce matériau constitue une solution durable pour la gestion des eaux pluviales, favorisant ainsi le cycle naturel de l'eau.

Lors de la formulation du béton drainant, deux aspects sont primordiaux : la porosité et la résistance mécanique. Il est crucial de contrôler avec précision la taille et la compacité des granulats afin d'assurer des performances optimales en termes de drainage et de solidité. Cette étape de contrôle granulométrique et de compacité des granulats est essentielle pour atteindre les caractéristiques recherchées en matière de drainage et de résistance mécanique du béton drainant.

L'ajout de sable au béton perméable améliore ses performances dans diverses utilisations. De plus, l'ajout de sable est une pratique courante et bénéfique dans le secteur de la construction. L'ajout de sable au béton perméable a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques du mélange, permettant ainsi de restaurer la consistance adéquate à l'application du béton perméable. L'objectif principal de cette étude porte sur la valorisation du béton perméable avec l'ajout de trois types de sable dans le béton perméable à raison de 10 %.

Notre mémoire sera organisée comme suit :

- Le premier chapitre offre une synthèse bibliographique détaillée sur le béton drainant, soulignant son importance et son utilisation dans le domaine de la construction. Nous examinerons ensuite de près les principaux constituants du béton drainant ainsi que leurs caractéristiques distinctives. Nous passerons en revue les propriétés du béton drainant à différentes étapes, en mettant un accent particulier sur ses propriétés hydrauliques, mécaniques et esthétiques. De plus, nous explorerons les diverses applications du béton drainant à l'échelle mondiale, mettant en lumière ses avantages et ses succès.
- Le deuxième chapitre se concentre sur la détermination des propriétés physiques et mécaniques des matériaux utilisés. Nous procéderons ensuite à la formulation du béton drainant étudié, suivi de tests à différentes étapes pour évaluer sa qualité. Ces tests engloberont l'évaluation de la maniabilité, de la résistance à la compression et à la traction, ainsi que la porosité, la perméabilité, l'auscultation dynamique, les propriétés thermiques et la résistance à l'usure.

- Le troisième chapitre se consacre à la présentation des résultats expérimentaux, lesquels seront ensuite soumis à une analyse et à une interprétation approfondie.

Enfin, ce mémoire se clôture par une synthèse générale, mettant en lumière les résultats principaux obtenus, résumant le travail accompli, et proposant des perspectives ainsi que des recommandations potentielles pour de futures recherches.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1 Introduction

Le béton drainant ou béton caverneux est un matériau de construction qui a connu un grand développement lors des dernières décennies à cause de ses propriétés environnementales [1] (Figure 1.1). Il est capable de drainer les eaux de pluie et de ruissèlement et de réduire le bruit de frottement de pneus sur les chaussées.

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

Le BD permet d'évacuer en une minute de 85 à 730 litres d'eau par mètre carré selon la taille des gros granulats et la densité du mélange [2] .

Le béton drainant est un type de béton dont la perméabilité à l'eau est nettement plus élevée que celle d'un béton de poids normal. Il a été principalement développé pour drainer l'eau de la surface du sol, afin de réduire le ruissellement des eaux pluviales et de recharger la nappe phréatique. Les eaux souterraines soient rechargées [3].



Figure 1. 1 Béton drainant

1.2 Les composants du béton drainant :

1.2.1 Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il se forme alors une pâte, faisant prise, puis durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. On peut affirmer que le ciment est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [5].

Ce dernier est obtenu par le broyage du clinker et de sulfate de calcium. Le clinker est issu de la cuisson à haute température (1450°C) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire. À l'issue de cette cuisson, le clinker est broyé avec environ 5% de sulfate de calcium (cf. Figure 1.2). Ce sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Ces différents minéraux sont des sources de chaux CAO, de silice SiO2, d'alumine Al2O3 et de ferrite Fe2O3 [6].

Selon la littérature (Tout sur le béton), les principaux types de ciments sont cités Ci-dessous :

A) Le ciment Portland: CEM I

Il contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de composants secondaire.

b) Le ciment portland composé : CEM II

Il contient au moins 65%de clinker et au plus 35% d'autres composants : laitier de haut fourneau, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

c) Le ciment haut fourneau : CEM III

CEM III/A ou B : contient entre 36% et 80% de laitier et 20% à 64% de clinker.

CEM III/C : contient au moins 81% de laitier et 5% à 19% de clinker.

d) Le ciment pouzzolane : CEM IV/A ou B

Il contient 45% de clinker et 11% à 55% de pouzzolanes.

e) Le ciment composé : CEM V/A ou B

Il contient 20% à 64% de clinker, 18% à 49% de produits laitiers et 18% à 49% de cendres ou pouzzolanes.

En général, le ciment portland satisfaisant les exigences de la norme ASTM C 150 est employé pour la fabrication du béton drainant [7].

La quantité de ciment dépend généralement de la formulation, c'est à dire du volume de granulats utilisé, du rapport E/C et de la porosité effective visée. Des teneurs en ciment généralement utilisés sont de l'ordre de 250 à 400 kg/ m3[8].

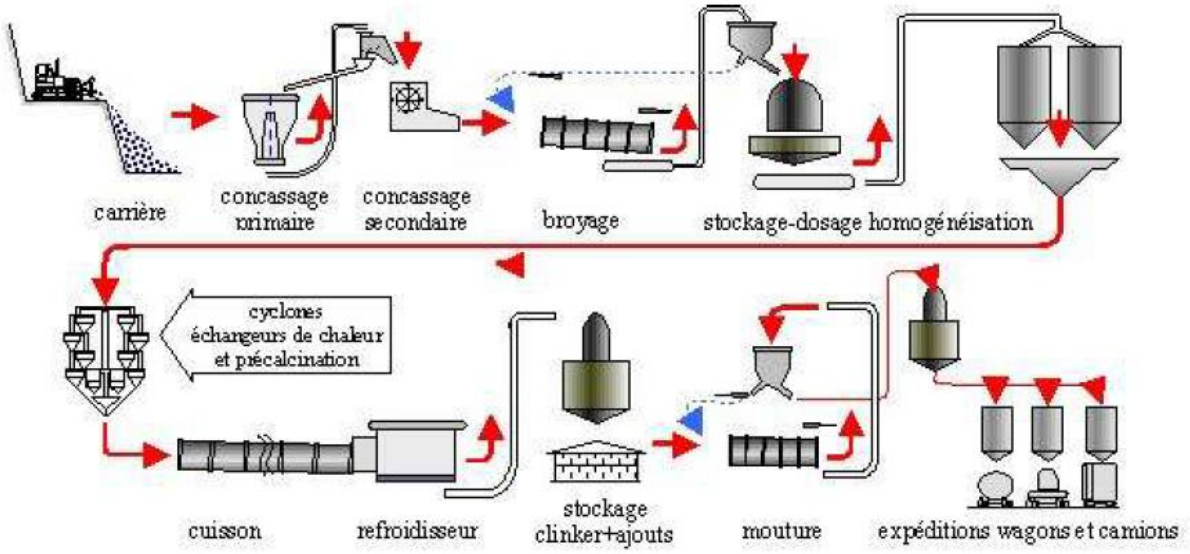


Figure 1.2 Procédé de fabrication du ciment [9]

1.2.2 Granulats

1.2.2.1Définitions :

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XP P 18-540 [10]. Un granulat est constitué d'un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais [11].

1.2.2.2Classifications

On distingue plusieurs types de granulats, en fonction de leurs :

a) Selon l'origine

- Granulats naturels : issus des roches meubles ou massives, et qui ne subissent que des traitements mécaniques.
- Granulats artificiels : provenant de la transformation thermique et mécanique de roches ou de minérales.
- Granulats recyclés : obtenus à partir des démolitions d'ouvrage, ou des granulats réutilisés.

b) Masses Volumiques réelles

Granulats courants : dont la masse volumique réelle est comprise entre 2 et 3t/m3;

Granulats légers : dont la masse volumique réelle est inférieure à 2t/ m3;

Granulats lourds : dont la masse volumique réelle est supérieur à 3t/ m3 [12].

b) Coupures granulométriques

Filler, 0/D avec D < 1mm et 70% passant pour D = 0,063 mm

Sablons, 0/D avec D ≤ 2mn et 70% passant pour D = 0,063mm.

Sables, 0/D avec 1 < D < 6,3 mm

Gravillons, d/D avec d ≥ 1mm et D ≤ 125mm.

c) Classe granulaire

Un granulat est caractérisé par sa classe d/D avec d et D étant respectivement la plus Petite et la plus grande dimension des grains. Ici, la proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant [13].

La norme NFP18 101 indique la terminologie des granulats selon leurs dimensions :

- Fines (fillers) : ≤ 0.08 mm
- Sables : d < 1mm et 0.08 < D < 6.3 mm
- Gravillons : d ≥ 1mm et D < 31.5 mm
- Cailloux : d ≥20 mm et D < 80 mm
- Graves : 6.3 mm < D < 80 mm
- Ballast : 25 mm ≤ D ≤ 50 mm

1.2.2.3 les types des granulats

1.2.2.3.1 Gros granulats

Les gros granulats doivent satisfaire aux exigences de la norme ASTM C 33 [ACI Commitee 211, 2002]. Comme pour le béton conventionnel, les propriétés mécaniques du béton drainant sont influencées par la granulométrie, la texture, le type et la teneur des granulats. Des granulats recyclés ont également été utilisés dans une étude menée à l'Université de Waterloo. Les résultats ont montré que l'utilisation des granulats recyclés à un taux de remplacement allant jusqu'à 15% permet d'obtenir des propriétés mécaniques comparables à celles d'un béton drainant réalisé avec des granulats utilisés pour une première fois [14] .



Figure 1.3 Caractéristiques et types de granulats [15]

1.2.2.3.2 Granulats fin :

Lorsque d'importantes performances mécaniques sont requises, une certaine quantité de sable peut être incorporée dans le béton drainant. Toutefois le sable utilisé doit satisfaire aux exigences de la norme ASTM C 33. Pour atteindre des résistances plus élevées, un volume de sable allant jusqu'à 7% du volume total des granulats grossiers peut améliorer considérablement la résistance mécanique. Cette amélioration peut atteindre jusqu'à 50% d'augmentation de la résistance à la compression sans affecter de façon considérable la conductivité hydraulique par ailleurs, un volume de sable allant jusqu'à 20% a été utilisé pour formuler un béton drainant ayant une résistance à la compression à 28 jours de 50 MPa [14].



Figure 1.4 : Échantillons des sables 0/1



Figure 1.5 : Échantillons des sables 0/3

1.2.3 Eau :

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication du béton drainant. Le rapport E/C généralement utilisé dans la formulation du béton drainant est compris dans l'intervalle entre 0,26 à 0,50.

La quantité d'eau est un facteur critique pour l'obtention d'un béton drainant de qualité acceptable. Une grande quantité d'eau conduirait à une pâte de ciment très liquide. Ceci se

traduit par une grande mobilité de la pâte de ciment, ce qui causera l'obstruction des vides. Par contre, une faible quantité d'eau aboutira à un matériau difficilement maniable et à de faible développement des résistances mécaniques. [16]

La quantité d'eau adéquate correspond à une consistance du BD de façon à former une boule cohésive (stable) après l'avoir pressée à l'aide des deux mains et les résidus solides restant collés sur la main couvrent approximativement 50% de celle-ci (cf. Figure 1.6).



Figure 1. 6 Échantillons de béton perméable avec différentes teneurs en eau: (a) insuffisance d'eau, (b) quantité d'eau appropriée (c) excès d'eau [17]

1.2.4 Adjuvants

Les adjuvants utilisés doivent satisfaire aux exigences de la norme ASTM C 494 [18]. Lorsque de faibles rapports E/C sont utilisés (< 0,30), il est nécessaire d'employer un agent réducteur d'eau ou un super plastifiant pour avoir une meilleure maniabilité et des caractéristiques mécaniques améliorées (cf. Figure 1.7). D'autres adjuvants sont également utilisés, notamment les retardateurs de prise, les agents de viscosité et les agents entraîneurs d'airs [19].

Les adjuvants améliorant la viscosité sont souvent utilisés pour faciliter la mise en place du BD [Hein et Schindler, 2005]. En effet, dans les cas où les mélanges ont des grands affaissements et qu'on désire obtenir une consistance appropriée afin d'éviter la séparation entre les granulats et la pâte de ciment, l'utilisation d'un agent colloïdale s'avère une solution adéquate.

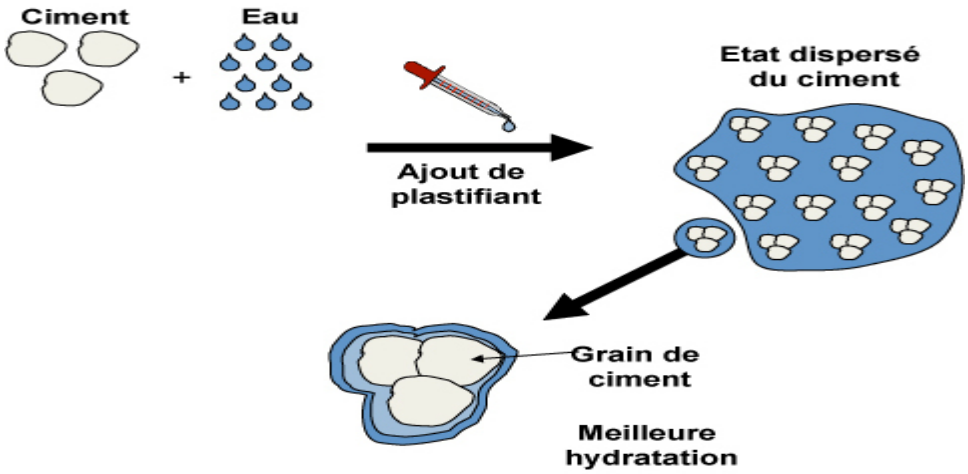


Figure 1. 7 Le mode d'action de superplastifiant [20]

1.3Propriétés du béton drainant

1.3.1 Propriétés à l'état frais

1.3.1.1 Ouvrabilité du béton frais

Ceci est une propriété essentielle du béton frais, car elle lui permet de remplir tout volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. La maniabilité caractérise la capacité du béton à remplir le coffrage et à recouvrir correctement les armatures.

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, le dosage en eau. Les essais les plus utilisés pour évaluer la consistance sont l'affaissement aux cônes d'Abram et l'étalement à la table de secousse [21].

Logiquement, faute de porosité suffisante, la consistance du béton à base de ce granulat fins (dépendant du type du sable), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui de béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont constaté que l'ouvrabilité est similaire à celle-là de béton avec des granulats naturels [22]

1.3.1. 2Affaissement au cône d'Abram

Cet essai vise à évaluer la baisse de hauteur d'un volume conique de béton frais. Il implique le moulage manuel d'un cône de dimensions standardisées et la mesure, après démoulage, de sa baisse sous l'effet de sa propre masse. Plus cette baisse est importante, plus le béton est fluide. L'ensemble comprend quatre éléments

- Un moule tronconique avec 20 cm de diamètre à la base, 10 cm de diamètre en partie haute et 30 cm de hauteur.
- Une plaque d'embase utilisée comme support.
- Une tige de 16 mm de diamètre et de 60 cm de longueur.
- Un portique de mesure [23].

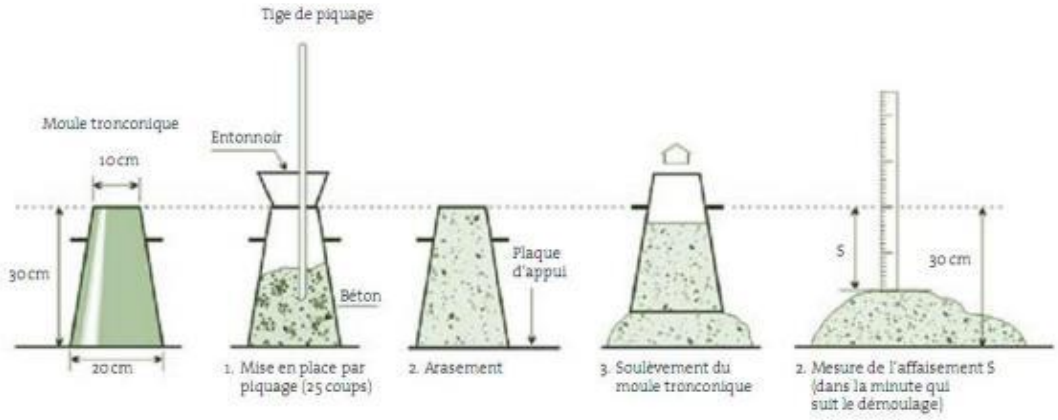


Figure 1.8 Essai d'affaissement au cône d'Abram [24]

Le remplissage du moule s'effectue en quatre couches piquées avec la tige à raison de 25 coups par couche. Le moule est ensuite soulevé verticalement sans secousses et on mesure l'affaissement. Le tableau ci-dessous indique le classement approximatif de la consistance d'un béton [25].

La nature et la granularité du sable ont un impact significatif sur l'ouvrabilité du béton frais. Un dosage optimal de sable naturel et de sable concassé permet d'améliorer à la fois la maniabilité et les performances mécaniques du béton. Mais un excès de fines, notamment avec le sable de concassage, peut dégrader l'ouvrabilité. [26]

Logiquement, faute de porosité suffisante, la consistance du béton à base de ce granulat fine (dépendant du type du sable), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui de béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont constaté que l'ouvrabilité est similaire à celle-

là de béton avec des granulats naturels par contre, l'introduction de granulats fins réduit considérablement l'ouvrabilité [27].

La granulométrie du sable affectera également le besoin en sable, plus de sable est riche en éléments grossiers, meilleur est la maniabilité [28] .

.

Tableau 1.1 Classement de la consistance d'un béton [29]

Consistance du béton	Affaissement en cm	Tolérance
Ferme	1 – 4	± 1
Plastique	5 – 9	± 2
Très plastique	10 – 15	± 3
Fluide	16 – 21	± 3
Très fluide	≥ 22	± 3

1.3.2 Propriétés à l'état durci

1.3.2.1 Densité

La densité va dépendre de plusieurs facteurs : les caractéristiques des granulats (teneur en vide et la granulométrie), la teneur en liant, le rapport eau/liants et la méthode de compaction. La densité va grandement dépendre de l'énergie de compaction lors de la mise en place [30]. Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, ce qui revête que la qualité de ces derniers est d'une grande importance sur la résistance à la compression du béton. Celle-ci ne peut excéder de manière significative celle de la plupart des granulats et cela dépend d'une part, de la nature de la roche mère qui a été concassée ou usée à la dimension actuelle [31], [32] et d'autre part, du processus de concassage adopté [33].

Les facteurs affectant la masse volumique de béton drainant sont la masse volumique de graviers utilisés, le dosage des constituants (surtout la quantité de ciment) et la méthode de mise en œuvre. Selon Ghafoori et Dutta (1995), la masse volumique augmente d'une part lorsque l'énergie de compactage augmente et d'autre part lorsque la quantité de graviers dans le mélange diminue (Figure 1.9**)** [34].

L'effet du sable sur la densité du béton perméable est important et peut avoir un impact sur diverses propriétés du béton. La densité du béton perméable est influencée par des facteurs

tels que la proportion de granulats, le rapport eau/ciment (E/C) et la quantité de ciment utilisée. L'ajout de sable au béton perméable peut affecter sa densité en modifiant la teneur en vides et la porosité du mélange. Généralement, la densité du sable se situe entre 17 et 25 KN/m^3, et l'ajout de sable peut avoir un impact sur la densité globale du mélange de béton. La teneur en sable joue un rôle dans la détermination de la densité du béton perméable, ce qui affecte à son tour ses propriétés telles que la perméabilité, la résistance et la porosité. L'ajustement de la teneur en sable dans la conception du mélange peut aider à atteindre l'équilibre souhaité entre la densité et d'autres propriétés clés du béton perméable [35].

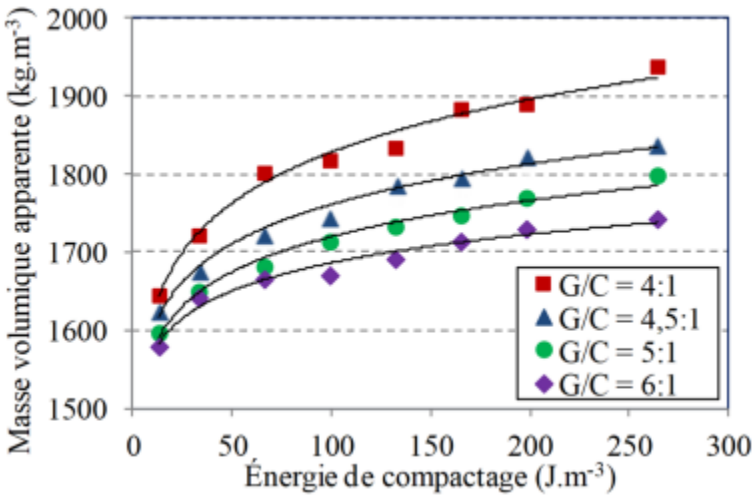


Figure 1.9 Masse volumique du béton à 28 jours en fonction de l'énergie de Compactage et du rapport graviers/ciment (G/C) [36]

1.3.2.2 Porosité

La porosité d'un matériau caractérise le volume des vides qu'il contient. Elle est définie par le rapport entre le volume des pores et le volume total. Dans le cas des bétons drainants, on distingue généralement deux types de porosités en fonction du niveau de connectivité des pores (Figure 1.10) [37]. La porosité ouverte ou continue ou effective Po d'un béton drainant est le rapport entre le volume d'eau gravitaire que la matrice poreuse du béton peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet, et son volume total. Les pores qui participent au transport de l'eau à travers le matériau sont souvent appelés « pores effectifs » ou « pores interconnectés ». On considère comme appartenant également à cette famille, les pores aveugles (ou bras morts) qui sont connectés uniquement par une voie (Figure 1.10) [38].

L'ajout de sable au béton perméable peut avoir un impact important sur sa porosité. Les résultats des recherches suggèrent que l'incorporation de petites quantités de sable, environ 10 % du poids total des granulats, dans les mélanges de béton perméables peut conduire à de meilleures propriétés. L'ajout de sable fin peut améliorer les propriétés mécaniques et de durabilité du béton perméable. De plus, l'absence de granulats fins dans le béton perméable peut contribuer à son indice de vide et à sa perméabilité. Cependant, l'incorporation d'une petite quantité de granulats fins, comme du sable, tend à améliorer la durabilité et la résistance du béton perméable. La porosité du béton perméable joue un rôle crucial dans ses propriétés, notamment pour faciliter la permutation de l'eau. Dans l'ensemble, l'ajout de sable fin peut avoir un impact sur la porosité du béton perméable, influençant sa perméabilité, sa résistance et sa durabilité. [39.40]

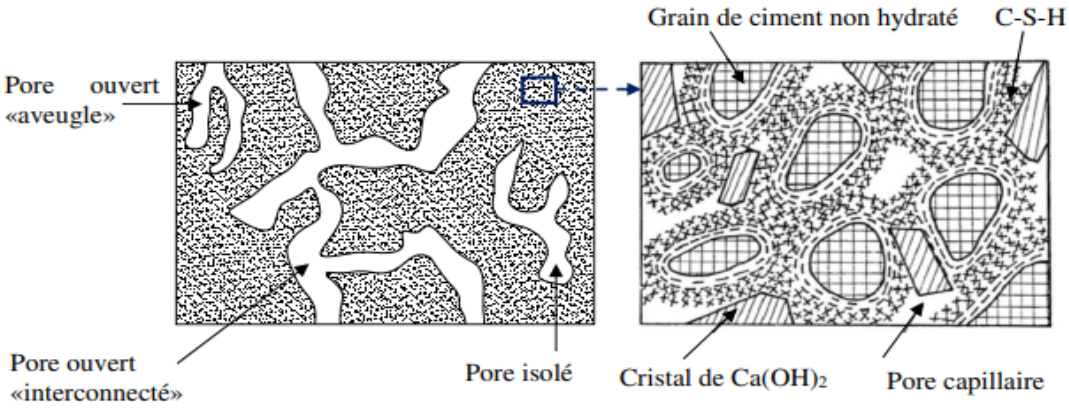


Figure 1.10 Distinction des différents pores des bétons drainants [37]

La forte proportion de particules de mortier liées aux granulats conduit à de faibles teneurs en eau et donc à une faible porosité. Selon Kazuyuki et autres [41], la porosité des granulats issus d'une même source des granulats naturels mais de structures différentes était la suivante :

Tableau 1.2 Porosité des granulats fins et gros [41]

	Granulats Fins			**Gros Granulats**		
	Sable naturel	**Chaussé**	**Structure**	**Gravier naturel**	**Chaussé**	**Structure**
Porosité (%)	1,3	7,8	10,9	0,8	5,4	5,9

1.3.2.3 Perméabilité

La perméabilité est la capacité d'un matériau à laisser passer un fluide sans affecter sa structure interne. À laisser passer un fluide à travers lui sans affecter sa structure interne. La vitesse à laquelle le La vitesse à laquelle le fluide traverse le matériau dépend essentiellement de trois facteurs : la porosité du matériau, la densité du type de fluide qui est affectée par sa température et la pression à laquelle le fluide est soumis. Est soumis. Le fait qu'un matériau soit perméable indique que sa structure est poreuse ou contient un pourcentage de vides interconnectés qui permettent l'absorption d'autres éléments [42].

L'une des caractéristiques les plus significatives du béton drainant est sa capacité à filtrer l'eau à travers sa structure

Selon la norme ACI 522R (2010), la capacité de filtration est comprise entre 2 et 18 gal/min/pi2 (81 à 730 L/min/) ou de 192 à 1724 in/hr (192 à 1724 in/hr) (0,14 à 1,22 cm/s) en fonction du pourcentage de vides présents. Pour faciliter l'écoulement de l'eau, il est recommandé d'assurer au moins 15 % de la teneur en vides. (Meiningen, cité par Flores & Pacompia 2015 et López, 2010). Étant donné que la capacité de filtration la capacité de filtration augmente avec la teneur en vides d'air, la résistance à la compression est réduite.

Par conséquent, la résistance à la compression est réduite, de sorte que le dosage du mélange doit satisfaire un équilibre entre la résistance à la compression et la résistance à l'abrasion. Le dosage du mélange doit satisfaire un équilibre entre une capacité de filtration acceptable et la résistance à la compression [43].

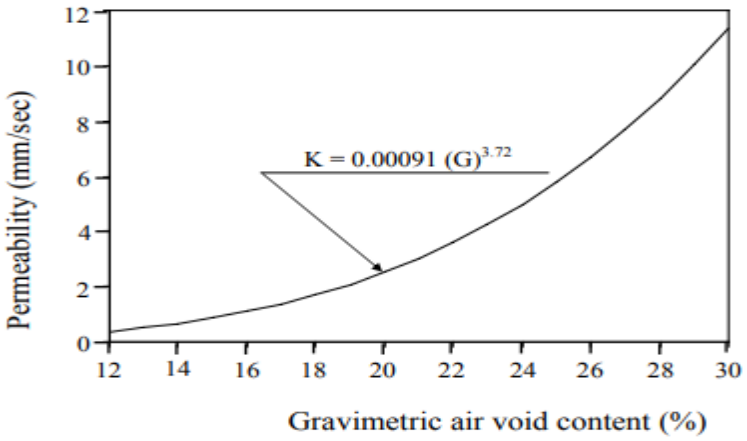


Figure 1.11 Relation entre la perméabilité et la teneur en vide d'air [43]

Des recherches ont montré que la porosité et la perméabilité du béton perméable diminuent avec l'augmentation de la teneur en sable. [44]

Un bloc de béton perméable typique permettra à l'eau de passer à travers des débits supérieurs à 0,2 cm/s, tandis qu'un sable extra fin typique aura une perméabilité d'environ 0,02 cm/s. Lorsque le béton perméable est entièrement recouvert de sable, la perméabilité effective du système peut être réduite à environ 0,004 cm/s, ce qui est similaire à la perméabilité d'une tempête de 30 minutes et de fréquence 100 ans dans le sud-est des États-Unis[45]

1.3.2.4 Résistance à la compression du béton drainant

La résistance à la compression du BD est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importantes sont le volume de granulat, la porosité effective et la quantité et la qualité de pâte. Elle démontre la capacité d'un béton à résister aux sollicitations mécaniques et dans certains cas sa durabilité. La résistance à la compression du BD peut varier de 3 à 20 MPa. Ces faibles valeurs de résistance par rapport au béton ordinaire font que son utilisation est limitée pour les applications ne requérant pas de grandes sollicitations comme les chaussées à faible trafic et les aires de stationnement [46].

La résistance à la compression dépend aussi du compactage obtenu au moyen des équipements utilisés pour la mise en place. Cette dernière augmente avec le compactage, mais un meilleur compactage diminue aussi la teneur en air. L'ajout d'une petite quantité de sable augmente la résistance à la flexion. Les résistances à la compression et à la flexion sont étroitement reliées à la teneur en vides [47], [48].

L'augmentation de la fraction de sable de 0 % à 20 % en poids des granulats grossiers améliore les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression, à la flexion et à la traction du béton perméable. Cela est dû à l'augmentation du volume de pâte de ciment recouvrant les surfaces des granulats [49]

En General, le béton addition de sable est moins poreux que le béton téin et ses pores sont moins nombreux. Cette répartition particulière des pores contribue à leur bonne tenue aux tests de durabilité [50.51]

a) Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression

Ghafoori et Dutta [52] ont montré que la relation entre l'énergie de compactage et la résistance à la compression pour un béton sans fines ayant différents rapport granulats/ciment (G/S), comme le montre la figure 1.12. Ils ont indiqué qu'une énergie de compactage accrue peut conduire à améliorer la résistance à la compression.

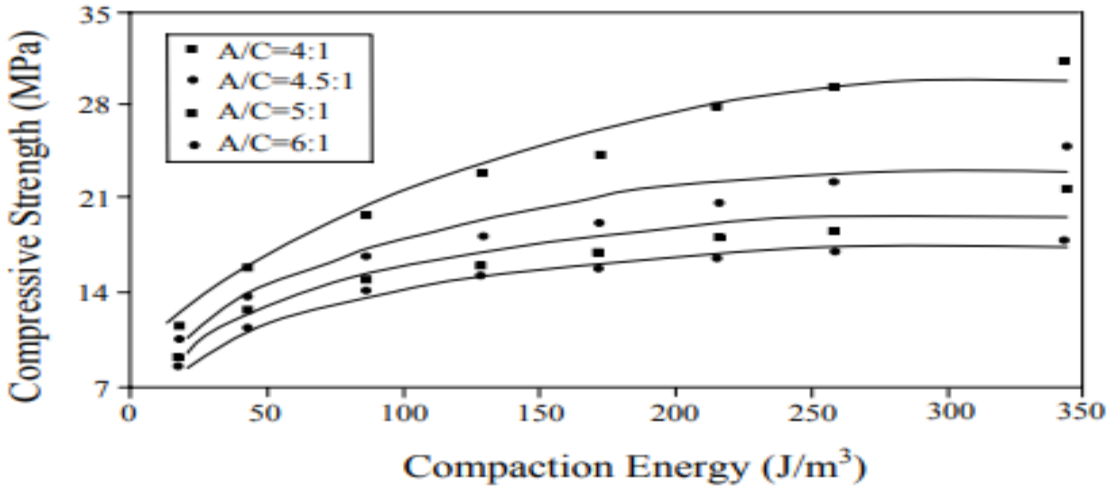


Figure 1.12 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression Du béton sans fines [52]

b) Effet du rapport granulats/ciment sur la résistance à la compression

La figure 1.13 montre la relation entre la résistance à la compression et le rapport granulats/ciment [53,54]. Lorsque le rapport granulats/ciment est augmenté, la résistance à la compression du béton drainant est diminuée. En outre, l'augmentation de la teneur en matériaux cimentaires peut entraîner une augmentation de la résistance à la compression du béton drainant.

La résistance à la compression des bétons poreux utilisant des granulats naturels et un pourcentage supplémentaire de granulats fins apparait est illustrée dans la figure 1.13. Une augmentation de la résistance est observée pour le béton poreux utilisant des granulats fins par rapport au béton poreux contenant des granulats naturels.

Cela peut être dû à une liaison plus élevée entre les granulats et la pâte de ciment lors de l'utilisation des granulats fins et en partie à une diminution du taux de vide. Généralement, on s'attend à ce que la résistance à la compression du béton poreux soit liée à la résistance des granulats et au taux de vide total [55].

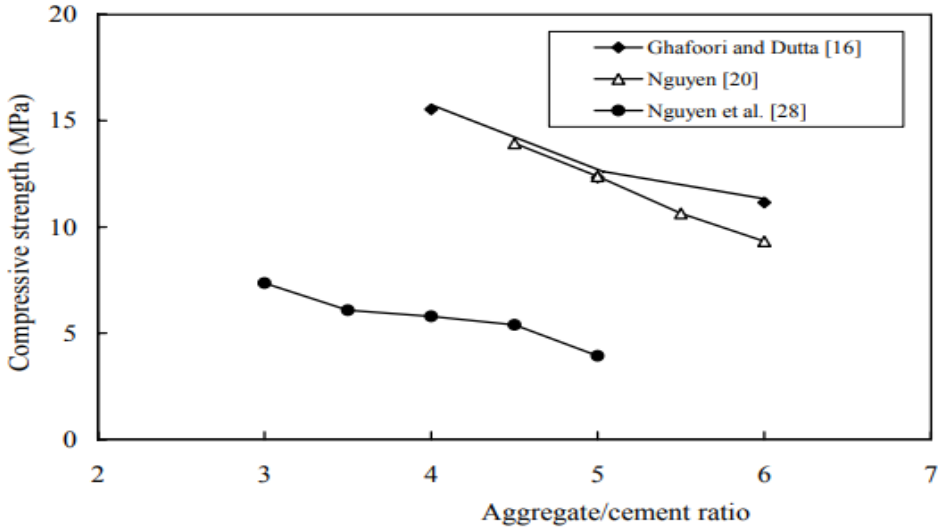


Figure 1.13 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression Du béton sans fines [53]

1.3.2.5 La résistance à la traction

« La résistance à la traction est faible par rapport à la résistance à la compression, environ égale à 1/10 de la résistance à la compression.

. Il existe 3 types de résistances à la traction qui sont :

- La résistance à la traction par fendage.
- La résistance à la traction par flexion.
- La résistance à la traction directe

a) La résistance à la traction par fendage

Appelé aussi « essai brésilien », Ce l'essai est utilisé sur les matériaux fragiles pour caractériser la limite de rupture en traction. Il consiste à comprimer un disque en deux points opposés, cet effort induit un effort en traction perpendiculairement au chargement (cf. Figure 1.14). Le

matériau étant fragile, la rupture se fait en traction. Pour cela on utilise des éprouvettes cylindriques, il est à noter qu'élancement (rapport entre la hauteur et le diamètre) peut descendre jusqu'à une valeur de 1.

Afin d'avoir un contact de bonne qualité entre l'éprouvette et les plateaux [56]. La norme NF EN 12390-6 [57] décrit cet essai.

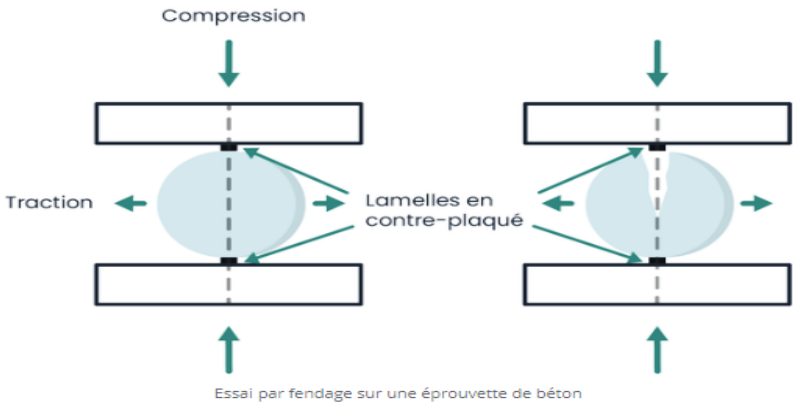


Figure 1.14 Essai par fendage sur une éprouvette de béton [58]

b) La résistance à la traction par flexion

On utilise le plus souvent ce type d'essais. Ils s'effectuent en générale sur des éprouvettes prismatiques d'élancement 4, reposant sur deux appuis :

Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre),

Soit sous deux charges concentrées, systématiques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges) [59].

Généralement les éprouvettes ont les diamètres suivants : 7 x 7x 28cm et 10x10 x 40cm.

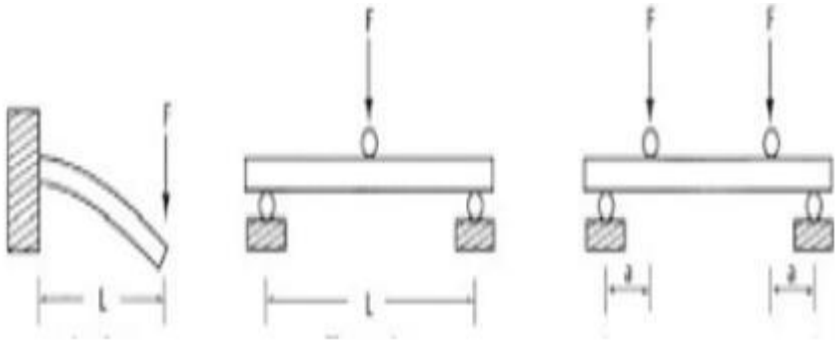


Figure 1.15 Essai de traction par flexion [59]

c)Essais de traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite :

Le sciage des extrémités, puis le collage de têtes de traction parfaitement centrées,

L'absence d'aucun effort de flexion [60].

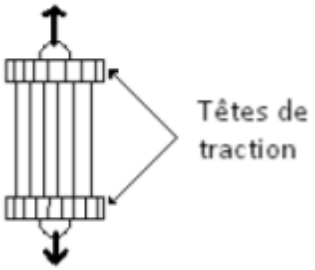


Figure 1.16 Essai par traction directe [61]

1.3.2.6 Résistance à l'abrasion

Si les granulats ne sont pas recouverts d'une couche de pâte résistante et suffisamment dense et épaisse, il y aurait un risque d'avoir des problèmes d'arrachement des granulats qui peut nuire à la durabilité du matériau. Un béton drainant fonctionnel est recouvert d'une mince couche de pâte de ciment et cela lui permet d'avoir une porosité effective pour assurer de façon efficace ses fonctions.

Les principales causes de l'arrachement des granulats seraient la mince couche de pâte qui n'assure pas un bon lien entre les granulats. D'autre part, un problème de cure pourrait nuire aux développements convenables des propriétés mécaniques. Ce phénomène est d'autant plus accentué en hiver lorsque les déneigeuses sont utilisées.

Les résultats d'un projet de parking réalisé dans le cadre d'une étude comparative par une équipe de recherche à l'université de l'Alabama (États-Unis) ont montré un bon fonctionnement de la dalle en béton drainant malgré l'arrachement de quelques granulats de surfaces [62].

Trois méthodes d'essai d'abrasion en laboratoire ont été étudiées par Dong et al [63] pour leur capacité à évaluer la résistance à l'abrasion. Les trois essais sont l'essai « Cantabro » défini par la norme espagnole NLT-352/86 [64] et basées sur la norme ASTM C 131 [65], l'essai d'abrasion de roue chargée et l'essai d'abrasion de surface. Pour évaluer les trois méthodes d'essai, huit mélanges contenant différentes tailles de gros granulats et différentes additions ont été réalisés. La comparaison des trois tests d'abrasion indique que les trois tests ont été assez efficaces pour évaluer la résistance à l'abrasion des bétons étudiés.

L'essai Cantabro consiste à évaluer la perte de masse des éprouvettes après 300 tours dans le tambour Los Angeles sans boulets. L'essai est réalisé à 18 °C. La perte de masse est exprimée en pour cent par rapport à la masse d'origine de l'éprouvette. Cet essai est décrit dans la norme NBN EN 12697-17 [66].

Tennis et coll. [67] ont suggéré que l'abrasion et l'effilochage pourraient être des problèmes pour le béton perméable, en raison de sa surface rugueuse. Ils ont également souligné que le béton drainant a des limites à son utilisation, en raison de sa faible résistance à l'abrasion. Ghafoori et Dutta [68] ont rapporté que la résistance à l'abrasion du béton perméable est influencée par l'énergie de compactage et le rapport agrégat/ciment. La faible énergie de compactage et le rapport granulat/ciment élevé ont conduit à une faible résistance à l'abrasion.

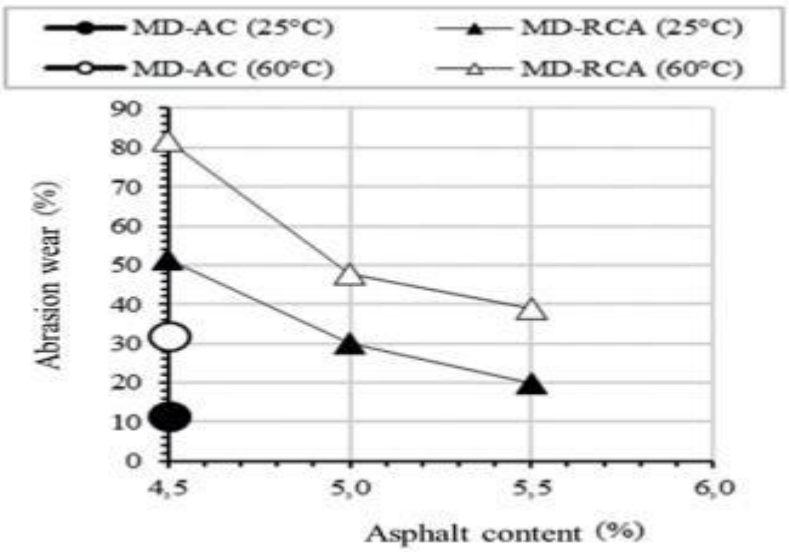


Figure 1.17 Évolution de l'usure à l'abrasion en fonction de la teneur en asphalte [69]

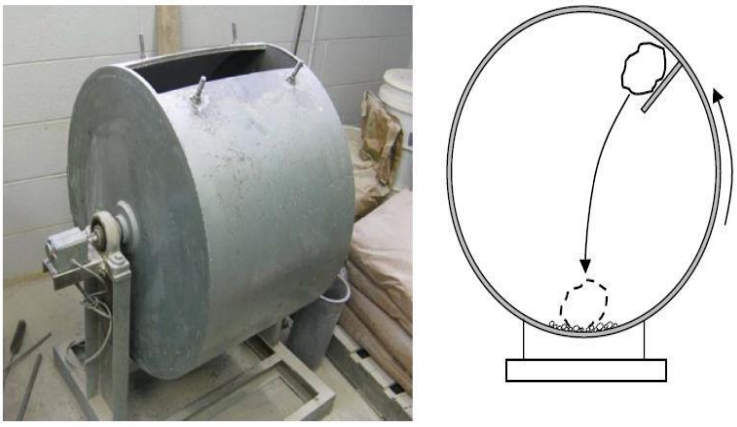


Figure 1. 18 L'essai Cantabro: (a) le tambour Los Angeles ; (b) illustration de L'essai [69]

1.3.2.7Auscultation dynamique

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de fréquence supérieure à la fréquence de coupure de l'oreille humaine (environ 15 kHz). La vitesse de propagation d'une onde devient plus élevée lorsque le temps de transmission de l'information d'une particule élémentaire constituant la matière à sa voisine est plus facile. Elle dépend du niveau de cohésion de la matière. Ainsi, les vitesses de propagation d'une onde dans l'air. [70]

Le BD peut être utilisée pour atténuer l'intensité acoustique des bruits causés par le frottement des pneus sur la chaussée et les moteurs de véhicules par réflexion sur la surface du

pavage. Donc l'utilisation d'un matériau poreux comme le BD limiterait la propagation de bruit et dissiperait l'énergie acoustique [71].

L'utilisation d'un matériau dissipant une partie de l'énergie sonore s'avère une bonne solution pour réduire la pollution sonore, celle-ci est plus importante dans les milieux urbains [72]. Des travaux réalisés par Marolf et al [73] ont rapporté que les bétons fabriqués avec des granulats de petite taille absorbent mieux l'énergie acoustique que ceux fabriqués avec de granulats de grande taille. Les meilleurs résultats ont été obtenus en combinant les granulats de taille maximale de 9,5 mm et 4,75 mm . Par ailleurs, il est reporté que l'ajout de la fumée de silice n'affecte pas l'absorption acoustique du BD, alors que l'ajout du sable altère les propriétés drainantes et acoustiques. Pour un même type de granulat, l'absorption acoustique du BD est fonction de la fréquence de l'onde et de l'épaisseur du matériau utilisé [74] .

Martins Filho et al [75] visent à étudier les propriétés du BD en se basant sur l'essai ultrasonique. Pour cela, trois mélanges ont été réalisés avec un rapport pâte/granulat variant de 0,45 à 0,65 et un rapport E/C de 0,3. La caractérisation du BD à l'aide de l'essai ultrasonique mérite une attention particulière e à cause de manque des recherches et des modèles analytiques qui permet de prédire les propriétés ultrasoniques en tant que variable indépendante (cf. Figure 1.19). Les résultats montrent que la forte porosité du béton perméable provoque une atténuation de l'onde ultrasonore.

La vitesse des ondes ultrasoniques est plus élevée pour les mélanges avec des densités plus élevées (R^2 = 0,87), des résistances à et à la traction plus élevées (R^2 de 0,79 et 0,84, respectivement) et une perméabilité plus.



Figure 1.19 Test de vitesse d'impulsion ultrasonore

1.3.2.8 Conductivité thermique

Le béton drainant est un béton sans granulats fins. Le vide connecté permet à l'eau et à l'air de passer à travers. Il peut être utilisé dans des applications environnementales telles que le béton perméable pour les chaussées, le béton purificateur d'eau, le béton absorbant le bruit, le béton perméable à l'air et d'autres techniques civiles et architecturales. Béton perméable à l'air, et d'autres applications de génie civil et d'architecture génie civil et d'architecture [76]. En outre, le béton drainant contient une grande de vides et, par conséquent, sa densité et sa conductivité thermique sont inférieures à celles du béton conventionnel [77].

Pour les bétons courants, la conductivité thermique diminue lorsque la température augmente. Cette baisse de conductivité est montrée à travers les travaux de [78], et suivant le type de béton et la nature des granulats [79].

L'effet du sable sur la conductivité thermique du béton caverneux peut varier en fonction de la composition spécifique et des caractéristiques du mélange de béton. Il a été constaté que l'ajout de sable diminue la chaleur spécifique et augmente la conductivité thermique de la pâte de ciment, comme l'ont observé des études analysant l'impact de l'ajout de sable sur les propriétés thermiques. La présence de sable peut influencer le comportement thermique des matériaux à base de ciment, affectant des facteurs tels que la chaleur spécifique et la conductivité thermique. Cependant, l'effet exact du sable sur la conductivité thermique dans le béton caverneux dépendrait spécifiquement de la proportion de sable, de la composition

globale du mélange de béton et de la présence d'autres additifs ou matériaux dans le mélange [80]

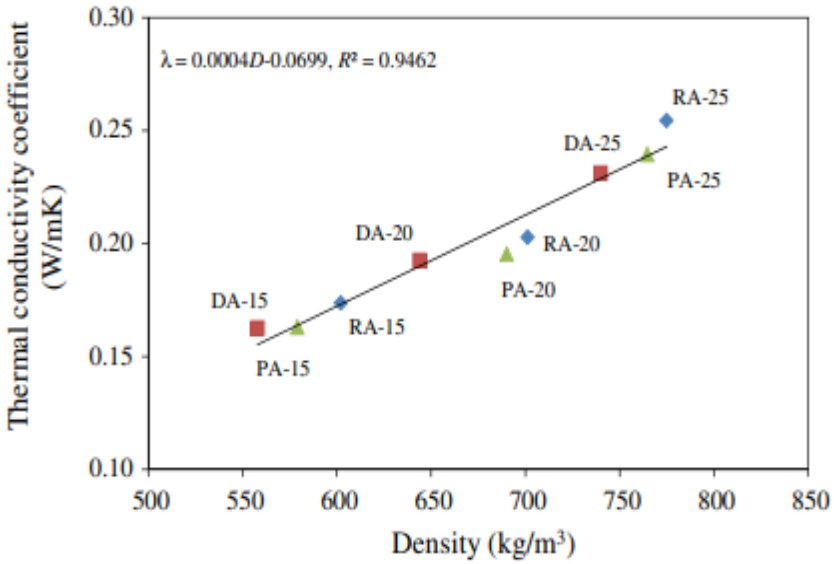


Figure 1.20 Coefficient de conductivité thermique et la densité [81]

1. 3.2.9 Résistance au cycle du gel/dégel

Le béton drainant présente historiquement une très bonne durabilité (durée de vie supérieure à une dizaine d'années généralement). Pour avoir un bon comportement de notre béton vis-à-vis du cycle gel/dégel il faut s'assurer d'avoir :

- Une bonne perméabilité du béton (formulation).
- Une fondation drainante de matériau granulaire suffisamment épaisse pour servir de réservoir à l'eau drainée et l'empêcher de se saturer lorsqu'il gèle.
- Une mise en place adéquate.
- La présence des drains perforés au besoin pour compenser une perte de perméabilité en hiver ou d'un sol peu perméable [82].

Des études récentes montrent qu'un béton drainant peut résister jusqu'à 100 et 300 cycles de gel-dégel réalisés selon la norme ASTM C 666 [83]. En considérant l'essai ASTM C 666, le béton drainant affiche une faible durabilité face aux cycles de gel dégel. Certains auteurs attribuent cela au fait que ces essais de durabilité ne seraient pas adaptés pour le béton drainant [84].

Les cycles de mouillage et séchage seraient le facteur le plus affectant ces bétons à cause de leur structure poreuse ouverte [84]. La combinaison des cycles de gel-dégel à celles de mouillage séchage serait la cause principale de la faible durabilité. Des travaux menés par Kevem et al. Ont montré que l'air entrainé améliore la durabilité des bétons drainants face aux cycles de gel-dégel. Zhifu et Yang ont observé que la qualité et la quantité de pâte de ciment, le mode de cure et le nombre de cycles sont des facteurs qui influencent beaucoup la durabilité du béton drainant [85]. Enfin, une étude a rapporté que le béton drainant possède un facteur d'espacement (L) inférieur à 200 pm et que l'entrainement de l'air dans le béton améliore l'ouvrabilité et, par conséquent, la durabilité par le biais d'une meilleure consolidation.



Figure 1.21 Mise en place de l'essai de résistance au gel/dégel [86]

Une teneur en sable relativement élevée dans les bétons est un facteur très préjudiciable à leur résistance aux cycles de gel-dégel, en particulier en présence de sels de déverglaçâtes. Le sable peut favoriser la dégradation du béton soumis à ces conditions. [87]

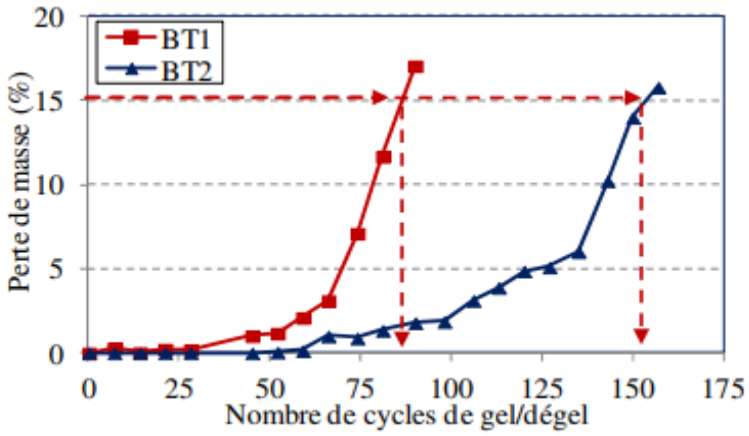


Figure 1.22 Evolution de la perte de masse des bétons drainants témoins soumis à des cycles de gel/dégel avec de l'eau potable [88]

1.3.2.10 Retrait et Gonflement

Le retrait et le gonflement sont deux déformations indissociables du comportement du béton. Ils trouvent leur origine dans la pâte de ciment. Ces déformations doivent donc, en toute circonstance, être prises en compte Cette contraction dimensionnelle est d'autant plus grande que le rapport E/C est plus élevé. Cependant, le retrait de séchage qui peut effectivement se produire est limité par les granulats si ceux-ci sont à des pourcentages élevés. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favoriser par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés [89], par la présence des argiles et fines dans les granulats [90] et à la grandeur du module élastique de ces derniers [91].

Le retrait est plus important dans le cas d'utilisation des granulats légers qui possèdent un module élastique plus faible et qu'ils offrent donc moins d'opposition au retrait potentiel de la pâte de ciment [92] .

. Le retrait du béton est un phénomène de réduction de volume qui se produit lors du durcissement et du séchage du béton. Il est influencé par plusieurs facteurs, notamment la teneur en eau, le rapport eau/ciment, la quantité et la nature des granulats. Une teneur en sable plus pourrait éventuellement augmenter le retrait du béton drainant en raison de la plus grande surface spécifique des particules fines.

Le gonflement du béton peut être causé par des réactions chimiques internes, comme la réaction alcali-granulat, ou par l'absorption d'eau. Les granulats utilisés, y compris le sable,

jouent un rôle important dans ce phénomène. Certains types de sable pourraient être plus réactifs et favoriser le gonflement du béton [93]

Le séchage est très rapide dans le cas du BD, ceci peut être dû aux faibles rapports E/C utilisés pour ce type de béton [94]. Une large surface exposée (due à la forte porosité effective) occasionne une perte rapide de l'eau pendant le malaxage et la cure. Par contre, le BD a un retrait deux fois inférieur à celui du béton conventionnel [95] . Le retrait est fonction de la quantité de pâte utilisée ainsi que du rapport granulat/ciment (G/C) (cf. Figure 1.23).

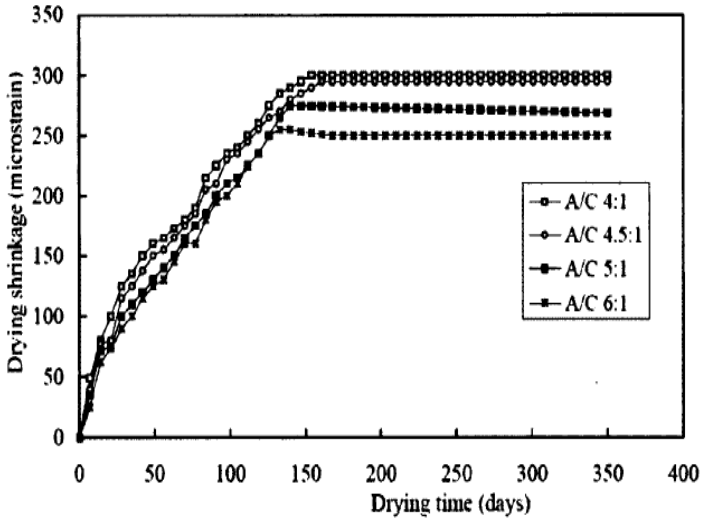


Figure 1. 23 Évolution du retrait de séchage en fonction du temps [96]

1.3.2.11 Module d'élasticité :

La différence de module d'élasticité entre le béton caverneux et le béton traditionnel peut également être due à la nature des granulats utilisés. Les granulats légers ont un module élastique inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle, ce qui influe sur le module d'élasticité du béton

- Le module d'élasticité du béton caverneux à base de sable est généralement inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Le module d'Young d'un béton léger est considéré comme valant la moitié ou les trois quarts de celui d'un béton traditionnel de même résistance**.** [97]

- Le module instantané pour un béton de résistance 50 MPa est d'environ 40 000 MPa. Cependant, cette valeur est donnée pour un béton ordinaire et non spécifiquement pour un béton caverneux à base de sable.
- L'ajout de sable dans le béton peut affecter son module d'élasticité. Plus précisément, le module élastique du sable lui-même influence celui du béton. [98]
- Pour les bétons caverneux, le dosage en ciment est un facteur clé, avec une fourchette recommandée de 150 à 250 kg/m3. Un dosage plus élevé en ciment pourrait éventuellement augmenter le module d'élasticité.

- La norme NF EN 1352 fournit une méthode pour déterminer le module d'élasticité statique en compression du béton cellulaire autoclave et du béton de granulats légers à structure ouverte. Bien que cette norme ne soit pas spécifique au béton caverneux à base de sable, elle donne un cadre pour mesurer le module d'élasticité de ce type de béton.

Cependant, on peut estimer qu'il se situerait dans la fourchette de 30 000 à 40 000 MPa, en fonction du dosage en ciment et de la proportion de sable utilisée. Des études plus spécifiques seraient nécessaires pour déterminer les valeurs typiques du module d'élasticité pour ce type de béton.

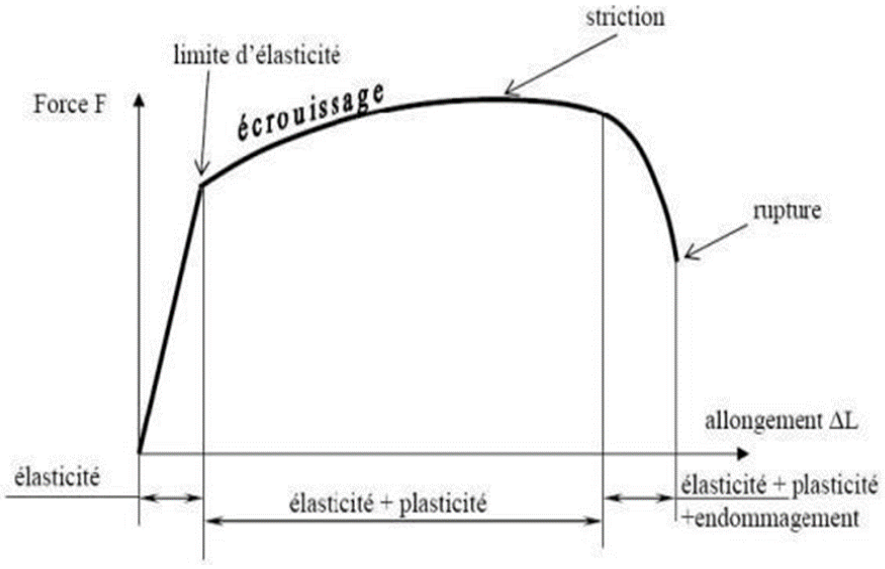


Figure1.24 Évolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution ne granulats [98]

1.4 Facteurs influençant sur les bétons drainants

1.4.1 Influence du rapport E/C

1.4.1.1 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C

La Figure 1.25 présente la variation de la résistance mécanique en fonction du rapport E/C. La résistance en compression des bétons BG2 à BG6 (20,7% de pâte de ciment) varie de 13,4 à 21,5 MPa lorsque le rapport E/C varie de 0,30 à 0,40. Une augmentation de la résistance en compression maximale de 72% est constatée lorsque le rapport E/C passe de 0,30 à 0,37 (BG2 et BG5). Ce résultat est en accord avec les travaux de Zouaghi et al [99] qui observent une variation de la résistance de 73% lorsque le rapport E/C passe de 0,30 à 0,40.

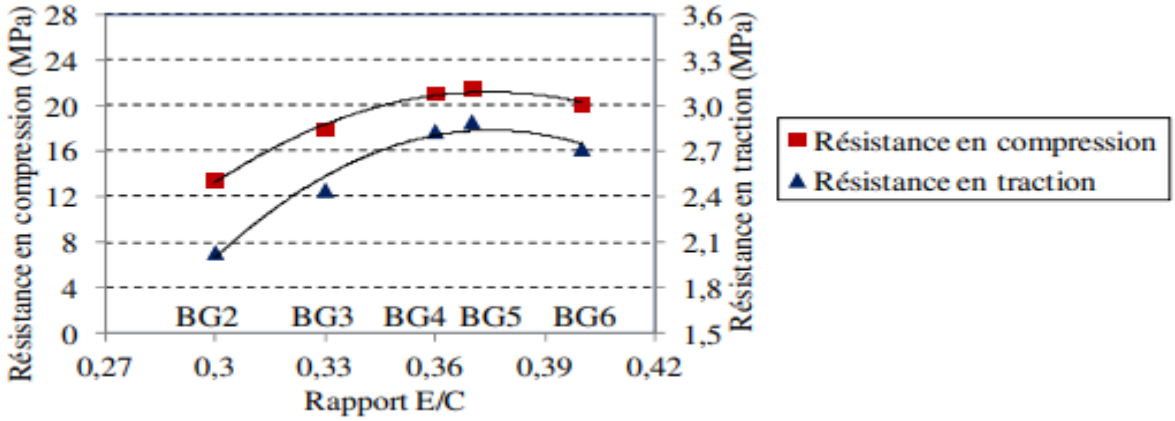


Figure 1.25 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels [99]

De plus, en considérant la variation de la résistance mécanique, il est confirmé qu'un rapport E/C plus bas ne garantit pas nécessairement une résistance plus élevée pour le béton drainant, contrairement au béton ordinaire. Les résistances en compression et en traction atteignent leur pic lorsque le rapport E/C est de 0,37, une valeur qui se situe dans la fourchette recommandée de 0,34 à 0,40 dans le cas où aucun super plastifiant n'est utilisé.

De plus, cette valeur est proche de la valeur de 0,38 qui est considérée comme un point de déflexion de la courbe de relation entre la résistance en compression et le rapport E/C d'une pâte de ciment [100]. Le changement de résistance en compression de la pâte de ciment à ce niveau engendre la déviation des courbes de résistance mécanique du béton.

1.4.1.2 Perméabilité en fonction du rapport E/C

La perméabilité des bétons contenant 20,7% de pâte de ciment (BG2 à BG6) varie de 2,2 à 5,7 mm.s-1 selon la méthode de mesure à charge variable et de 1,8 à 3,9 mm.s-1 à charge constante (Figure 1.25). Ces intervalles de perméabilité sont comparables à ceux trouvés dans la littérature (2,0 à 5,4 mm.s-1) En terme normatif, la perméabilité à l'eau de tous ces bétons est plus importante que la valeur critique de 5,4.10-2 mm.s-1 au-delà de laquelle un béton peut être qualifié de drainant [101].

Une variation importante de la perméabilité, de 154% à charge variable et de 103% à charge constante, est observée quand le rapport E/C varie de 0,30 à 0,37 (BG2 et BG5) (Figure 1.25), ce qui montre une influence plus marquée du rapport E/C sur la perméabilité que sur la résistance en compression (72%). Une différence importante des perméabilités obtenues selon les deux méthodes de mesure a été observée. En effet, l'essai à charge variable s'effectue sur des matériaux dont le coefficient de perméabilité est inférieur à 1 mm.s-1. Lorsque la perméabilité des matériaux est supérieure à 1 mm.s-1 (cas des bétons étudiés), l'essai est plus hasardeux car le niveau d'eau à l'entrée de la perméabilité peut alors diminuer rapidement, ce qui réduit la précision des mesures [102].

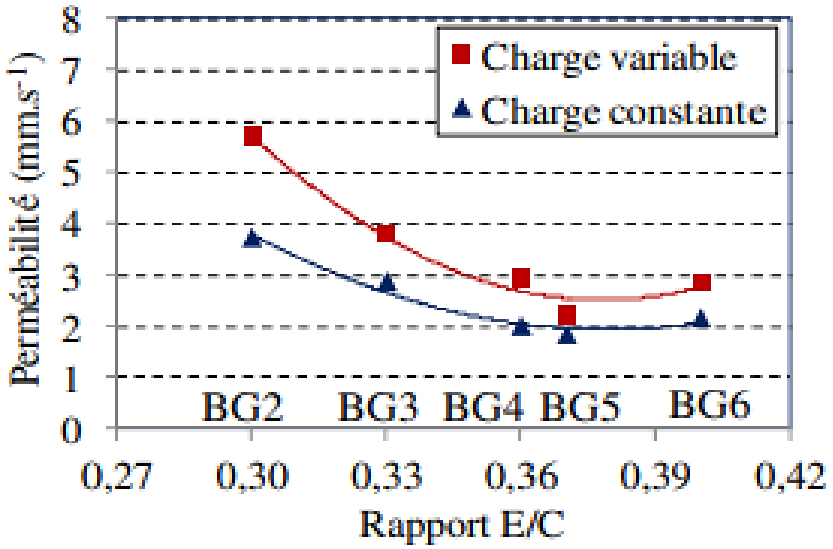


Figure 1.26 Perméabilité en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels [102]

1.4.1.3 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C

Pour mieux comprendre l'impact du rapport E/C, nous avons tracé la courbe montrant l'évolution des porosités et des masses volumiques apparentes des bétons (voir Figure 1.27).

L'évolution des courbes des porosités et des masses volumiques en fonction du rapport E/C est inverse. Les courbes de tendance de ces paramètres possèdent un extrémum pour un rapport E/C égal à 0,37. L'idée d'un rapport E/C optimal vis-à-vis de la porosité est contraire à ce qui s'applique pour le béton ordinaire pour lequel plus le rapport E/C est faible, plus le béton est compact [103].

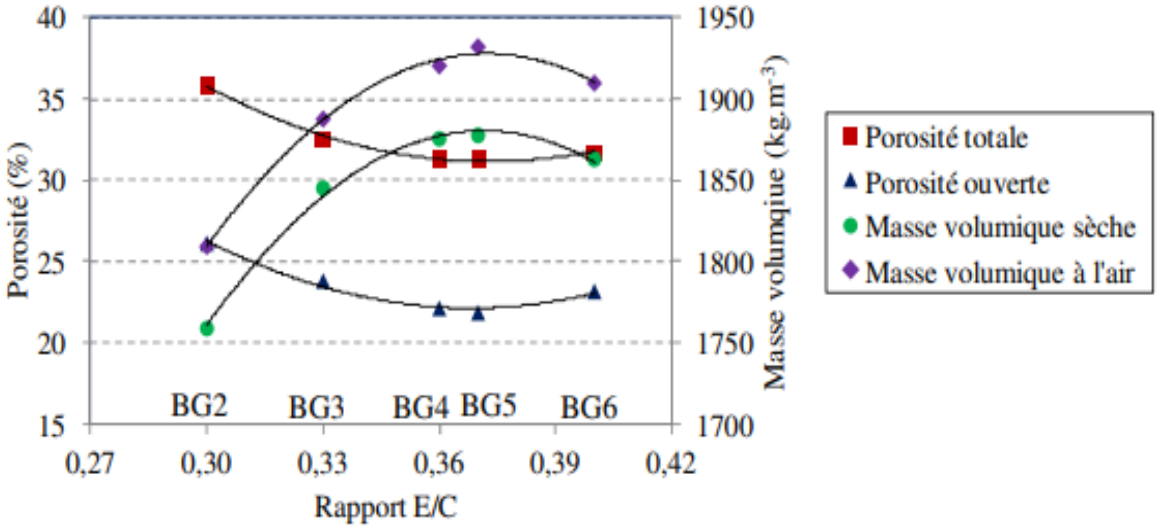


Figure 1.27 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels [102]

1.4.2 Effet de la granulométrie des granulats pour le béton drainant

- La densité du béton drainant sans fines a été marginalement augmentée par l'ajout des granulats fins. L'ajout des granulats fins.
- La porosité et le retrait de séchage du béton drainant ont été marginalement réduits lorsque la teneur en granulats fins a été augmentée de 0 % à 10 % du poids total des granulats, la porosité et le retrait de séchage du béton perméable ont été légèrement réduits. Poids total des granulats.

- La résistance à la compression du béton drainant n'a pas été influencée par l'augmentation de la teneur en granulats fins. N'a pas été influencée par l'augmentation de la teneur en granulats fins. Cependant, la perméabilité à l'eau du béton drainant a été marginalement affectée [104].

1.4.3 Effet de l'énergie de consolidation

L'importance de l'énergie de consolidation réside dans son influence sur les propriétés mécaniques et drainantes du béton drainant. Les études antérieures sur ce type de béton ont utilisé différentes méthodes de consolidation telles que le pilonnage avec une barre métallique, la consolidation à l'aide d'un Proctor, l'utilisation d'une table vibrante, ou une combinaison de deux de ces trois méthodes.

À moins d'étudier l'effet de l'énergie de consolidation, l'utilisation du même niveau d'énergie que celui utilisé pour la détermination de la masse volumique est suggérée.

Schaefer et al ont trouvé que les performances mécaniques ainsi que la durabilité aux cycles de gel dégel sont étroitement reliés à l'énergie de consolidation du matériau drainant [105]. D'autre part, la conductivité hydraulique est plus affectée lors de l'utilisation de rapports E/C et volumes de pâte élevés. La comparaison de plusieurs niveaux d'énergie de consolidation avec différents rapports E/C a montré que la méthode de consolidation réalisée selon la norme ASTM C31 donne des masses volumiques plus élevées (figure 1.27) [106].

Ceci est valable pour deux différents rapports E/C utilisés (0,31 et 0,34). La mesure de la masse volumique est une méthode utilisée pour contrôler la qualité du béton drainant mis en place. Une relation linéaire relit la masse volumique à la résistance à la compression [107].

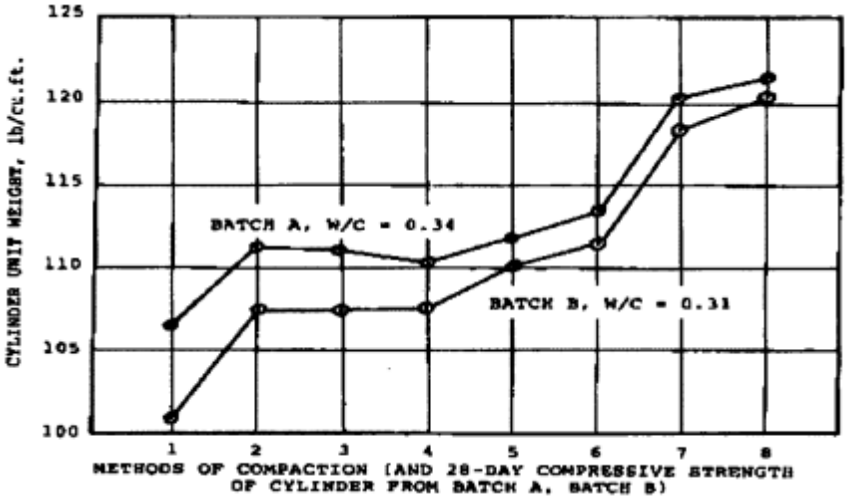


Figure 1.28 Effet de l'énergie de consolidation sur la masse volumique [106]

1.4.4 Effet de la porosité sur la résistance à la compression

Schaefer et al. [108] ont trouvé une relation linéaire entre la résistance à la compression et le taux de vide (figure 1.29). Selon cette corrélation, une faible teneur en vides conduit à une résistance à la compression élevée. Ils ont également développé une relation entre la résistance à la compression et la porosité, comme le montre l'équation :

Résistance à la compression (MPa) = 4762.1 - 97.16 × [taux de vide (%)]

La figure1.29 montre la relation entre la résistance à la compression et le taux de vide total. La résistance à la compression diminue de 20 MPA à 10 MPA lorsque la teneur en porosité totale passe de 20 % à 30 %. La résistance à la compression diminue de 20 MPA à 10 MPa lorsque la teneur en porosité totale passe de 20 % à 30 %.

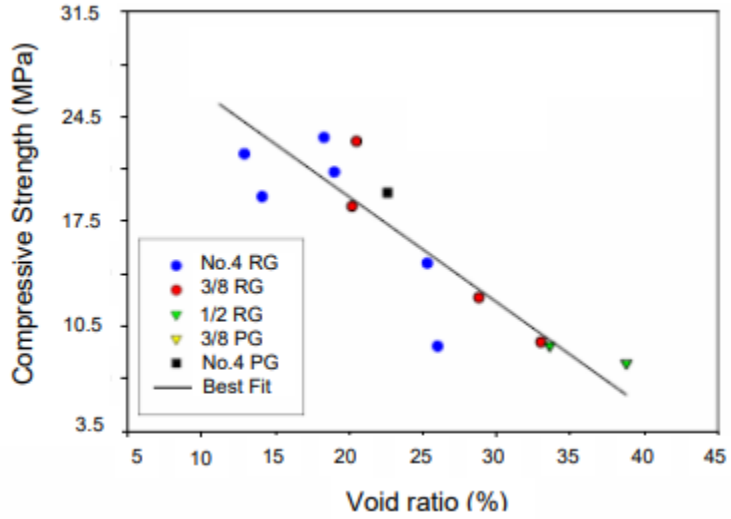


Figure 1.29 Relation entre la résistance à la compression et la teneur en vides [108]

1.4.5 Influence de la taille et du conditionnement des granulats dans le béton drainant

La taille des granulats influence directement leur conditionnement, contrôlant la porosité et l'homogénéité du béton drainant. La figure 1.30 montre des échantillons de béton drainant moulés avec des traces de même composition, de dimensions et de combinaisons granulométriques différentes.

Il est possible d'observer les différentes homogénéités des mélanges. Les échantillons avec des granulats de plus grande taille présentent une plus grande rugosité dans leur surface, différente de celle des échantillons réalisés avec des granulats de plus petites tailles [109].



Figure 1.30 Comparaison visuelle d'échantillons de béton drainant avec des Granulats de différentes dimensions et combinaisons [109]

La méthodologie de tassement des granulats est une proposition visant à assurer un tassement optimal des grains et à améliorer les propriétés du béton drainant. Et d'améliorer les propriétés du béton drainant. La mise en œuvre de l'essai de compactage des particules vise à augmenter le compactage des mélanges, améliorant ainsi la résistance mécanique du béton drainant. Mécanique du béton drainant. Plusieurs études sur l'influence des différentes tailles et granulométriques sur le béton drainant ont été observées dans la littérature [110].

Neithalath et al. [111] ont réalisé six compositions en utilisant trois classes granulométriques différentes. Parmi ces compositions, trois d'entre elles contenaient des granulats unidimensionnels, tandis que les trois autres mélanges étaient composés à 50 % de granulats unidimensionnels. Dans les mélanges avec des granulats de plus grande taille, la taille des pores a augmenté, ce qui a entraîné une augmentation de la perméabilité. Cependant, les

auteurs ont constaté qu'une augmentation de la porosité (de 25 à 35 %) entraînait une perte significative de la résistance mécanique, ce qui n'est pas souhaitable.

Ibrahim et al [112] ont observé que l'amélioration de la granulométrie des granulats, avec une meilleure distribution de leurs dimensions, permet de donner une meilleure uniformité à la trace sans pour autant remplir les vides, empêchant la percolation de l'eau.

Ćosić et al [113] ont étudié l'influence du type et de la taille des granulats sur les propriétés du béton drainant. Cinq mélanges de béton différents ont été préparés avec différentes tailles et types de granulats. Des proportions plus élevées de granulats plus gros ont donné lieu à une porosité effective plus élevée.

Plus la porosité est grande, plus le volume des vides est important et plus la résistance à la compression est faible. Plus la résistance à la compression est faible.

Shen et al [114] ont observé la même tendance, à savoir que lorsque le plus grand agrégat du mélange dépasse 50 % de la taille de l'agrégat, la résistance à la compression diminue. Lorsque le plus gros agrégat du mélange dépasse 50 % de la composition, la résistance mécanique diminue.

Debnath et Sarkar [115] ont étudié l'influence de la combinaison de différentes dimensions de granulats grossiers et fins sur la perméabilité et la porosité du mélange. Leur étude a révélé que l'augmentation de la taille des granulats conduit à une grande perméabilité en raison d'une plus grande porosité. Ils ont examiné comment les différentes dimensions des granulats grossiers et fins influençaient ces propriétés du mélange

1.4.6 Influence du volume de pâte

L'effet du volume de pâte sur les propriétés du béton drainant est illustré à la figure 1.30. La densité, la porosité et la perméabilité sont des propriétés qui sont légèrement soumises à l'influence du volume de pâte. La densité et la porosité suivent des tendances opposées avec un bon ajustement linéaire de R^2=0.99 et R^2=0,85, respectivement. Une fois que le volume de pâte augmente, il y a une augmentation de la densité et une réduction de la porosité parce qu'il y a plus d'eau dans le sol.

Réduction de la porosité a été enregistrée car il y a plus de pâte de ciment dans le mélange. De même, la perméabilité diminue également avec l'augmentation du volume de pâte. Comme indiqué ci-dessus pour les propriétés mécaniques, la contribution de la quantité de pâte de

ciment dans le mélange est importante. Principalement, la perméabilité qui a présenté le plus petit ajustement linéaire (R^2=0.62), est assez dépendante d'autres variables du granulat grossier, qui peuvent influencer, entre autres caractéristiques, la taille des pores, la tortuosité, etc. [116].

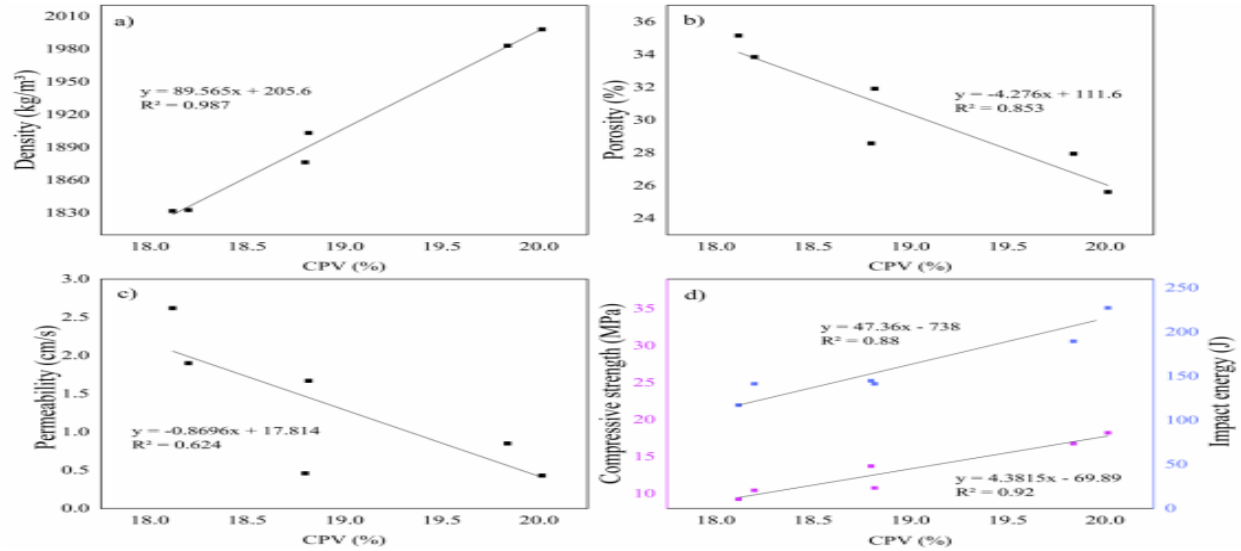


Figure 1.31 Corrélations entre CPV et a) densité, b) porosité, c) perméabilité, d) résistance à la compression et énergie d'impact [116]

1.4.7 Effet de la porosité effective :

Le volume des vides (la porosité effective) est essentiel pour assurer une certaine conductivité hydraulique du béton drainant. Le volume des vides est fonction de l'énergie de consolidation, de la forme et du coefficient d'uniformité des granulats [117]. Une étude a montré une relation entre la taille des granulats et la porosité effective des échantillons du béton drainant (figure 1.32) [118]. Cette figure montre également que les granulats de grande taille fournissent des bétons drainants de porosité supérieure que ceux de petites tailles.

La combinaison de deux granulats de taille différente peut altérer la porosité effective, notamment dans le cas de deux granulométries assez éloignées (figure 1.32). Une porosité effective d'au moins de 15% est nécessaire pour assurer une perméabilité minimale [119]. Au-delà de cette valeur, elle commence à affecter négativement la résistance à la compression et la perméabilité. Enfin, l'énergie de consolidation a une influence importante sur le volume des vides total et la masse volumique. Vemon et al [120] ont trouvé une excellente relation entre la masse volumique des échantillons au laboratoire et le volume total des vides.

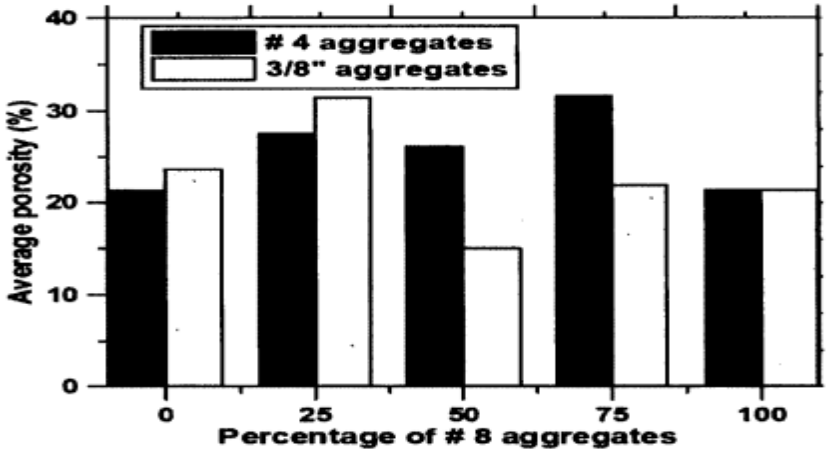


Figure 1.32 Relation entre la taille des granulats et la porosité effective [118]

1.5 Applications du béton drainant :

Le béton drainant est un matériau qui peut être posé aussi bien :

- Dans les allées d'un jardin ;
- Autour de votre maison ;
- Pour votre plage de piscine ;
- Pour construire votre terrasse ;
- Mais qui sert aussi parfois à construire des parkings ou des trottoirs
- Couche de roulement pour les parcs et les courts de tennis.

. Il s'agit d'un matériau qui présente une grande solidité, une résistance à tout épreuve et surtout, il s'agit d'un matériau très poreux qui présente une perméabilité incomparable**.** Notez que le béton drainant peut-être coloré, ce qui vous permet de l'adapter à vos goûts et au style de votre jardin. [121].

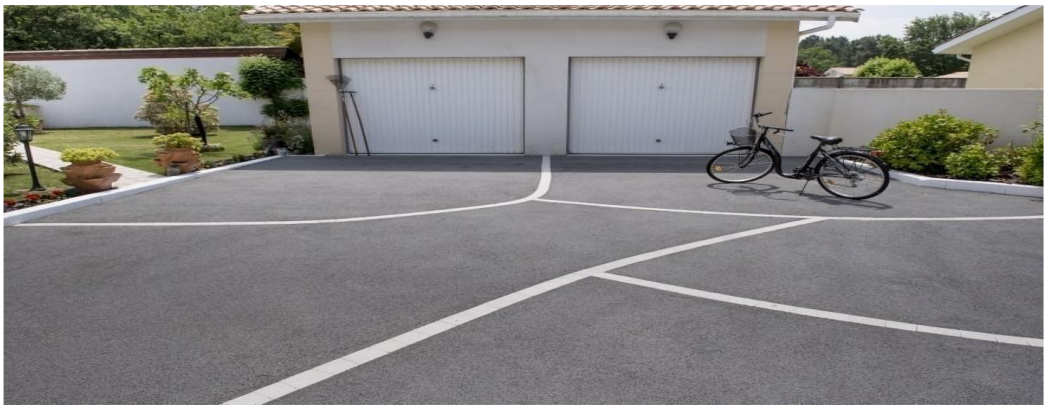


Figure 1.33 : Autour d'une maison en béton drainant. [121].



Figure 1.34 : Parking en béton drainant [121].



Figure 1.35 : stade de tennis en béton drainant [121].

1.6 Mise en place :

1.6.1 Préparation du sol :

Avant de procéder à la pose du béton drainant, il est crucial de préparer soigneusement le sol afin d'éviter tout vieillissement prématuré du matériau. Il est essentiel de s'assurer qu'il y a suffisamment d'espace pour accueillir le béton. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire de procéder à un décapage du sol existant sur une épaisseur d'au moins 15 à 20 cm. Dans le cas où le sol présente une surface ancienne telle que du carrelage, du béton ou des pavés, ces éléments doivent être retirés, et une sous-couche perméable doit être mise en place. Le béton ne doit pas être posé directement sur la terre, sous peine de voir apparaître des fissures à court terme.

Une fois le sol assaini, on verse une sous couche de cailloux (0/20 concassé convient) puis on compacte à l'aide d'une plaque vibrante pour assurer un matériau compact et homogène. Cette sous-couche assurera l'écoulement des eaux de ruissellement. Cette étape est primordiale car, elle garantit la réussite du projet [122].



Figure 1.36 Préparation du sol [123]

1.6.2 Pose des joints de dilatation :

Il est essentiel d'installer des joints de dilatation, en respectant un espacement d'au moins tous les 20 m² ou 5 mètres linéaires. Cette mesure est nécessaire pour prévenir l'apparition de fissures. De plus, les joints offrent également une opportunité esthétique, permettant d'introduire des variations de couleur dans votre béton, ajoutant ainsi une touche décorative.



Figure 1.37 Pose des joints de dilatation [124]

1.6.3 Etalage du béton drainant

Cet aspect sera particulièrement chronophage et exigeant. En effet, il implique le transport d'une importante quantité de béton frais, suivi de son épandage, de son nivellement et de sa compression. À son arrivée, le béton est encore humide et ressemble davantage à de la terre. Il doit donc être soigneusement réparti à l'aide d'un râteau afin de combler tous les vides et de recouvrir intégralement la zone visée

.



Figure 1.38 Etalage du béton drainant [125]

1.6.4 Fin du chantier

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

Il faudra attendre quelques heures avant de marcher sur le béton drainant, et 1 semaine environ avant d'y garer un véhicule. Il est important des respecter ces temps de séchage afin de conserver toutes les propriétés et l'aspect de votre béton drainant [126].



Figure 1.39 Damage du béton drainant [125]

1.7 Histoire des revêtements perméables :

Le béton drainant s'est largement imposé comme matériau principal dans la construction de chaussées perméables. Ces systèmes ont gagné en popularité ces dernières années en raison de leur contribution significative aux systèmes de drainage durables. Contrairement aux méthodes traditionnelles de drainage basées sur des canalisations, qui datent du 19^{e} siècle et ont tendance à provoquer des écoulements d'eaux pluviales, notamment dans les zones urbaines, les chaussées perméables offrent une alternative plus efficace

Ces systèmes jouent un rôle essentiel dans la gestion des eaux de ruissellement, en particulier dans les environnements urbains. Ils présentent des avantages tels que la réduction des risques d'inondation, la recharge des nappes phréatiques et la préservation de la qualité de l'eau. Ces avantages s'intègrent dans une approche d'aménagement urbain sensible à l'eau, visant à optimiser la gestion des ressources hydriques et à réduire la consommation d'eau.

Il convient donc de reconnaître l'importance du béton drainant et des systèmes de chaussée perméable en tant que solution durable pour le contrôle des eaux de ruissellement, la protection contre les inondations, la recharge des nappes phréatiques et l'amélioration de la qualité de l'eau dans les environnements urbains. [127].

1.8 Avantages et les inconvénients du béton drainant

Les principaux avantages des revêtements perméables sont les suivants [128] :

- Il présente un large choix esthétique, offrant des possibilités de coloration et de formulation variées
- Le béton drainant peut drainer jusqu'à 50 L d'eau par seconde et par m², ce qui en fait une solution efficace pour les problématiques d'évacuation de l'eau
- Traitement de l'eau par élimination des polluants.
- Réduction des besoins en bordures et en égouts pluviaux.
- Amélioration de la sécurité routière grâce à une meilleure résistance au dérapage.
- Recharge des aquifères locaux.
- Réduction des ilots de chaleur urbains.
- Gestion des eaux de ruissellement et réduction des surfaces imperméables.

En revanche, les inconvénients sont les suivants [129] :

- Le manque d'expérience des ingénieurs.
- Ne peut pas être utilisé sur des chaussées à forte circulation
- Colmatage en cas d'installation incorrecte et de mauvais entretien.
- Taux de défaillance élevé.
- Certains risques de contamination des eaux souterraines, en fonction des conditions du sol et de la susceptibilité de l'aquifère.
- Le carburant peut s'échapper des véhicules et les produits chimiques toxiques peuvent s'écouler de l'asphalte et/ou de la surface du liant. Les systèmes de chaussée poreuse ne sont pas conçus pour traiter ces polluants.
- Des conditions anaérobies peuvent se développer dans les sols sous-jacents s'ils ne peuvent pas sécher entre les orages. Cela peut entraver la décomposition microbiologique.

Chapitre 2 : Matériaux et méthode

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons d'abord introduit les divers matériaux employés dans la fabrication des bétons examinés. Ensuite, nous avons décrit en détail les approches techniques mises en œuvre pour effectuer des mesures précises et significatives. Enfin, nous discutons des diverses approches de formulation utilisées, ainsi que des outils et des protocoles lors de la conduite des expériences.

2.2. Matériaux utilisés

2.2.1 Le ciment

Le matériau de construction examiné dans notre recherche est un type de ciment appelé Ciment Portland Composé (CEM II/B-L 42,5 N), qui respecte les normes en vigueur en Algérie (NA 442 [130]) et en Europe (EN 197-1 [131]).



Figure 2.1 Le ciment utilisé [132]

Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé sont présentées dans le **tableau 2.1**

Tableau 2.1 : Caractéristiques du ciment utilisé [132]

Caractéristiques techniques		Valeurs
Propriétés chimiques	Perte au feu (%) (NA5042)	8.0 ±2
	Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
	Teneur en MgO (%)	1.7±0.5
	Teneur en chlorures (NA5042) (%)	0.02-0.05
Composition minéralogique du clinker	C3S (%)	60±3
	C3A (%)	7.5±1
Propriétés physiques	Consistance normale (%)	26.5±2.0
	Finesse de Blaine (cm2/g) (NA231)	3400
	Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
	Expansion	≤ 3.0
Temps de prise à 20°C (NA230)	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

2.2.2 Super plastifiant :

L'adjuvant utilisé était le super plastifiant « Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 ». Il s'agit d'un agent réducteur d'eau haut de gamme polyvalente et sans chlore, fabriqué à partir d'un copolymère acrylique. Les caractéristiques du superplastifiant employé sont présentées dans le tableau. Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristiques du TEMPO-10 [133]

Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
Valeur Ph	4.0 ± 1.0
Densité	1.060 ± 0.010
Teneur totale en ions chlorure	≤ 0.1 %
Équivalent oxyde de sodium	≤ 1 %



Figure 2.2 Super plastifiant Sika TEMPO-10 [133]

2.2.3 Gravier

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé de granulats 3/8 l'un d'origine naturelle . Les granulats naturels utilisés proviennent du concassage de roches calcaires de la région de Djelfa. Comme le montre la figure (2.3).



Figure2.3 échantillon de gravier 3/8 utilisé

2-2-4 le sable :

Trois types de sable ont été utilisés dans ce projet, chaque ayant ses propres caractéristiques distinctives.

- Le premier est un sable fin (0/1 mm) avec le module de finesse égale MF= {1.76} provenant de la wilaya de Boussaâda. Comme le montre la figure (2.4)

- Le deuxième type est un sable moyen (0/3 mm) avec le module de finesse égale MF= {2.23} provenant de la wilaya d'Oued Souef. Comme le montre la figure (2.5)

- Enfin, le troisième type est un sable concassé (0/4 mm) avec le module de finesse égale MF= {3.45} provenant de la wilaya de Ghardaia. Comme le montre la figure (2.6)

Les photos ci-dessous sont présentées afin de montrer l'aspect de chaque sable utilisé dans la confection de tous les bétons de cette étude.



Figure2.4 échantillon de sable fin



Figure2.5 échantillon de sable moyen

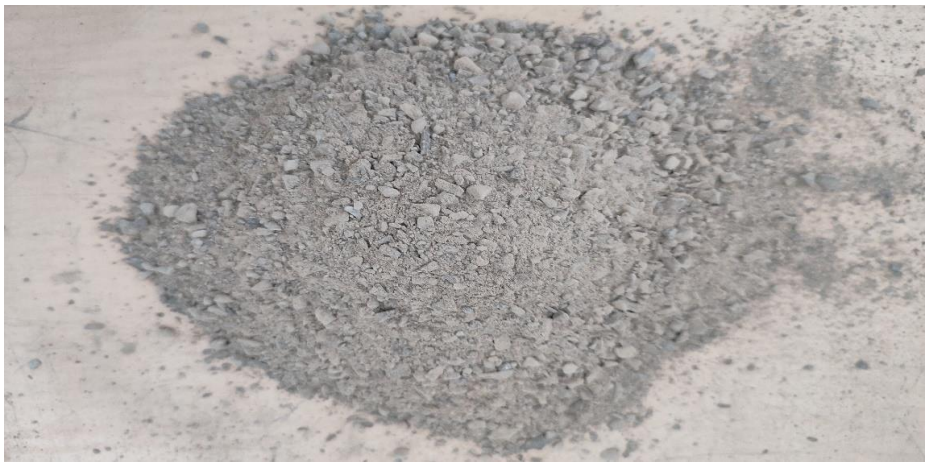


Figure2.6 échantillon de sable grossier

2.3. Essais

2.3.1 Essais de caractérisation des matériaux

2.3.1.1 Les différents essais de caractérisation du gravier et sable

2.3.1.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique permet de déterminer les différents diamètres des grains qui constituent un granulat. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis de diamètres croissant. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages de tamisât (%) obtenus sont exploités sous forme graphique [134] .

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

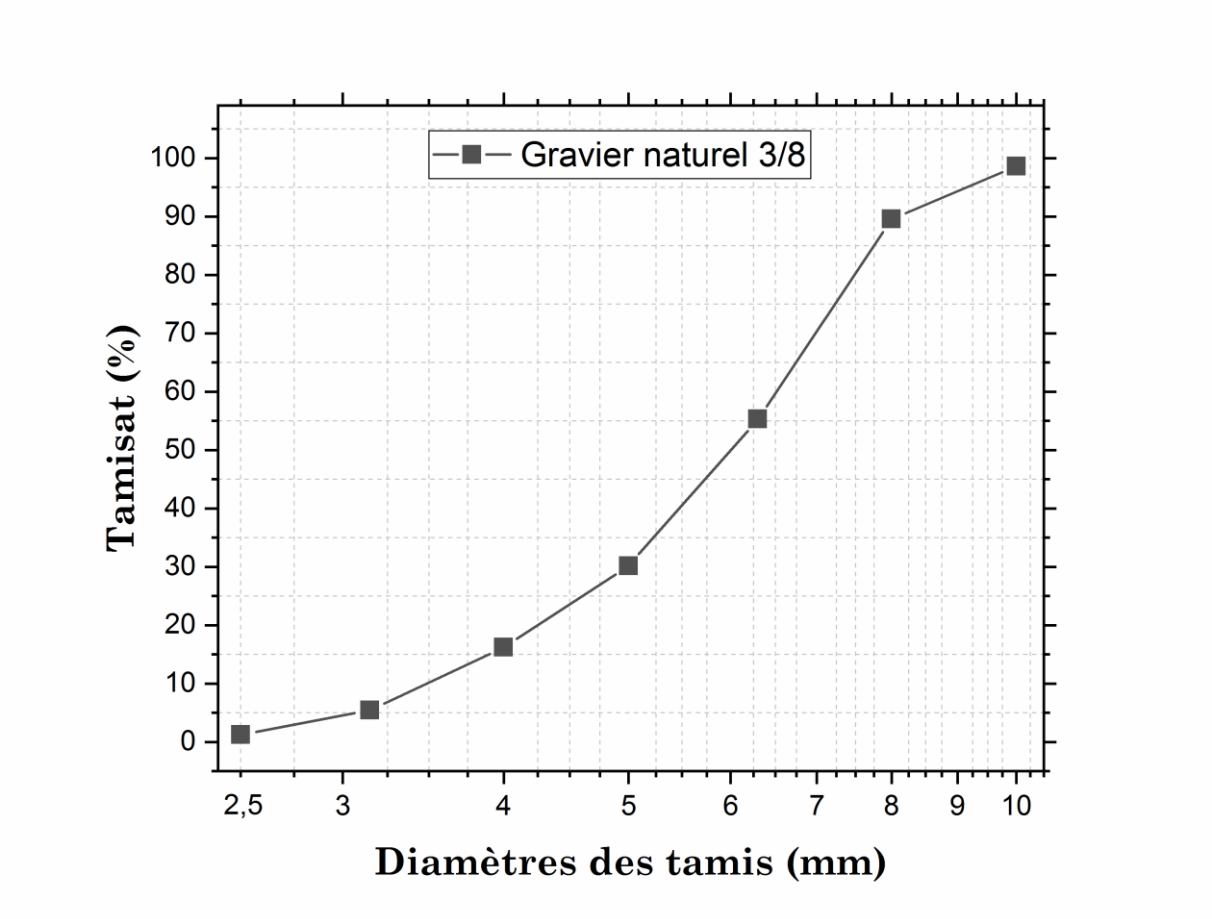


Figure 2.7 Courbe granulométrique de gravier 3/8 utilisé

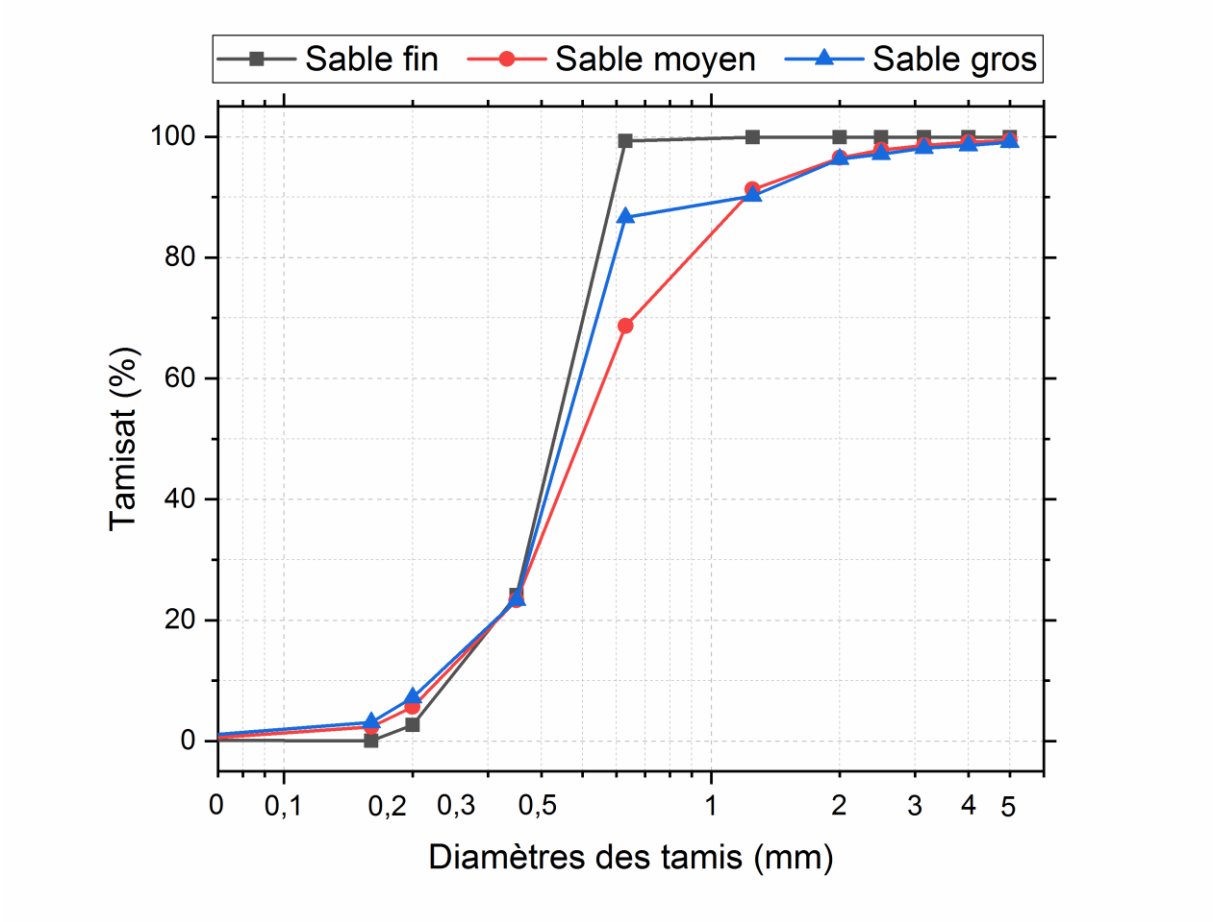


Figure 2.8 Courbes granulométriques des sables utilisés

2.3.1.1.2 Masses volumiques (NF P18-555)

La masse volumique d'une substance, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume. Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats sont calculés d'après la norme française (NF P18-555) [135].

Masse volumique apparente (MVa) : Le principe de cet essai est de mesurer la masse d'un échantillon de gravier dont on connait le volume V du récipient utilisé, La masse volumique dans ce cas est égale à la masse mesurée M sur le volume V.

La masse volumique absolue ou réelle (MVr) : C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir en compte les vides pouvant existés dans ou entre les grains.



Figure 2.9 Mesure de la masse volumique absolue

Les résultats obtenus des essais de mesure de ces masses volumiques sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 : Masse volumique absolue et apparente des granulats

Type des granulats	**Gravier naturel 3/8**	**Sable fin**	**Sable moyenne**	**Sable gros**
Masse volumique apparente (MVa) (g/cm³)	1,34	1,59	1,55	1,44
Masse volumique absolue ou réelle (MVr) (g/cm³)	2,44	2,68	2,58	2,63

2.3.1.1.3 Masse volumique pilonnée ASTM C29

L'essai se déroule en remplissant un récipient inamovible en trois couches. Chaque couche est compactée par 25 coups à l'aide d'une barre métallique de 16 mm (voir figure2.8). Une fois les trois couches terminées, le récipient est nivelé, et la masse pilonnée est mesurée (voir Tableau 2.4). En connaissant le volume du récipient, on peut déterminer la masse volumique pilonnée des granulats. L'objectif de cet essai est de caractériser la compacité granulaire ainsi que le volume de vide inter granulaire [136, 137].



Figure 2.10 Appareillage utilisé pour déterminer la masse volumique pilonnée

Tableau 2.4 résultats de la masse volumique pilonnée

Granulats	**Gravier 3/8 (g/cm³)**
M_V Pilonnée	1,44

2. 3.1.1.4 Absorption d'eau

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF P 18-555 [138].



Figure 2.11 Essai de l'absorption d'eau.

Tableau 2.5 Résultats de l'essai de l'absorption d'eau

Granulats	**Gravier 3/8 (%)**	**Sable fin (%)**	**Sable moyenne (%)**	**Sable Gros (%)**
Absorption	1,05	1,15	0,75	0,65

2.3.1.1.5 Coefficient de Los Angeles (EN 1097-2)

Cet essai a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des granulats. L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm (m) produite en soumettant une quantité de granulat (M) aux chocs dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations. [139]

Le coefficient Los Angeles (L_A) est déterminé par la relation 1:

$$LA = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{M}} \times 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (\textbf{Equation 2. 1})$$



Figure 2.12 Essai de Los Angeles

Tableau 2.6 Résultats de l'essai de los Angeles

	Gravier 3/8
	5000
La masse totale de la charge (g)	3950
m (g)	3458
m (g)	1534
***LA* (%)**	30,68

2.3.1.1.6 Démoulage et conservation des éprouvettes

Une fois les mélanges de béton préparés, les moules ont été remplis, nivelés et protégés de la dessiccation en les recouvrant d'un film plastique afin de prévenir toute évaporation de l'eau. Après 24 heures, toutes les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans l'eau à une température moyenne de 20°C ± 2°C et une humidité relative de 100%, comme le montre la figure 2.11, jusqu'à la fin des essais prévus.



Figure 2.13 Conservation des éprouvettes

2.3.2 Essais à l'état frais

2.3.2.1 Essai au cône d'Abram (NF EN 12350-2)

L'essai d'affaissement au cône d'Abram est un essai simple qui permet de contrôler l'ouvrabilité du béton frais. L'essai consiste à remplir en 3 fois un moule de forme tronconique de 10 et 20 cm de diamètres intérieurs sur une hauteur de 30 cm, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide d'une tige métallique (cf. Figure 2.12). L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage. Le béton est classé en fonction de sa consistance selon la norme NF EN 206-1 [140].

Equipement nécessaire :

- Un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, de 20cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10cm de diamètre en sa partie inferieure ;
- Une plaque d'appui.
- Une tige de piquage.
- Un portique de mesure
- L 'essai doit être réalisé sur une surface horizontale
- L 'essai complète doit être exécuté sans interruption en moins de 2min :30sec
- Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes
- Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près

Tableau 2. 7 Classes d'affaissement selon la norme NF EN 206-1 [140]

Classe	Affaissement en (mm)	Consistance
S1	10 – 40	**Ferme**
S2	50 – 90	**Plastique**
S3	100 – 150	**Très plastique**
S4	160 – 210	**Fluide**
S5	≥ 220	**Très fluide**

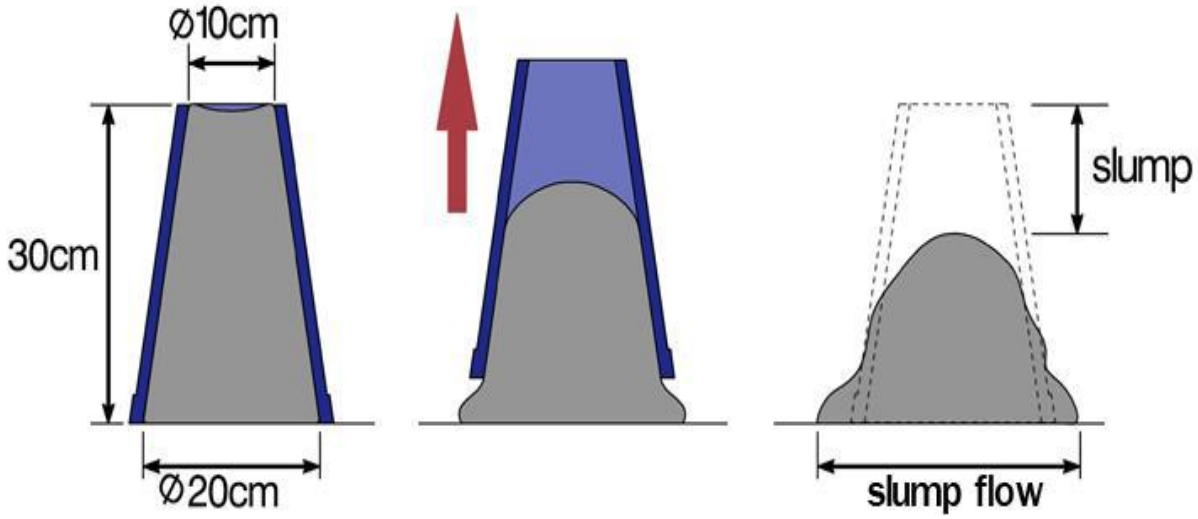


Figure 2.14 : Mode opératoire[140]



Figure 2.15 Essai de cône d'Abrams

2.3.2.2 Densité à l'état frais

Le but de cet essai est d'évaluer la densité à l'état frais et durci des bétons étudiés (cf. Figure 2.14). La densité du béton frais D$frais$ est déterminée selon la formule suivante :

$$D_{frais} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}\rho_{eau} \quad \text{..... (\textbf{Équation 2. 2})}$$

Avec :

M_1 : La masse du récipient

M_2 : La masse de béton contenu dans le récipient + la masse du récipient

V : Volume du récipient

Préparation de l'éprouvette :

- Remplir une éprouvette cylindrique de diamètre (d) et de hauteur (h) connus avec le béton frais.
- Veiller à bien compacter le béton pour éliminer les bulles d'air piégées.
- Niveler la surface du béton à l'aide d'une spatule.



Figure 2. 16 La densité a l'Etat frais

2.3.3 Essais sur le béton à l'état durcis

2.3.3.1 Densité à l'état durci

La densité du béton à l'état durci est déterminée par le rapport entre la masse de l'éprouvette sèche (M) et son volume (V) (Figure 2.12), comme décrit par l'équation (**Équation 2.3**). Les mesures de densité ont été effectuées en utilisant des éprouvettes cubiques de dimensions 10 × 10 × 10 cm.

$$D_{séch} = \frac{M}{V}\rho_{eau} \quad \text{…….. (\textbf{Équation 2.3})}$$



Figure 2.17 Densité à l'état durci

2.3.3.2 Essai de porosité (NF P18-459)

La procédure consiste à évaluer le volume d'eau absorbée par les pores interconnectés d'un échantillon de béton dont le volume est connu. Cet essai a été réalisé en utilisant des éprouvettes cylindriques mesurant 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur.

Conduite de l'essai [141]

- Conserver l 'éprouvette dans le moule carton pour effectuer l'essai.
- Placer l 'échantillon sur la balance, tarer et verser de l'eau dessus jusqu'à ce que le niveau de l'eau atteigne la surface supérieure de l'échantillon.
- Tapoter légèrement sur le côté de l 'éprouvette pour faire remonter les bulles d'air.
- Remplir de nouveau avec de l'eau.
- Noter la masse d'eau introduite (M).
- Démouler l'éprouvette, en relevé ses dimensions (diamètre, hauteur) et on calcule son volume (V)
- Calculer la porosité ouverte avec **l'équation (4)** :

$$P\% = 100 \times (M / V) \quad \textbf{(Équation 2.4)}$$



Figure 2.18 Essai de porosité

2.3.3.3 Essai de perméabilité (ASTM D 5084)

La perméabilité des bétons étudiés est mesurée à l'aide d'un perméamétrie à charge variable développé au niveau de laboratoire selon la norme ASTM D 5084 [142] (voir Figure 2.17). Les mesures de perméabilité hydraulique ont été effectuées sur des échantillons cylindriques de 10 x 20 cm. Ces mesures ont été répétées trois fois pour vérifier la reproductibilité des résultats. Le coefficient de perméabilité hydraulique k (en mm/sec) est calculé à l'aide de **l'équation (5)** suivante :

$$k = \frac{aL}{at} \ln \frac{h0}{h1} \quad \text{(Équation 2.5)}$$

Où

- a : La surface de la colonne au-dessus de l'éprouvette (mm2);
- L : La longueur de l'échantillon (mm) ;
- À : La section de l'éprouvette (cm^2) ;
- h_0 = Le niveaux d'eau initiale (mm);
- h_1 = Le niveaux d'eau finale (mm) ;
- t = temps pour que l'eau passe de h_0 à h_1 (sec);



Figure 2.19 Essai de perméabilité à charge variable

2.3.3.4 Essai de la résistance à la compression (NFP 18-406)

Les essais de compression simple ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de dimensions 10 x 10 x 10 à l'aide d'une presse programmée spécifiquement pour les essais de compression, et ce pour différentes dimensions d'éprouvettes (cylindriques, cubiques).

Les éprouvettes confectionnées sont positionnées entre les deux plateaux de la presse. Le plateau inférieur, sur lequel repose l'échantillon, est fixe, tandis que le plateau supérieur est mobile. Lorsque le plateau supérieur descend, il écrase l'éprouvette. La force est appliquée progressivement à une vitesse de chargement constante. La charge maximale P est déterminée lorsque la rupture se produit, indiquant ainsi la fin de l'essai de compression [143].



Figure 2.20 Essai de résistance à la compression

2.3.3.5 Essai de traction (Essai brésilien) (NF P94-422)

L'essai de résistance à la traction transversale, également connu sous le nom d'essai brésilien, permet d'évaluer la résistance à la traction directe du béton sans recourir à un système de chargement complexe nécessaire dans l'essai de traction directe [144].

L'essai implique l'application d'une charge de compression centrée le long de deux génératrices d'une éprouvette cylindrique mesurant 10 x 20 cm. Les contraintes générées entraînent la rupture selon un plan diamétral de l'éprouvette



Figure 2.21 Résistance à la traction par fendage.

2.3.3.6 Essai d'auscultation dynamique (NF EN 12504-4)

Cet essai est employé afin de déterminer la vitesse de propagation des ondes longitudinales (de compression) à travers une éprouvette cylindrique mesurant 10 x 20 cm. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps de déplacement d'une impulsion ultrasonique généré par un appareil à ultrason. [145] L'essai ultrason passe par trois étapes primordiales :

- Preparation de l' éprouvette.
- Point de measures.
- Disposition du transducteur



Figure 2.22 Essai d'auscultation dynamique

2. 3.3.7 Essais de la conductivité thermique (NF EN 993-15) :

Pour mesurer la conductivité thermique à l'aide de fils chauds, conformément à la norme (NF EN 993-15) [146], L'expérience s'est effectuée en utilisant des cylindres de dimensions identiques, tant en diamètre qu'en hauteur (D = H = 100 mm). Il est vital que ces spécimens aient deux surfaces opposées parfaitement planes. Pour cette raison, les échantillons cylindriques sont polis, comme pour l'expérimentation de résistance à la compression. La procédure consiste à insérer une sonde ultra fine entre deux échantillons, où la sonde engendre de la chaleur grâce à un filament chauffant. La conductivité thermique est ensuite déduite basée sur le temps nécessaire pour que la chaleur atteigne le thermocouple. Ce temps dépend à son tour de la résistance thermique du béton.



Figure 2.23 Essai de conductivité thermique

2.3.3.8 Essai d'abrasion NLT-352/86

Pour réaliser ce test, nous utilisons un échantillon cylindrique dont le diamètre et la hauteur sont identiques (D = H = 100 mm). L'échantillon étudié est soumis à 300 cycles de rotation dans le cylindre de Los Angeles. Ensuite, nous calculons la différence entre la masse initiale de l'échantillon et sa masse solide totale finale selon la norme NLT-352/86 [147].



Figure 2.24 Essai d'abrasion.

2.4. Confection des bétons étudiés

La préparation du béton drainant a été réalisée dans une bétonnière verticale de 150 litres, suivant les procédures détaillées ci-dessous:

- Initialement, les agrégats et le ciment furent amalgamés pour une durée de 60 secondes dans le but de garantir une distribution uniforme.
- Par la suite, l'assemblage fut malaxé pendant une minute en y ajoutant 70% du volume d'eau nécessaire.
- Le mélange fut alors agité pendant une minute supplémentaire, intégrant le reste de l'eau qui avait été préalablement combinée au superplastifiant.
- On a ensuite observé une interruption de 2 minutes, durant laquelle le nettoyage de béton s'accrochant aux parois et au fond de la bétonnière a été effectué.
- Pour conclure, le malaxage a repris son cours pendant 2 minutes de plus.



Figure 2.25 Malaxeur à l'axe vertical

2.5. Formulation du béton drainant ACI 522

La formulation que nous avons adoptée pour la première phase d'étude est basée sur les recommandations proposées par le comité 522 de l'Institut Américain du Béton (ACI) [148].

Cette approche de formulation est basée sur la masse volumique pilonnée à sec des granulats, déterminée selon la méthode ASTM C29 [149],

Nos ambitions sont doubles. D'une part, nous aspirons à réaliser un juste équilibre entre le volume de pâte employée et la cohésion des granulats. D'autre part, il est essentiel pour nous d'assurer une perméabilité convenable en préservant un pourcentage approprié du volume des vides, ce qui servira à garantir une maniabilité optimale.

Le diagramme ci-joint fait apparaître la corrélation entre le volume de la pâte et celui des espaces vides. Lors de notre recherche, nous avons fixé le volume de la pâte à 18%, donnant lieu à environ 23% de volume d'espaces vides (une légère vibration étant appliquée). Ceci constitue le point le plus propice à la compatibilité dans les deux situations. Une fois fixé le volume de la pâte, nous gardons le rapport E/C stable à 0,28 au départ.

Le mélange de béton drainant peut être décomposé en une série d'étapes suivantes :

- Établir le poids total requis.
- Calculer le volume de la pâte nécessaire.
- Déterminer la quantité de ciment nécessaire.
- Calculer la quantité d'eau nécessaire.
- Déterminer le volume des solides requis.

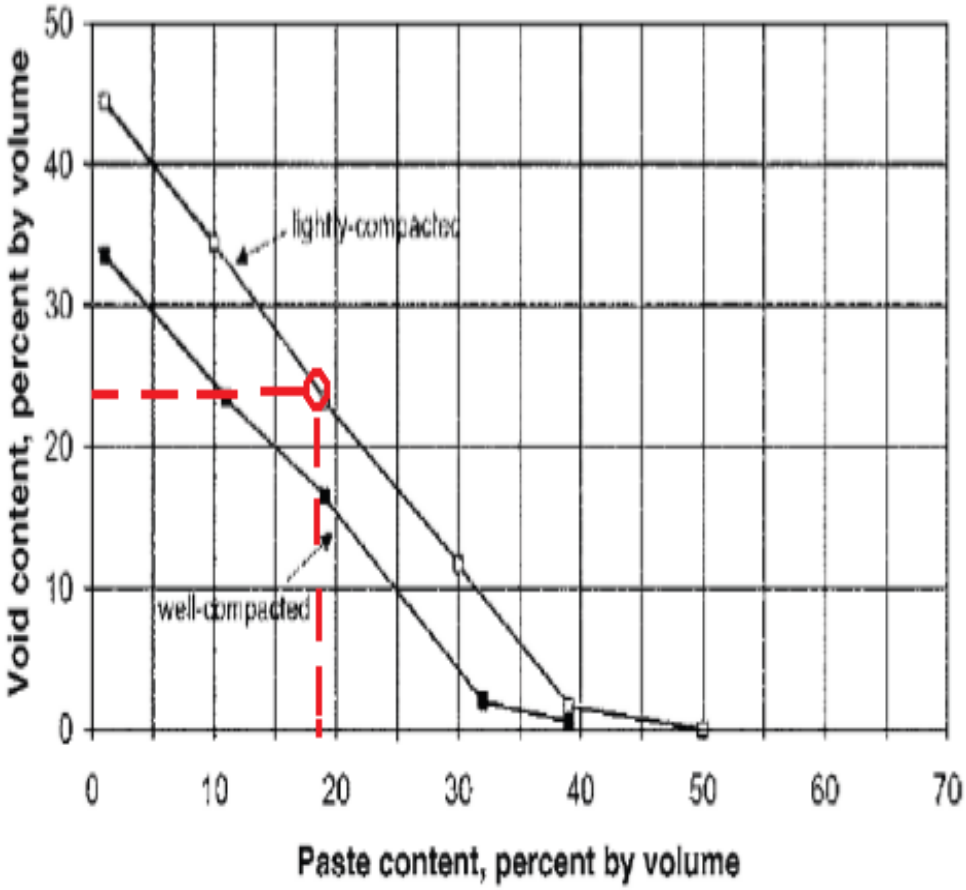


Figure 2.26 Relation entre le volume de pâte et le volume de vide [150]

Le dosage en ciment (C) doit être déterminé à partir de **la relation (6)** suivante :

$$C = \frac{vp}{p_c + \frac{E}{C}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textit{(Équation 2.6)}$$

La quantité du gravier nécessaire (G) est obtenue à partir de la masse volumique pilonnée avec **l'équation (7)** selon les exigences de la norme ASTM C29 [151].

$$G = M_{vb} \times {}^{b}/_{b_0} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(Équation 2.7)}$$

Tableau 2.8 : Les valeurs effectives de $^{\mathbf{b}}/_{\mathbf{b_0}}$ selon ACI 522

Pourcentage des granulats fins	$^{\mathbf{b}}/_{\mathbf{b_0}}$	
	ASTM C33/C33M Taille No. 8 (2.36 mm -9.5 mm)	**ASTM C33/C33M Taille No. 67 (4.75 mm -19.0 mm)**
0 %	0.99	0.99
10 %	0.93	0.93
20 %	0.85	0.86

Tableau 2.9 : Quantités utilisées pour fabriquer du béton drainant par $1m^3$

Mélange	Gravier naturel 3/8 (Kg/m3)	Sable (Kg/m3)	Ciment (Kg/m3)	E/C	Sp (%)
BT	1441	0	293	0,30	1,4
BDS1	1219	135			1,4
BDS2	1219	135			1,4
BDS3	1219	135			1,4

Nomenclature utilisée :

• **BT :** Béton témoin sans l'ajout de sable.

• **BDS1** : Béton drainé avec 10 % de sable gros.

• **BDS2 :** Béton drainé avec 10 % de sable moyen.

• **BDS3 :** Béton drainé avec 10 % de sable fin.

Chapitre 3 : Résultats et Discussions

Chapitre 3 : Résultats et Discussions

3.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter et d'analyser les résultats des différents essais effectués sur les bétons étudiés. On présente les résultats des essais effectués sur les bétons drainants additionne d'un pourcentage de 10% de sable de la quantité totale de granulats

3.2. Béton drainant associé à un changement de type de sable

Cette d'étude comprend l'ajout de 10% de sable de la quantité totale de granulats. Les essais choisis pour notre étude sont :

- Ouvrabilité (Affaissement au cône d'Abrams) ;
- Densité à l'état frais et durci ;
- Les résistances à la compression et à la traction ;
- Porosité ouverte ;
- Perméabilité hydraulique ;
- Conductivité thermique (CT) ;
- Auscultation dynamique (AD) ;
- Résistance à l'abrasion ;

Les résultats des essais sont rassemblés dans les tableaux 3.1 et 3.2 :

Tableau 3. 1 Résultats des essais réalisés (a)

Mélange	Etat frais			Etat durci					
	Aff (cm)	**Densité Frais**	**Sp (%)**	**Rc 7j (MPa)**	**Rc 14j (MPa)**	**Rc 28j (MPa)**	**Rt 7j (MPa)**	**Rt 14j (MPa)**	**Rt 28j (MPa)**
BT	19.5	1.66	1.4	7.22	10. 70	14.34	0.79	1.70	2.78
BDS1	18.5	1.71	1.4	8.70	11.81	15.01	0.97	1.82	3.09
BDS2	17	1.81	1.4	9.43	12.08	15.90	1.06	2.04	3.45
BDS3	17	1. 83	1.4	10.10	13.55	17.13	1.23	2.30	3.90

Aff : Affaissement

Sp : super plastifiant

Tableau 3. 2 Résultats des essais réalisés (b)

Mélange	Etat durci					
	Densité sèche	**Porosité ouverte (%)**	**K (mm/sec)**	**CT (W/m-K)**	**AD (m/sec)**	**Abrasion (%)**
BT	1.63	25.91	13.79	0.48	2325	35.2
BDS1	1.67	23.55	11.42	0.54	2533	31.05
BDS2	1.76	20.90	9.55	0.56	2674	27.3
BDS3	1.80	17.80	7.27	0.59	2897	21.4

K : Coefficient de perméabilité hydraulique

CT : Conductivité thermique

AD : Auscultation dynamique

3.2.1 Affaissement au cône d'Abram

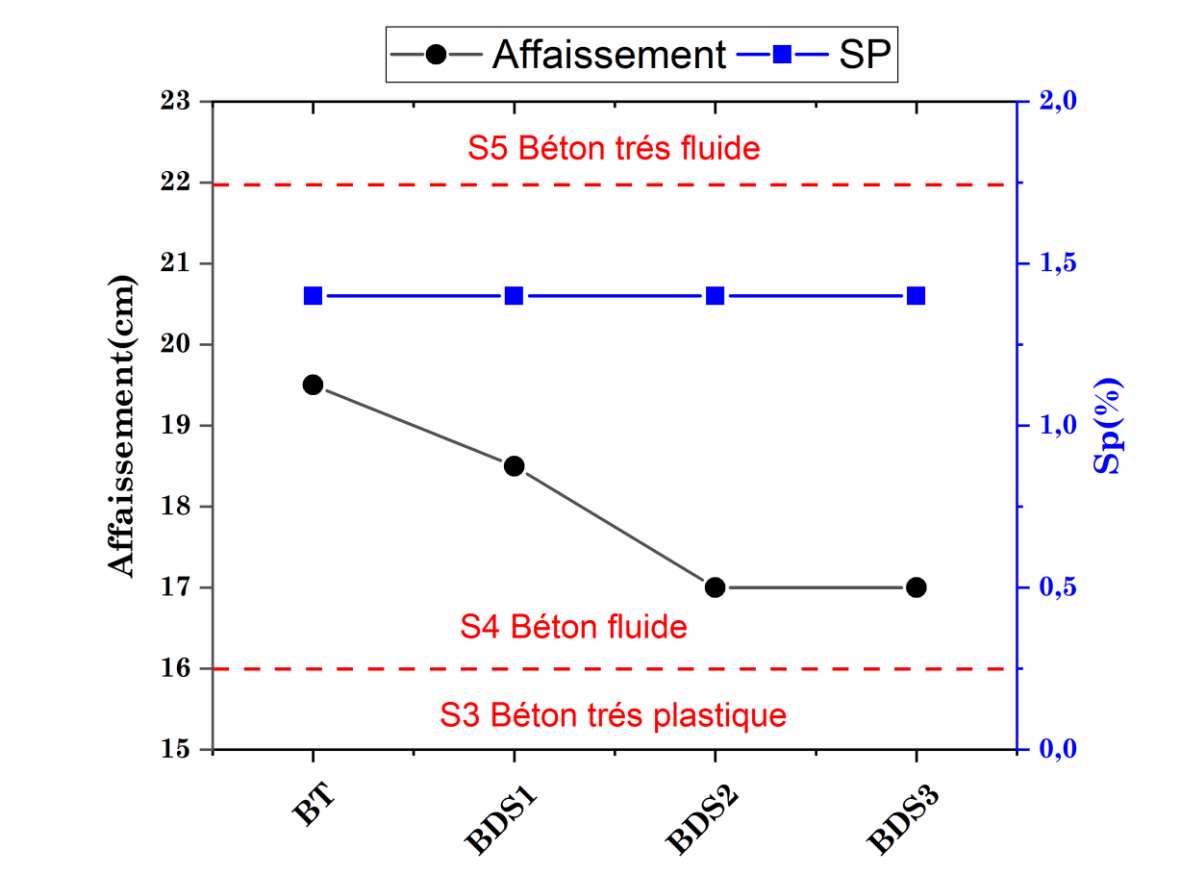


Figure 3. 1 Affaissement en fonction de type de béton.

L'ouvrabilité des différents bétons étudiés a été appréciée à partir des mesures de consistance par l'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN12350 [152].

D'après la Figure 3.1, il est évident que les mélanges contenant du sable moyen ou fin nécessitent des quantités supplémentaires de superplastifiant pour obtenir un affaissement similaire au mélange de référence. Dans l'étude, un superplastifiant à des doses fixes estimé à 1,4% a été utilisé lors de la production du béton, permettant d'obtenir une ouvrabilité dans la plage de 16 à 22 cm, conformément à la classe S4 (béton de consistance fluide). Différentes tailles de sable ont un impact différent sur la maniabilité du béton : le sable fin améliore la maniabilité, le rendant plus facile à manipuler et à façonner, tandis que le sable grossier peut réduire la maniabilité [153]. Lee, K. H., Yang, K. H., Mun, J. H., & Van Tuan, N [153] ont également trouvé des résultats similaires.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] ont constaté que les mélanges contenant des proportions plus élevées de granulats recyclés nécessitent aussi des quantités supplémentaires de

superplastifiant pour atteindre un affaissement similaire au mélange de référence. Ils ont utilisé un superplastifiant à des doses variables allant de 1,2% à 1,8%, ce qui leur a permis d'obtenir une ouvrabilité dans la plage de 19 à 21 cm, toujours en classe S4.

Benalia et Boukria [179] ont observé que les mélanges contenant des proportions importantes de granulats de déchet de brique (GBr) nécessitent aussi des pourcentages supplémentaires de superplastifiant pour obtenir un affaissement comparable au mélange témoin. Le dosage en superplastifiant dans leur étude a varié de 1,2% à 1,7%. Ils ont noté que le remplacement des granulats naturels par des GBr concassés conduit à une diminution de l'ouvrabilité, attribuée à la forme angulaire des GBr et à leur coefficient d'absorption élevé.

Ainsi, les résultats de ces différentes études montrent que des quantités supplémentaires de superplastifiant sont nécessaires pour maintenir l'ouvrabilité désirée lorsque des matériaux alternatifs comme du sable fin, des granulats recyclés ou des granulats de déchet de brique sont utilisés. Ces observations soulignent l'importance d'ajuster les dosages de superplastifiant pour chaque type de matériau afin d'obtenir une consistance fluide conforme à la classe S4.

3.2.2 Densité a l'état frais et durci

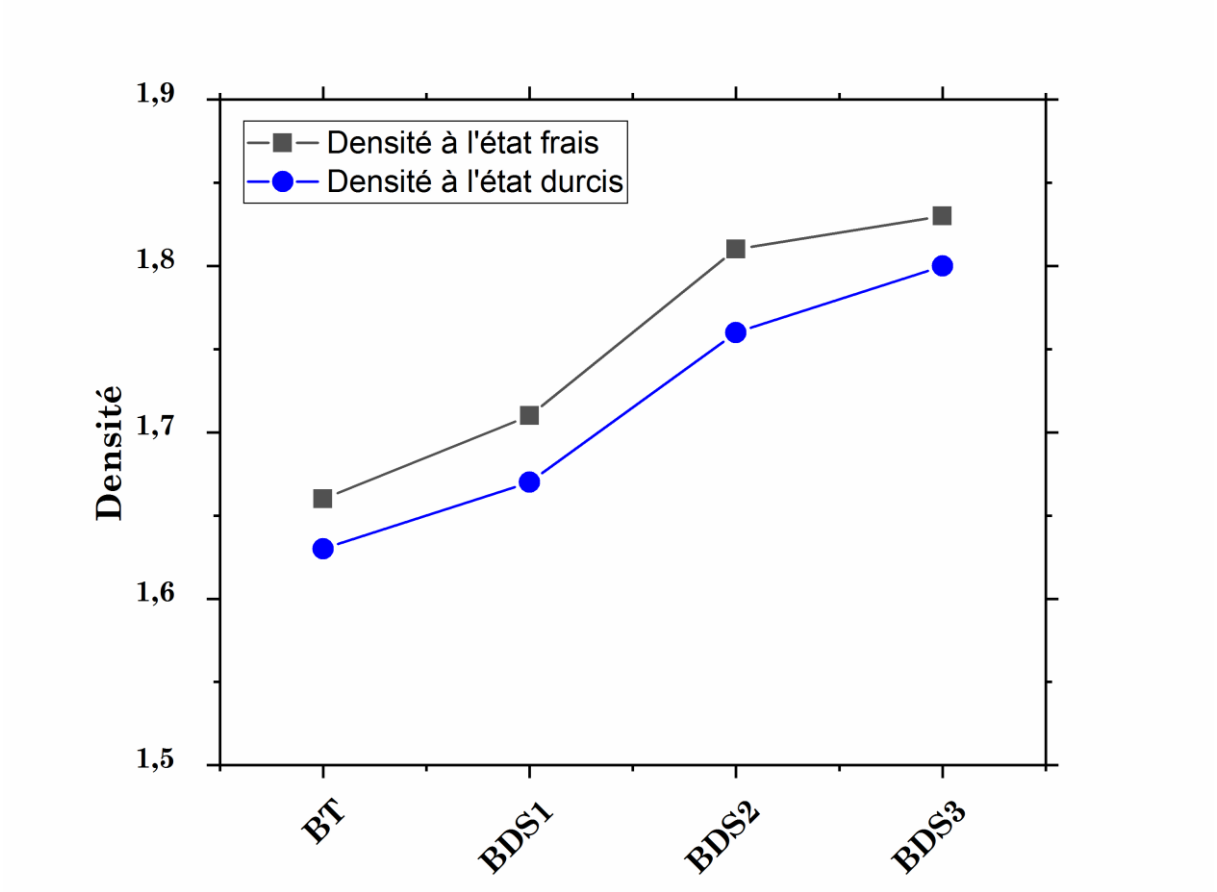


Figure 3.2 Évolutions de la densité en fonction de type de béton

D’après la figure 3.2, on observe une augmentation de la densité à l'état frais et durci d'environ 8,43% en raison de l’ajout de 10% de sable. Cette observation peut s’expliquer par le fait que le granulat fin (le sable) a une porosité plus faible et une densité plus élevée que les granulats naturels (GN) secs, ce qui est généralement observé dans le cas du béton à granulats fins. Selon les spécifications de la norme NF EN 206 [154], le béton étudié est donc considéré comme léger, avec une densité comprise entre 1,6 et 2. L’augmentation du pourcentage de sable dans le béton peut potentiellement avoir un impact sur sa densité en raison de changements d'ouvrabilité, de déformation et d'autres propriétés influencées par la teneur en sable. L'effet spécifique sur la densité dépend du type de sable, de sa densité et de la manière dont il interagit avec les autres composants du mélange de béton [155]. O. Kayali et al. [156] et Zaetang, Y et al. [157] ont obtenu des résultats similaires.

Selon Benalia et Boukria [178], la densité du béton diminue d'environ 35% lorsqu'on remplace progressivement les granulats naturels par des granulats de déchet de brique (GBr). Les bétons étudiés ont une densité comprise entre 1,1 et 1,7, ce qui les classe comme des bétons légers selon les normes établies. En comparaison avec les granulats naturels (GN), les GBr ont généralement une densité plus faible en raison de leur nature poreuse.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] constatent qu'une substitution de 100% des granulats naturels par des granulats de béton recyclé (GBe) entraîne une diminution d'environ 14% de la densité du béton à l'état frais et durci. Cette baisse de densité s'explique par la plus grande porosité et la densité plus faible des GBe par rapport aux GN, caractéristiques typiques du béton recyclé. Ces observations sont aussi cohérentes avec des études antérieures montrant une absorption plus élevée des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels.

Les résultats révèlent que l'incorporation de sable fin dans le béton entraîne une augmentation de sa densité, tandis que le remplacement des granulats naturels par des granulats de déchet de brique ou de béton recyclé diminue la densité. Cette diminution est attribuée à la porosité plus élevée et à la densité plus faible des granulats alternatifs. Les observations sont soutenues par des recherches antérieures qui montrent des tendances similaires en termes de densité et de porosité des granulats.

3.2.3 Les résistances à la compression

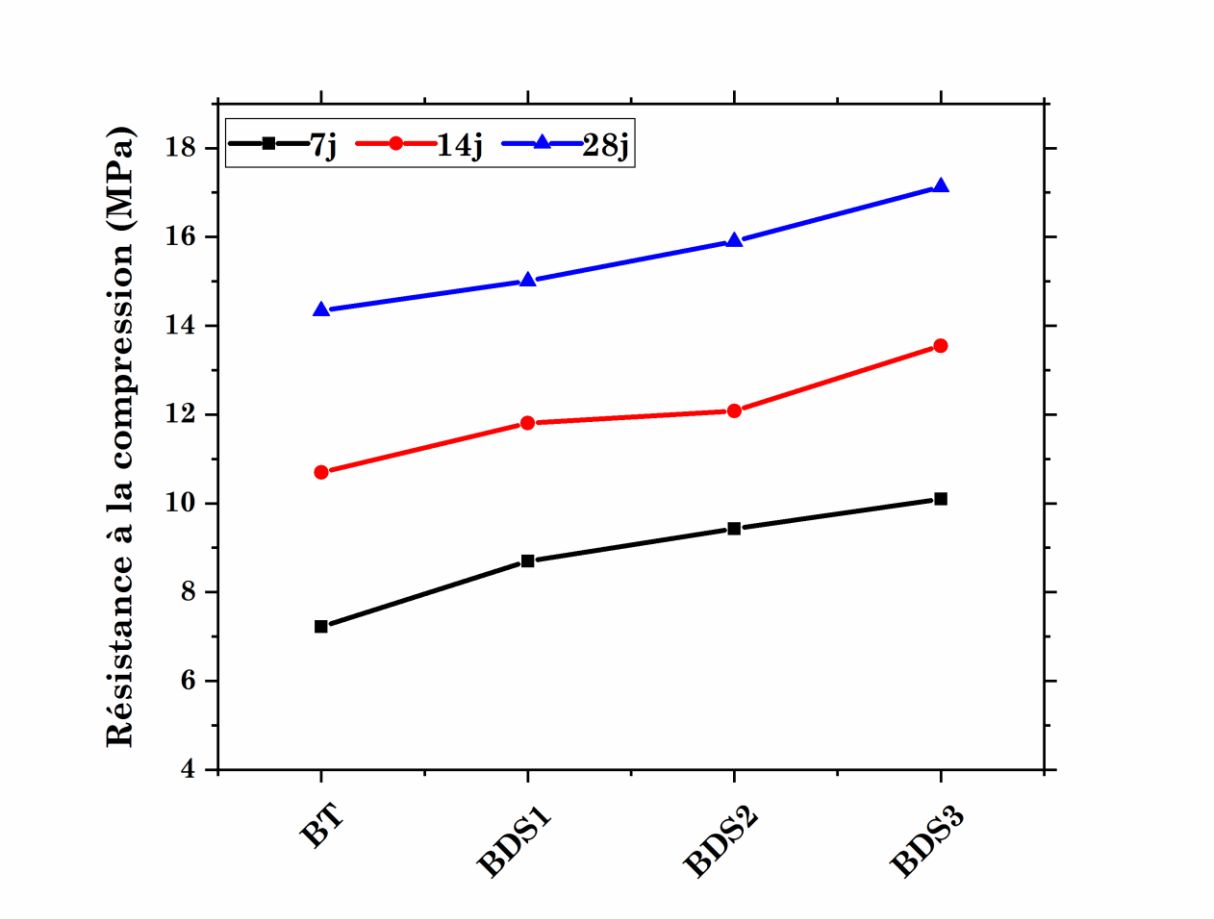


Figure 3.3 Évolutions de la résistance à la compression en fonction de type de béton

La figure 3.3 illustre l'évolution de la résistance à la compression de tous les mélanges aux âges de 7, 14 et 28 jours. On observe une augmentation de la résistance des bétons contenant 10% de granulats fins (sable) par rapport aux mélanges contenant uniquement des granulats naturels (GN), avec un taux d'augmentation d'environ 25%. L'augmentation de la résistance à la compression est principalement attribuable à la présence du granulat fin qui reste attaché aux GN. Cela s'explique par une meilleure liaison entre les granulats et la pâte de ciment ainsi qu'une diminution de l'indice de vide. En général, l'augmentation de la fraction de sable de 0% à 10% en poids des granulats grossiers améliore les propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression du béton perméable. Cela est dû à l'augmentation du volume de pâte de ciment recouvrant les surfaces des granulats [158]. Seeni, B. S., & Madasamy, M. [158] ont effectivement obtenu des résultats similaires.

Benalia et Boukria [178] ont observé que l'augmentation du remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés entraîne une diminution significative de la résistance à la compression du béton. Cette diminution peut atteindre environ 88% après 28 jours pour les bétons contenant 100% de granulats recyclés, en raison de la porosité élevée et de la qualité inférieure des granulats recyclés par rapport aux granulats naturels, ce qui limite la capacité du mélange à supporter des charges supplémentaires.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] trouvent aussi une diminution significative de la résistance à la compression des bétons contenant des granulats recyclés par rapport à ceux contenant des granulats naturels, avec une réduction d'environ 70%. Cette diminution est principalement due à la présence de mortier provenant du béton précédent qui reste attaché aux granulats recyclés, perturbant le processus d'hydratation du ciment et affaiblissant la structure du béton.

L’ajout de sable fin dans le béton améliore la résistance à la compression, grâce à une meilleure liaison entre les granulats et la pâte de ciment. En revanche, le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés diminue significativement la résistance à la compression, principalement en raison de la porosité accrue et de la qualité inférieure des granulats recyclés. Ces observations sont cohérentes avec les études antérieures, confirmant que l'optimisation de la composition granulométrique est cruciale pour améliorer les performances mécaniques du béton.

3.2.4 La résistance à la traction

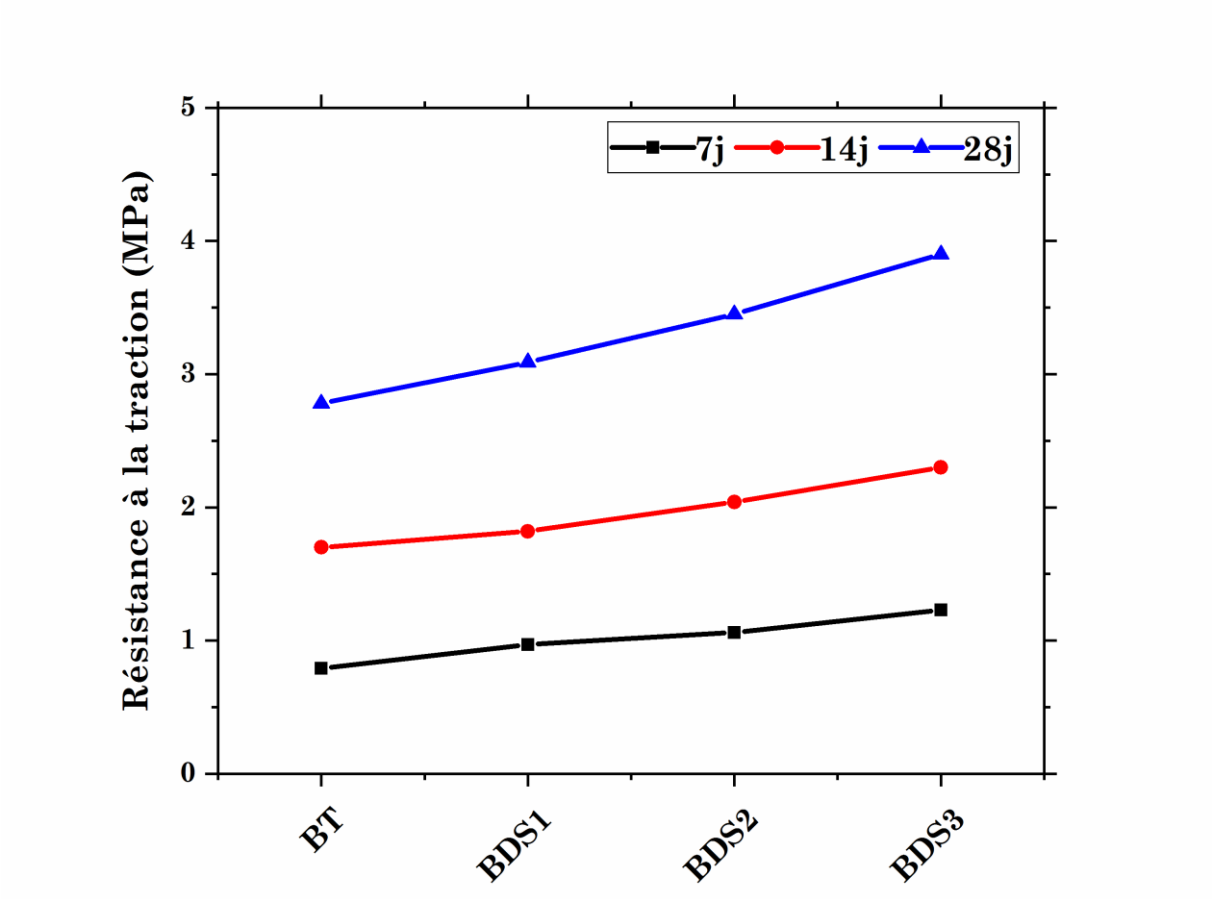


Figure 3.4 Évolutions de la résistance à la traction en fonction de type de béton

La figure 3.4 illustre de manière évidente une augmentation de la résistance à la traction avec l'augmentation de la teneur en granulats fins. La résistance à la traction des bétons fabriqués augmente de 2,78 MPa à 3,90 MPa par rapport au béton témoin (BT). Cette augmentation est principalement due à la réduction de la porosité du béton résultant de l'augmentation de la teneur en granulats fins. De plus, l'adhérence entre les granulats fins et la pâte de ciment est renforcée, ce qui se traduit par une résistance à la traction accrue. Seeni, B. S., & Madasamy, M. et al. [158] ont constaté que plus la proportion de granulat fin (sable) dans les bétons drainants est élevée, plus la résistance à la traction est élevée. Ces conclusions concordent avec nos propres constatations.

Benalia et Boukria [178] indiquent que l'ajout de granulats de déchet de brique (GBr) entraîne une baisse de la résistance à la traction pour des concentrations de GBr allant de 0 à 50%. Au-delà de cette proportion, la résistance à la traction se stabilise autour de 1,4 MPa après 28 jours. Cette observation est attribuée à l'effet de l'angularité et de l'enchevêtrement des granulats de GBr, qui devient plus significatif à des concentrations élevées en GBr.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] montrent que la résistance à la traction des bétons diminue à mesure que la teneur en granulats de béton recyclé (GBe) augmente. Par exemple, la résistance à la traction passe de 3,05 MPa à 1,39 MPa par rapport au béton témoin. Cette diminution est principalement due à l'augmentation de la porosité du béton causée par la présence croissante de GBe, ce qui réduit l'adhérence entre les granulats recyclés et la pâte de ciment, entraînant une résistance à la traction plus faible.

Les résultats indiquent que l'intégration de granulats fins dans le béton améliore la résistance à la traction, grâce à une meilleure adhérence entre les granulats et la pâte de ciment et une réduction de la porosité. En revanche, l'ajout de granulats de déchet de brique ou de béton recyclé entraîne une diminution significative de la résistance à la traction, principalement en raison de la porosité accrue et de la moindre qualité des granulats alternatifs. Ces observations sont cohérentes avec les études antérieures, confirmant l'importance de la composition granulométrique pour améliorer les performances mécaniques du béton.

3.2.5 Porosité connectée

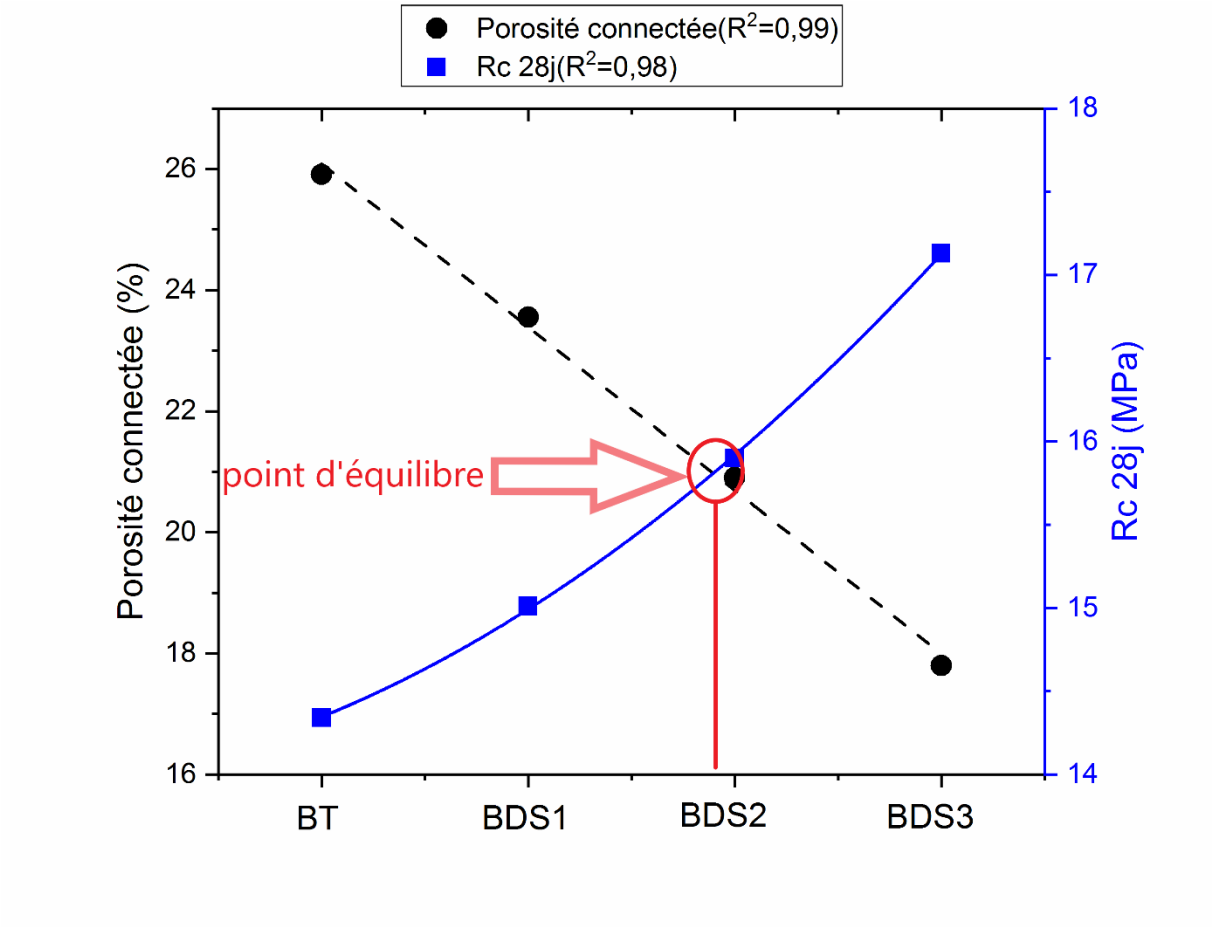


Figure 3.5 Évolutions de la porosité connectée et Rc 28j en fonction de types de béton

L'effet de l'ajout d'un pourcentage de granulats fins (sable) de différents types sur la porosité connectée et la résistance à 28 jours (Rc28j) est présenté dans la figure 3.5. Il a été observé qu'à mesure que les dimensions du sable devenaient plus fines, la porosité commençait à diminuer. Il a été noté que le mélange de granulats contenant du sable fin se caractérise par une faible porosité et une résistance élevée par rapport aux autres mélanges. Par conséquent, dans ce cas, les agrégats fins commencent à occuper l'espace entre les granulats naturels (GN).

Les études précédentes ont révélé que le béton auquel est ajouté un pourcentage de granulats fins a une porosité inférieure à celle du béton qui utilise uniquement des granulats naturels (gravier). Cependant, l'absence de granulat fin contribue à un indice de vide et à une perméabilité plus élevée du béton perméable. La porosité joue un rôle prédominant dans la description des propriétés du béton perméable [159].

Un point d'équilibre entre la porosité et la résistance est observé dans le mélange BDS2, qui contient du sable moyen. Le pourcentage de porosité atteint 21% et la valeur de résistance est de 16 MPa. Il existe donc une relation inverse entre eux, ce qui nous permet de conclure que le sable moyen est bon pour produire ce béton afin d'améliorer ses avantages.

Benalia et Boukria [178] indiquent que les mélanges avec des niveaux élevés de granulats de déchet de brique (GBr) présentent une porosité élevée et une faible résistance par rapport aux autres combinaisons. Un équilibre entre la porosité et la résistance est atteint lorsqu'environ 50% des GN sont remplacés par des GBr. Un remplacement total des GN par GBr entraîne une augmentation de la porosité ouverte de 17%.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] montrent que les mélanges contenant des proportions élevées de granulats de béton recyclé (GBe) présentent une porosité élevée et une résistance plus faible par rapport aux autres combinaisons. Cela suggère que l'augmentation de la quantité de granulats de béton recyclé peut affecter négativement la qualité du béton en augmentant sa porosité et en réduisant sa résistance.

L'introduction des granulats fins dans le béton réduit la porosité et augmente la résistance à 28 jours, en particulier lorsque du sable fin est utilisé. En revanche, l'utilisation de granulats de déchet de brique ou de béton recyclé augmente la porosité et diminue la résistance, bien que des équilibres puissent être trouvés à certains pourcentages de remplacement. Ces observations sont cohérentes avec les études antérieures, confirmant l'importance de la composition granulométrique et des types de granulats utilisés pour optimiser les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.

3.2.6 Perméabilité hydraulique :

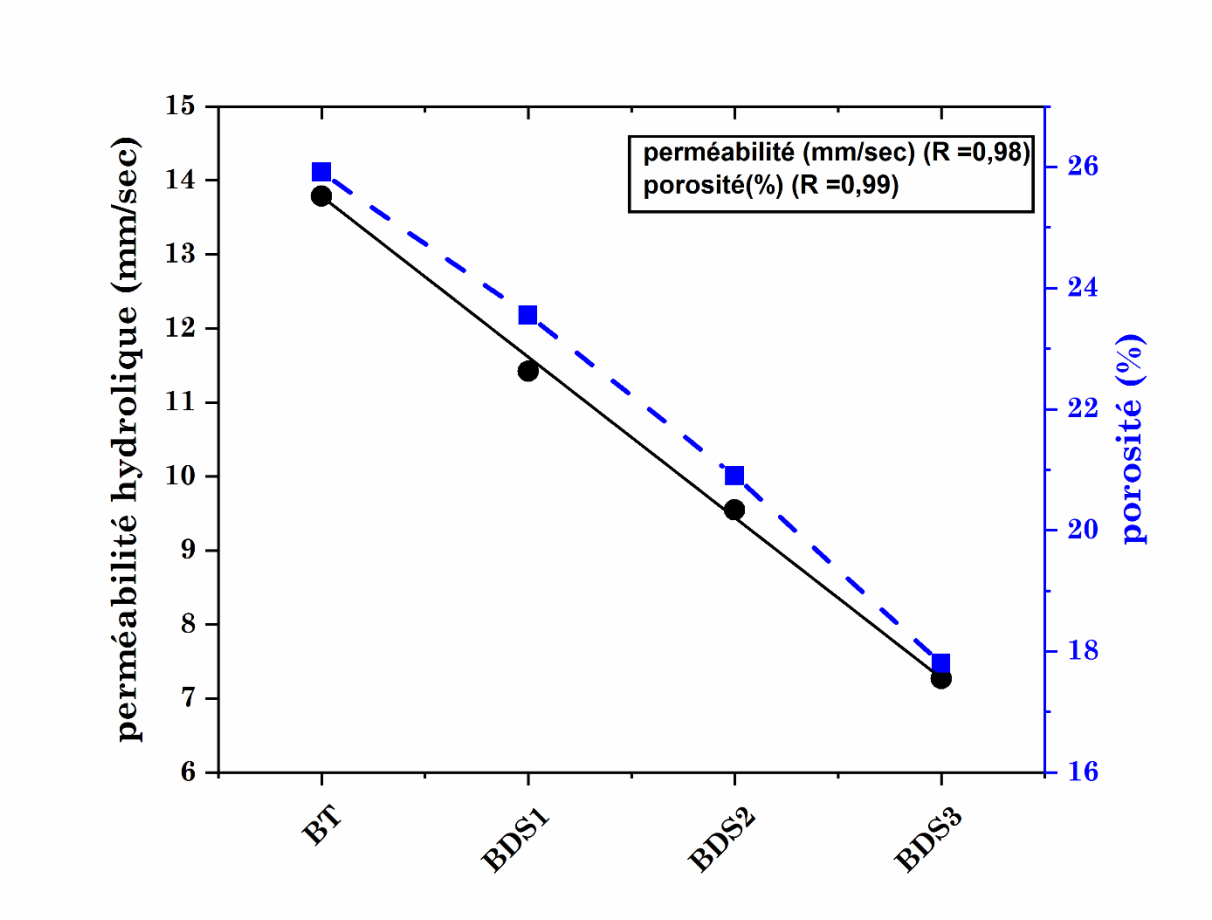


Figure 3.6 Perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de type de béton

La figure 3.6 présente la variation de la perméabilité hydraulique et de la porosité en fonction de la proportion croissante de granulat fin. On observe que l'augmentation du granulat fin entraîne une diminution des valeurs du coefficient de perméabilité et de la porosité effective. Certains chercheurs ont obtenu des résultats similaires [160]. On constate également que le béton drainant réalisé avec un excès d'environ 10% de sable par rapport au total des granulats permet d'obtenir une bonne perméabilité et une porosité effective acceptable. Ce résultat suggère que la perméabilité n'est pas uniquement liée à la porosité du système, mais est également affectée par la modification de la tortuosité du réseau poreux [161]. Des recherches ont montré que la porosité et la perméabilité du béton perméable diminuent avec l'augmentation de la teneur en sable [160].

Un bloc de béton perméable typique permettra à l'eau de passer à travers des débits supérieurs à 0,2 cm/s, tandis qu'un sable extra fin typique aura une perméabilité d'environ 0,02

cm/s. Lorsque le béton perméable est entièrement recouvert de sable, la perméabilité effective du système peut être réduite à environ 0,004 cm/s [162].

Benalia et Boukria [178] indiquent que les mélanges avec des niveaux élevés de granulats de déchet de brique (GBr) présentent une porosité élevée et une faible résistance par rapport aux autres combinaisons. Un équilibre entre la porosité et la résistance est atteint lorsqu'environ 50% des GN sont remplacés par des GBr. Un remplacement total des GN par GBr entraîne une augmentation de la porosité ouverte de 17%. Ces observations mettent en évidence l'impact significatif de la substitution de GN par GBr sur les propriétés de porosité et de résistance du matériau.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] indiquent aussi que l'augmentation des granulats de béton recyclé entraîne une diminution de la perméabilité du béton tout en augmentant sa porosité effective. Des chercheurs ont également observé des résultats similaires. En remplaçant environ 40% des granulats naturels par des granulats de béton recyclé, il est possible d'obtenir un béton drainant avec une bonne perméabilité et une porosité efficace acceptable, suggérant que la perméabilité dépend non seulement de la porosité mais aussi de la tortuosité du réseau poreux.

Les résultats indiquent que l'incorporation de granulats fins diminue à la fois la porosité et la perméabilité hydraulique, permettant d'obtenir une perméabilité et une porosité effective acceptables lorsqu'environ 10% de sable est ajouté. En revanche, l'utilisation de granulats de déchet de brique ou de béton recyclé augmente la porosité et réduit la perméabilité, bien que des équilibres puissent être trouvés à certains pourcentages de remplacement. Ces observations sont cohérentes avec les études antérieures, confirmant que la composition granulométrique et les types de granulats utilisés influencent de manière significative les propriétés de perméabilité et de porosité du béton.

3.2.7 Conductivité thermique :

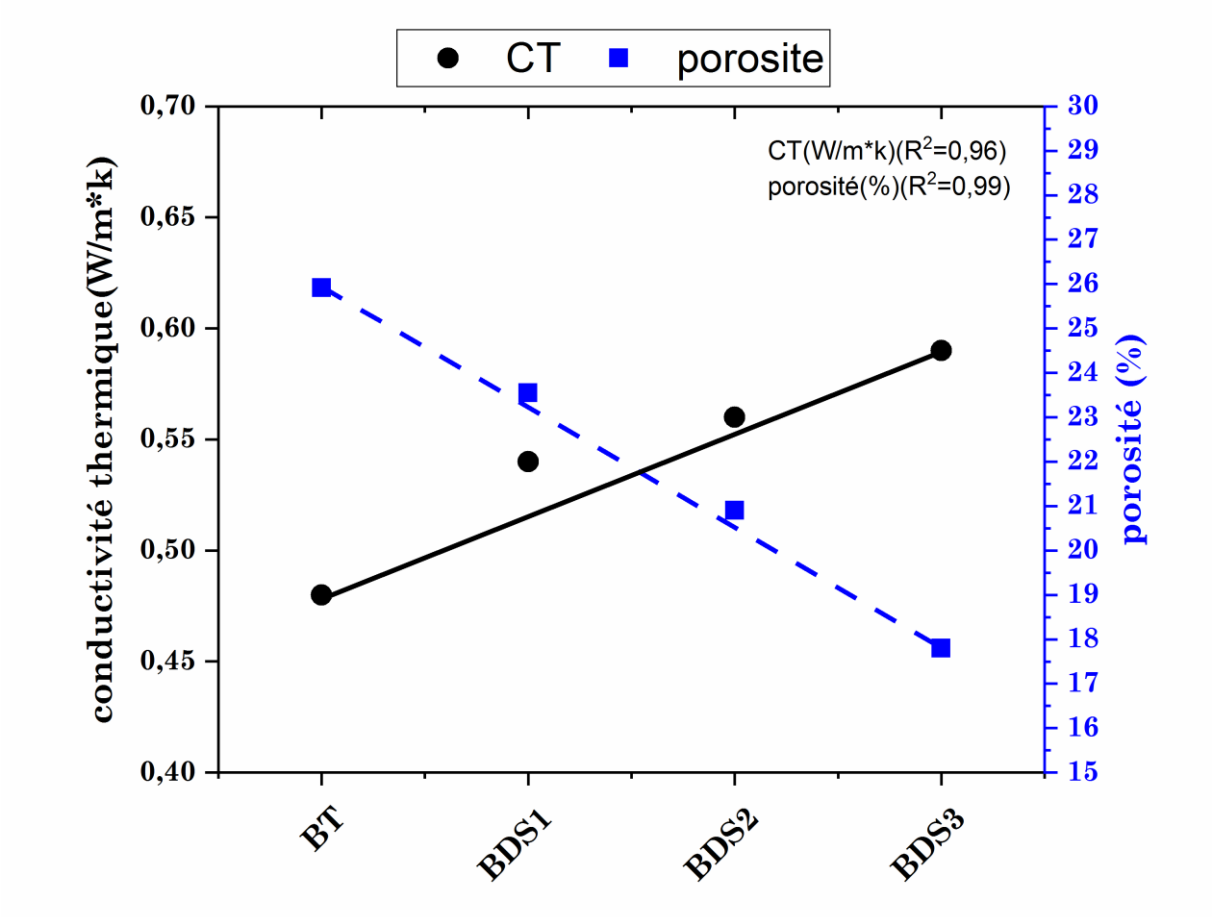


Figure 3.7 Evolution de la conductivité thermique et la porosité en fonction de type de béton

La figure 3.7 présente la variation de la conductivité thermique et de la porosité effective en fonction de l'augmentation du pourcentage de granulats fins. L'augmentation de la teneur en sable entraîne une diminution de la conductivité thermique et de la porosité du béton étudié. Le béton témoin présente une faible conductivité thermique, généralement inférieure à 0,1 W/m*K, ce qui en fait un matériau très efficace pour l'isolation thermique.

La conductivité thermique du béton drainant à base de sable est faible, ce qui en fait un matériau idéal pour l'isolation thermique. Cette propriété est influencée par la composition du béton, notamment l'utilisation de gravillons légers et d'argile expansée [163]. La conductivité thermique des bétons drainants est principalement liée à leur densité apparente. Pour améliorer les propriétés thermiques, il est nécessaire d'utiliser des matériaux présentant une porosité plus élevée, ce qui se traduit par une densité plus basse. En général, les bétons légers présentent des valeurs de conductivité thermique comprises entre 0,4 et 1 W/m.K à l'état sec [164].

Benalia et Boukria [178] indiquent que l'augmentation des proportions de granulats de déchet de brique (GBr) dans les bétons étudiés entraîne une diminution significative de la conductivité thermique et une augmentation de la porosité. Pour une substitution complète des granulats naturels (GN) par des GBr, la conductivité thermique diminue de plus de 90%, soit environ deux fois. Les résultats montrent qu'il existe un point d'équilibre entre la conductivité thermique et la porosité effective lorsque 50% des GN sont remplacés par des GBr.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] montrent aussi que l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé entraîne une diminution de la conductivité thermique et une augmentation de la porosité des bétons drainants étudiés. Ce phénomène est dû à une rétention accrue d'eau dans la matrice de béton, provoquant la formation de plus de pores au fil du temps. Ainsi, remplacer une grande partie des granulats naturels par des granulats de béton recyclé peut améliorer l'isolation thermique des bétons.

L'incorporation de granulats fins entraîne une diminution de la conductivité thermique et la porosité effective du béton drainant, ce qui en fait un matériau idéal pour l'isolation thermique. En revanche, l'utilisation de granulats de déchet de brique ou de béton recyclé augmente la porosité et réduit la conductivité thermique, bien que des équilibres puissent être trouvés à certains pourcentages de remplacement. Ces observations sont cohérentes avec les études antérieures, confirmant que la composition granulométrique et les types de granulats utilisés influencent de manière significative les propriétés thermiques et la porosité du béton.

3.2.8 Auscultation dynamique

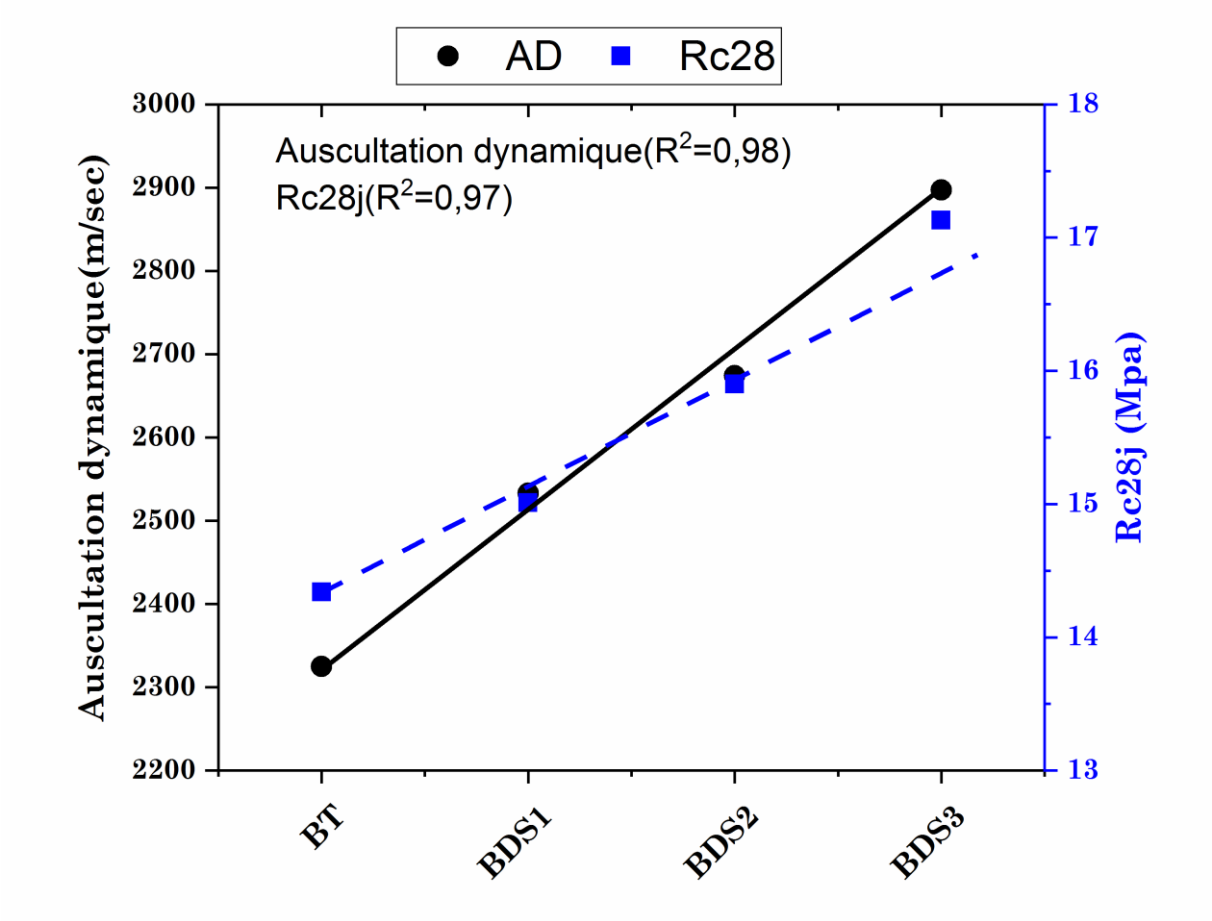


Figure 3.8 Auscultation dynamique et Rc28j en fonction de type de béton

La figure 3.8 présente l'évolution de l'auscultation dynamique et de la résistance à la compression à 28 jours. Les résultats montrent que l'ajout de sable entraîne une augmentation de la vitesse des ondes ultrasoniques et de la résistance à la compression. La vitesse des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression augmentent d'environ 24%. La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le béton caverneux est généralement plus faible que dans un béton traditionnel en raison de la porosité élevée du matériau. Cependant, l'utilisation de sable augmente la vitesse des ondes ultrasoniques [165], ces conclusions concordent avec nos propres constatations.

Benalia et Boukria [178] indiquent que l'ajout de granulats de déchet de brique (GBr) entraîne une diminution simultanée de la vitesse des ondes ultrasoniques et de la résistance à la compression. Pour des taux de substitution de 25 % et 100 %, cette diminution est respectivement de 22 % et 46 %.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] montrent aussi que l'ajout de granulats de béton recyclé (GBe) dans le béton entraîne une baisse significative à la fois de la vitesse des ondes ultrasoniques et de la résistance à la compression, réduisant ces paramètres d'environ 40%.

Les résultats démontrent que l'ajout de sable dans le béton caverneux améliore à la fois la vitesse des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression, ce qui confirme l'effet bénéfique de l'utilisation de granulats fins pour renforcer les propriétés mécaniques du béton.

À l'inverse, l'ajout de granulats de déchet de brique ou de béton recyclé réduit ces deux paramètres, soulignant les défis posés par l'utilisation de matériaux recyclés. Ces observations sont cohérentes avec les études précédentes, mettant en évidence l'influence significative des types de granulats sur les propriétés mécaniques et dynamiques du béton.

3.2.9 Résistance à l'abrasion

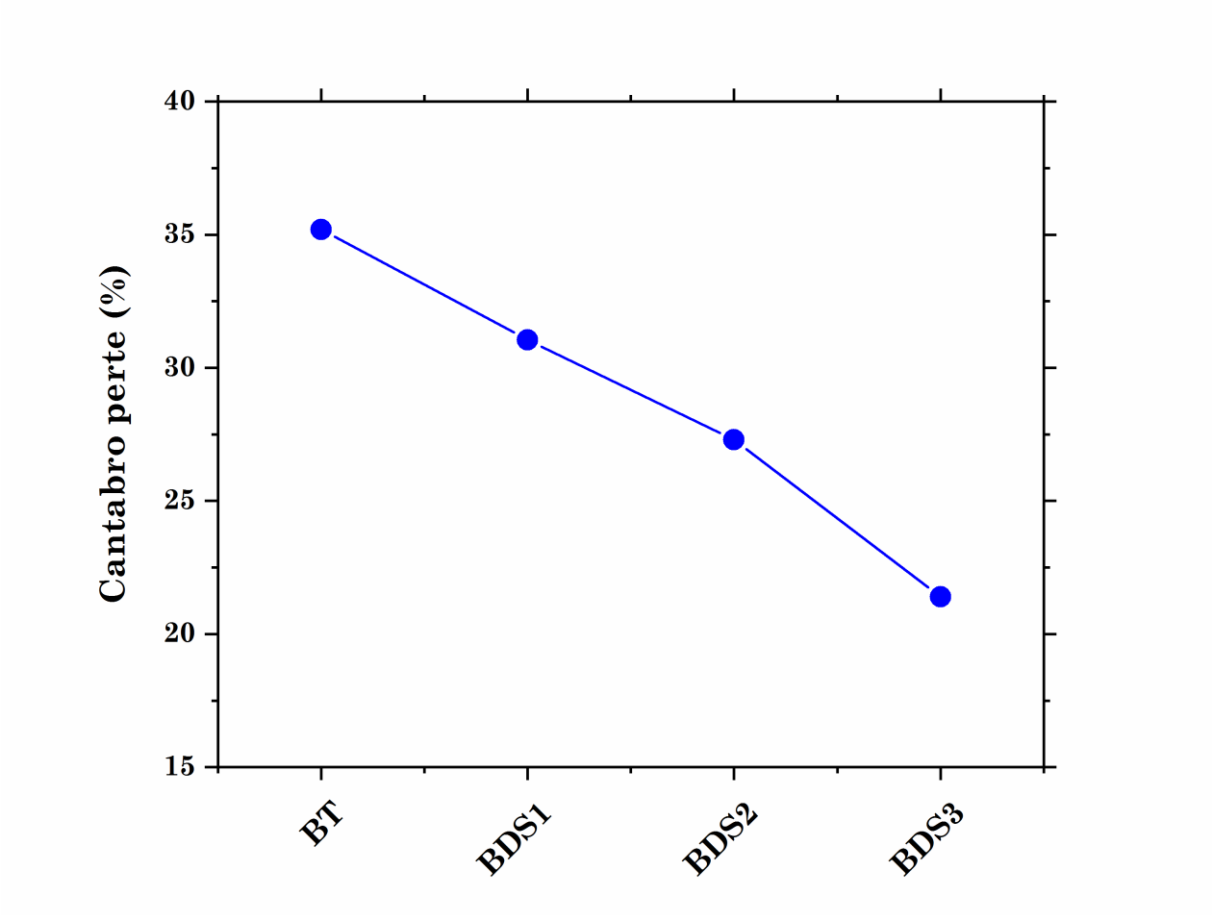


Figure 3.9 La résistance à l'abrasion en fonction des bétons étudiés

La figure 3.9 présente la variation de la résistance à l'abrasion des différents bétons étudiés, évaluée par l'essai Cantabro. L'essai Cantabro a révélé une diminution de la perte de matériaux et de la corrosion du béton à chaque fois que le type de sable était remplacé par du

sable fin, en raison de la quantité de mortier adhérant. Des résultats similaires ont été rapportés par Setti, F., Ezziane, K., & Setti, B. [165].

Le sable fin et les sables avec des grains plus gros semblent les plus prometteurs pour améliorer la résistance à l'abrasion du béton, tout en gardant à l'esprit l'importance de la résistance à la compression et l'effet bénéfique potentiel des fibres [165].

Il est également important de souligner que la qualité de la pâte est le facteur prédominant pouvant affecter la résistance à l'abrasion [166]. Étant donné que nous avons maintenu le dosage de ciment et le rapport E/C constants, la nature des granulats utilisés aura un impact sur la résistance à l'abrasion dans notre cas.

Benalia et Boukria [178] ont révélé que des concentrations plus élevées en granulats de déchet de brique (GBr) entraînaient une faible perte de matériaux, indiquant une meilleure résistance à l'abrasion des bétons étudiés. Cela suggère que l'ajout de GBr peut améliorer la résistance à l'abrasion des matériaux testés, avec la qualité de la pâte et la nature des granulats utilisés jouant un rôle crucial dans ce processus.

Kerbouci et Ben Baba Ali [179] observent aussi une diminution minime de matériau pour des concentrations plus élevées de granulats de béton recyclé (GBe). Cette observation s'explique par une plus grande quantité de mortier adhérant aux granulats, ce qui contribue à une meilleure résistance à l'abrasion.

Il existe une grande différence entre l’ajout de sable et le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés, car le sable améliore les propriétés mécaniques, notamment la résistance à l'abrasion, contrairement aux granulats recyclés. C'est ce qui a été découvert lors de recherches précédentes [178][179].

3.2.10 Relation entre la porosité connectée et la résistance

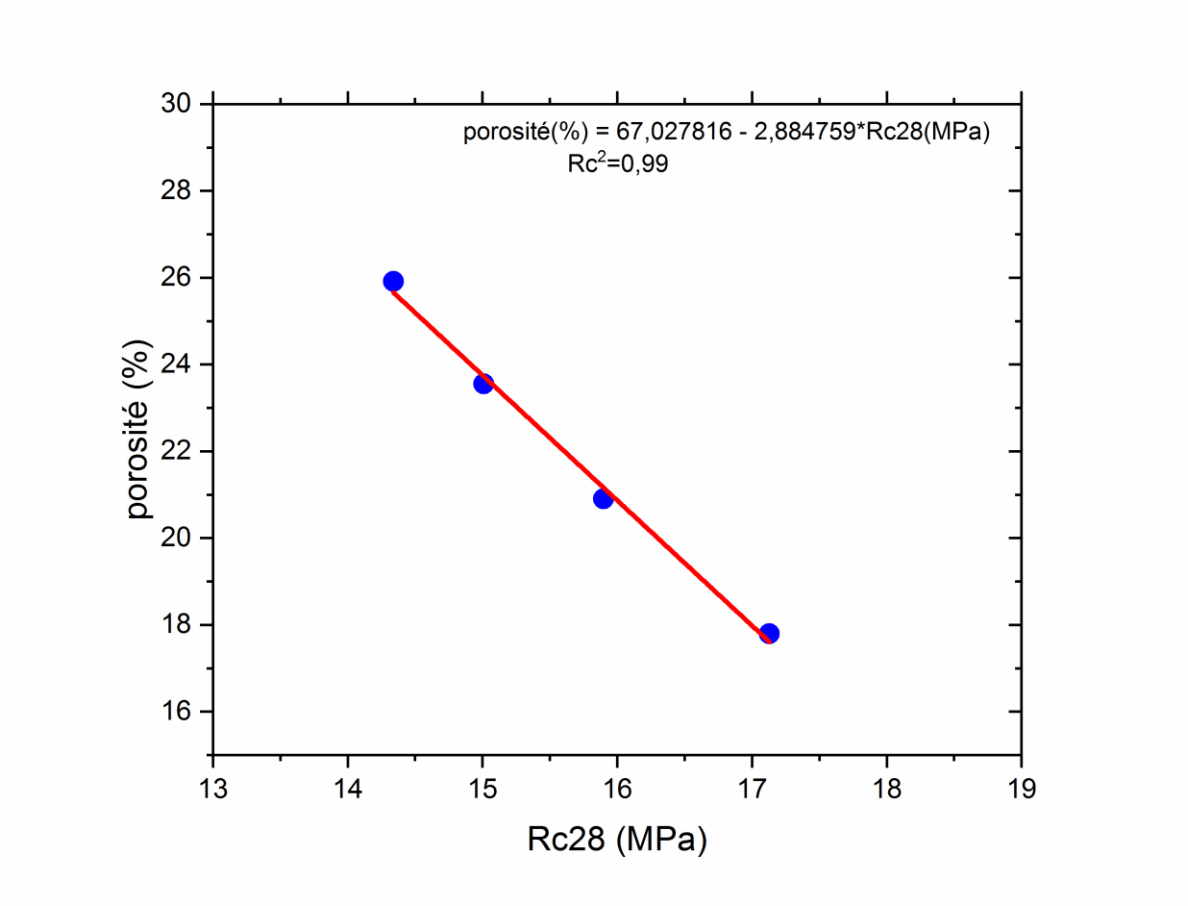


Figure 3.10 Corrélations entre la porosité connectée et Rc_{28}

Une corrélation significative a été établie entre la porosité connectée et la résistance à la compression à 28 jours (R^2=0,99), comme illustré dans la figure 3.10. La porosité ouverte est directement liée à la résistance en compression, ce qui reflète les caractéristiques intrinsèques du béton résultant de sa composition [167]. En d'autres termes, une porosité plus faible correspond généralement à une résistance en compression plus élevée, indiquant un matériau plus dense et plus robuste.

D'autres études ont également obtenu des résultats similaires aux nôtres, confirmant l'existence d'une relation inverse entre la porosité et la résistance à la compression [168], [169]. Ces études montrent de manière cohérente que l'augmentation de la porosité diminue la résistance du béton, soulignant l'importance de contrôler la porosité pour obtenir des performances mécaniques optimales.

Le sable joue un rôle crucial dans cette relation, car il améliore les propriétés mécaniques du béton. Contrairement aux granulats recyclés, l'ajout de sable réduit la porosité et augmente la résistance à la compression [178], [179]. Ainsi, l'utilisation de sable comme granulat fin est bénéfique pour renforcer la structure du béton et optimiser ses performances.

3.2.11 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique

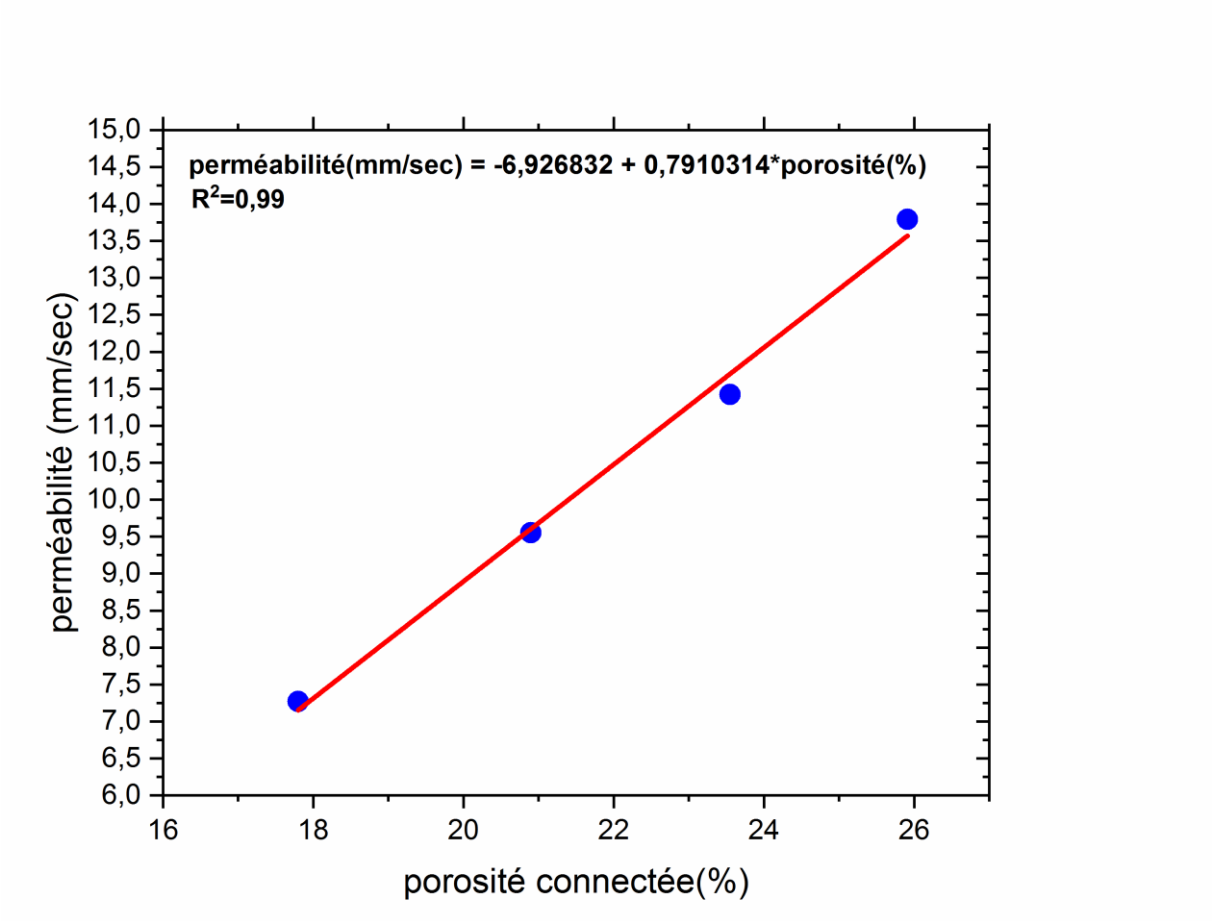


Figure 3.11 Corrélation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique.

Les résultats obtenus ont mis en évidence une corrélation très significative entre la perméabilité hydraulique et la porosité effective, avec un coefficient de détermination (R^2 = 0,99). Cette étude a révélé que l'augmentation de la porosité a un impact négatif sur la perméabilité hydraulique. Cette relation s'explique par le fait que la porosité effective, qui mesure les pores interconnectés dans le matériau, influe directement sur la capacité d'écoulement de l'eau à travers le béton.

Dans notre cas, l'analyse granulométrique a montré que les granulats fins, tels que le sable, ont une granulométrie plus fine par rapport aux granulats naturels (GN), ce qui peut

influencer la taille et la connectivité des pores. De plus, l'angle et la texture fine des grains de sable jouent un rôle crucial dans la perméabilité hydraulique du béton.

Benalia et Boukria [178] ainsi que Kerbouci et Ben baba ali [179] ont également observé une forte corrélation entre la perméabilité hydraulique et la porosité effective, avec un coefficient de détermination (R^2) autour de 0,88 dans leurs études respectives. Cela confirme que la porosité effective est un facteur clé qui détermine la perméabilité hydraulique du béton, influençant ainsi sa capacité à laisser passer l'eau à travers ses pores interconnectés.

3.2.12 Relation entre la densité et la résistance

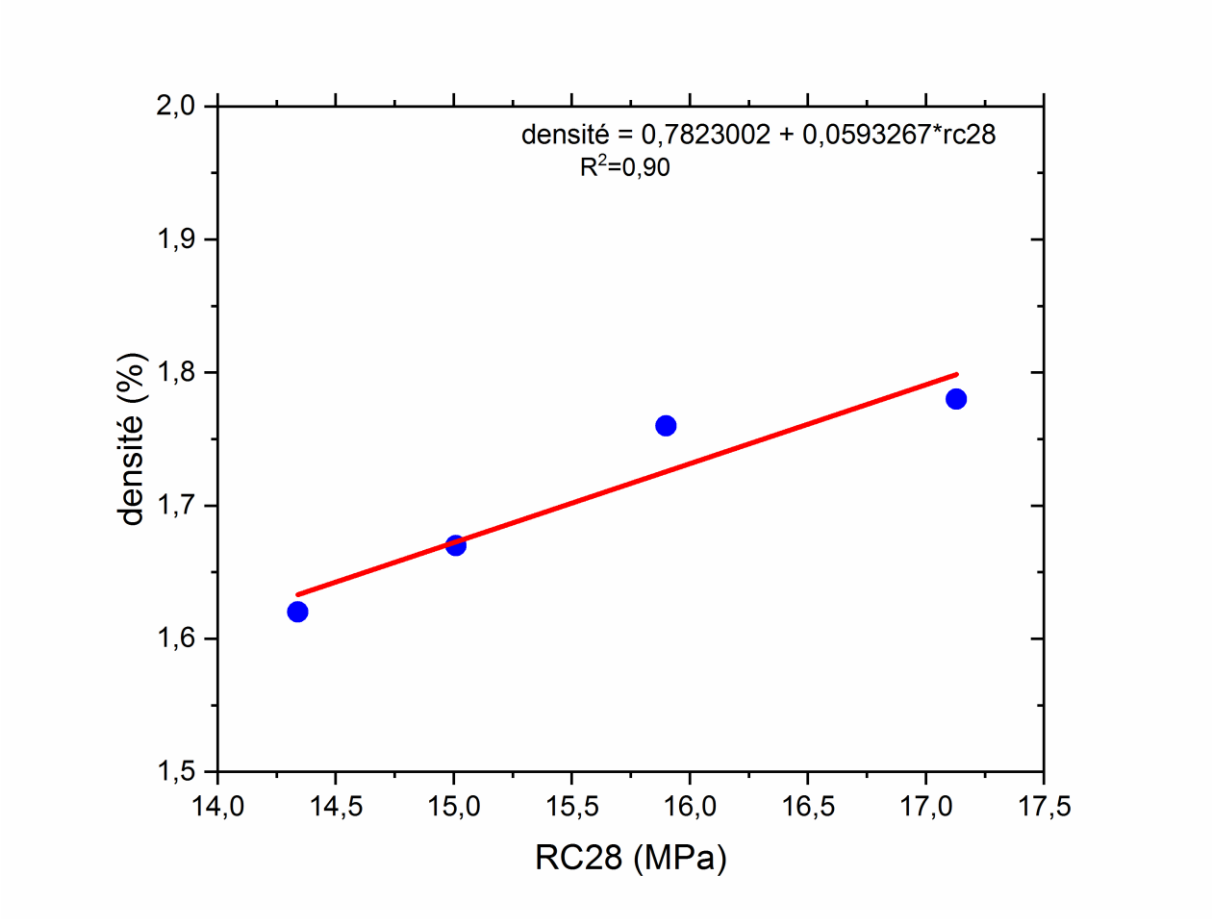


Figure 3.12 Corrélation entre la densité et la résistance à la compression

La figure 3.12 illustre une relation linéaire significative entre la densité et la résistance à la compression, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,90. Cette observation peut être expliquée par le fait que la résistance à la compression des granulats est généralement 1,5 à 2

fois supérieure à celle du béton lui-même, tandis que les granulats légers présentent une résistance nettement inférieure à celle du béton.

Cette corrélation permet ainsi de prédire la résistance à la compression des bétons étudiés à partir de leur densité à l'état durci. Une augmentation de la densité réduit la porosité interne du béton et renforce la cohésion entre les granulats, ce qui se traduit par une amélioration de la résistance à la compression. Des études antérieures ont également montré que la résistance à la compression augmente avec la densité accrue des bétons [170, 171].

Benalia et Boukria [178] ont également constaté une corrélation significative entre la porosité connectée d'un matériau, probablement du béton, et sa résistance à la compression après 28 jours. Cela suggère que la quantité de pores ouverts dans le matériau peut influencer sa capacité à résister à des forces de compression, ce qui est souvent lié aux propriétés intrinsèques de sa composition. Kerbouci et Ben baba ali [179] ont confirmé cette observation en montrant qu'il existe une corrélation notable entre la porosité connectée du matériau et sa résistance à la compression après 28 jours, avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,94.

En outre, l'ajout de sable dans le béton tend à augmenter le rapport entre densité et résistance à la compression, contrairement aux bétons contenant des granulats recyclés. Cette conclusion est soutenue par des études antérieures [178, 179], mettant en évidence que le type de granulat utilisé influence directement les propriétés mécaniques du béton, y compris sa résistance à la compression.

3.2.13Relation entre la densité et la conductivité thermique

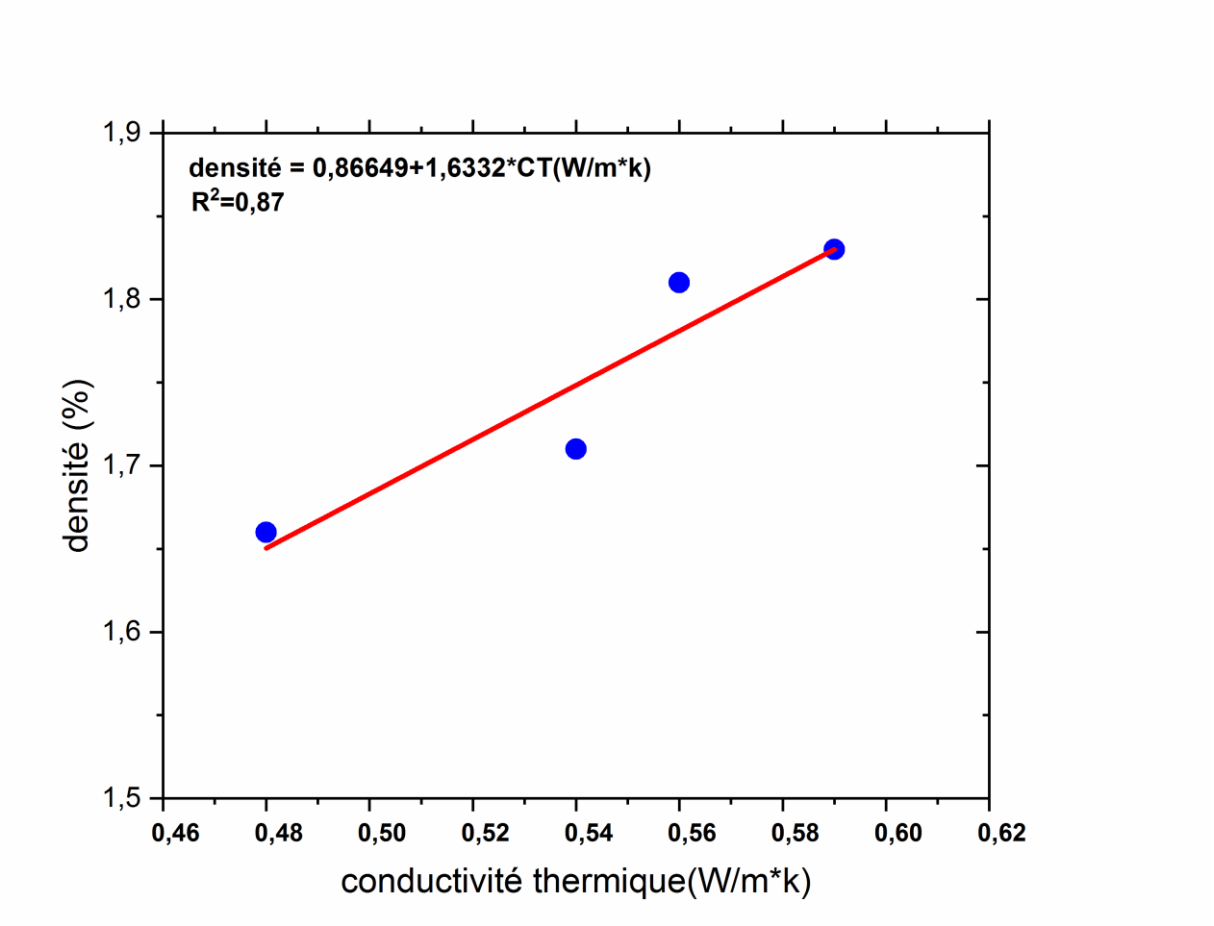


Figure 3.13 Relation entre la densité et la conductivité thermique

D'après la figure 3.13, une corrélation linéaire très significative est observée entre la conductivité thermique et la densité du béton. Cette corrélation permet de prédire la densité du béton à partir de la mesure de sa conductivité thermique. Typiquement, les bétons légers présentent une conductivité thermique comprise entre 0,4 et 1 W/m·K à l'état sec [172]. Dans notre étude, les valeurs de conductivité thermique des bétons formulés varient entre 0,48 et 0,59 W/m·K, ce qui démontre une performance satisfaisante en termes d'isolation thermique.

La conductivité thermique du béton drainant à base de sable est fortement influencée par la composition et la proportion de sable utilisées. Une faible conductivité thermique en fait un matériau idéal pour réguler les températures dans les bâtiments. Cependant, d'autres facteurs comme la nature minéralogique spécifique du sable peuvent également jouer un rôle crucial [173]. Ces conclusions sont en accord avec d'autres études antérieures [174, 175], qui ont également souligné l'importance de la composition des matériaux dans la régulation thermique des bétons.

3.2.14 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique

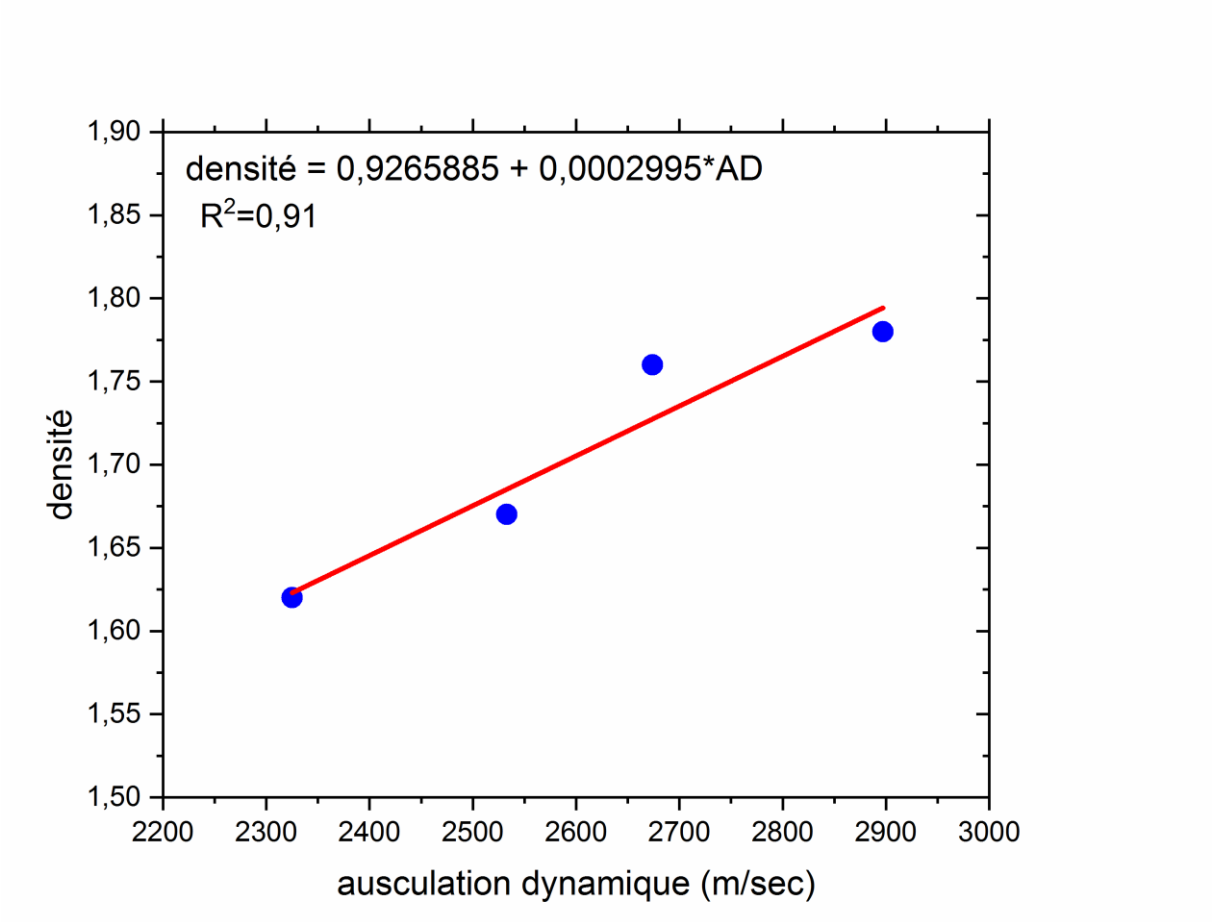


Figure 3.14 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique

La figure 3.14 met en évidence une corrélation très significative entre la densité du matériau et l'auscultation dynamique. Cette relation est analogue à celle observée entre la densité et la résistance à la compression. Ainsi, l'auscultation dynamique permet une prédiction fiable de la densité du matériau. Ces observations sont corroborées par des résultats similaires obtenus par [176] et [177].

De plus, ces résultats confirment que le volume des vides et la porosité jouent un rôle crucial dans la propagation des ondes ultrasoniques [178]. Benalia et Boukria [178] ainsi que Kerbouci et Ben baba ali [179] ont également mis en évidence une forte corrélation linéaire entre la densité d'un matériau et sa résistance à la compression, renforçant ainsi l'importance de la densité comme indicateur clé des propriétés mécaniques du béton.

Conclusions générales et recomandations

Conclusion générale et recommandations

Le but de cette étude est d'estimer les particules fines de granulats dans la production de béton préfabriqué, en utilisant trois types de sable différents, avec un taux de substitution de 10% du granulat total.

À la lumière des résultats de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être résumées :

- L'augmentation du sable augmente la densité du béton d'environ 12,5 %.
- Le mélange avec du sable fin présente moins de porosité que les autres mélanges avec du sable moyen et grossier, qui ont plus de porosité que le sable fin.
- Une diminution de l'ouvrabilité du béton a été observée avec l'augmentation du sable. Il est nécessaire d'utiliser une quantité supplémentaire de super plastifiant pour faciliter la comparaison entre les mélanges de béton.
- Une diminution d'environ 47% de la perméabilité hydraulique est observée lorsque l'on augmente le sable.
- La conductivité thermique augmente à mesure que les grains de sable deviennent plus fins.
- Les mélanges contenant du sable présentent une bonne résistance à l'abrasion.
- On observe qu'il existe une relation équilibrée entre porosité et résistance mécanique lorsque du sable moyen est ajouté.
- Une augmentation de 10 % du sable moyen permet d'obtenir un équilibre entre porosité, conductivité thermique et résistance mécanique.
- Il a été observé qu'il existait des corrélations significatives entre la perméabilité, la résistance à la compression et la porosité continue du béton étudié.
- Une augmentation d'environ 50 % de la vitesse des ultrasons est constatée en corrélation avec l'augmentation de la finesse du sable.
- L'accroissement de la finesse du sable se traduit par une augmentation de la résistance mécanique, à la fois en compression et en traction.
- Les résultats obtenus ont montré de bonnes corrélations entre résistance à la compression, conductivité thermique, auscultation dynamique et densité du béton étudié.

Dans ce travail de recherche, il a été observé que l'incorporation de sable fin dans le béton améliore significativement plusieurs aspects de son comportement mécanique, notamment en augmentant la résistance à la compression, à la traction et la conductivité thermique, tout en réduisant la porosité et la perméabilité hydraulique. Ces améliorations sont souvent attribuées à une meilleure adhérence entre les granulats fins et la pâte de ciment, ce qui diminue les vides et améliore la densité du matériau.

Les études précédentes ont également exploré ces aspects, mettant en évidence l'impact positif de certains types de granulats recyclés sur les propriétés du béton drainant. En résumé, ces recherches convergent vers l'idée que l'ajout de sable fin peut considérablement renforcer la résistance et la durabilité du béton en modifiant favorablement des caractéristiques essentielles comme la densité et la compacité. Cela souligne ainsi l'importance du choix des agrégats pour optimiser les performances du béton afin de répondre aux exigences spécifiques de la construction.

Les travaux de recherche devraient se concentrer sur l'effet spécifique du sable sur les propriétés des bétons drainants, en approfondissant les investigations pour mieux comprendre l'impact de l'incorporation de sable sur la porosité, la résistance mécanique et la durabilité de ces matériaux. Il serait donc pertinent de :

- Étudier les effets de diverses tailles de particules de sable sur les propriétés du béton drainant pour identifier la granulométrie optimale.
- Investiguer l'utilisation d'adjuvants pour améliorer la compatibilité entre le ciment, le sable et les granulats afin d'optimiser la résistance et la durabilité du béton.
- Effectuer des études sur la durabilité du béton drainant avec ajout de sable pour comprendre son comportement face aux cycles de gel-dégel, à l'abrasion et à d'autres conditions environnementales.
- Explorer les applications spécialisées du béton drainant avec sable dans des domaines tels que la construction routière, les revêtements de sols industriels et les structures hydrauliques.
- Étudier les aspects environnementaux et l'empreinte environnementale du béton drainant avec ajout de sable en termes de recyclabilité des matériaux, d'efficacité énergétique et d'impact sur l'environnement.

Référence bibliographique

Références bibliographiques

[1] U.S. EPA, “Overview Of The Storm Water Program,” *United States Environ. Prot. Agency*, vol. Office of, no. June, p. EPA 833-R-96-008, 1996.

[2] “Pervious Concrete | Perivous Concrete Application | | Properties Of Pervious Concrete - Civiconcepts.” .

[3] F. I. S. R. W. G. (US), *Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices*. National Technical Info Svc, 1998.

[4] ADEME, "Guide des déchets de chantiers de bâtiment", Paris, (1998).

[5] Ct. G10.30 : « Composition du béton », consulté le 07/02/18

[6] R. Scientifique, “Magister Option : Structures et Matériaux Par,” 2009.

[7] D. K. Kibenga, O. BONNEAU, R. GAGNÉ, and S. MOHAMMED, ―Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorées.‖ Université de Sherbrooke, 2013.

[8] figure/Procede-de-fabrication-du-ciment-portland-par-voie-s-eche 29_fig5_336319573

[9] “Standard XP P18-540.” .

[10] A. Charef, “La problématique des granulats au Maroc,” Push-butt. Publ., 2007.

[11] Ct. G10.30 : « Composition du béton », consulté le 07/02/18

[12] Thior, M., Sané, T., Sy, O., Descroix, L., Ndiaye, L. G., Sambou, A. K., ... & Solly, B. (2019). Caractéristiques granulométriques et dynamique sédimentaire entre les différentes unités géomorphologiques du littoral de la Casamance (Sénégal). revue ivoirienne des sciences et technologies.

[13] caractéristiques+et+types+de+granulats.&rlz=1C1YTUH_frDZ1058DZ1058&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjm6bTF7on_AhUWPOwKHbWeBaoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=657&dpr=1#imgrc=iaJNwBqcIC3_0M

[14] constitution des bétons et des mortiers située du site (GT-GT 10-30-41-PDF)

[15] Daddy kabagire kibenga ,sherbrooke (québec) canada 20/3.

[16] "Pervious Pavement :: Pervious Concrete for Green, Sustainable Porous and Permeable Stormwater Drainage ::" .

[17] C. Aggregates, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete 1," vol. 04, pp. 1–9, 2001.

[18] M. A. Bury, C. A. Mawby, and D. Fisher, "Making pervious concrete placement easy using a novel admixture system," Concr. Focus, vol. 5, no. 3, pp. 55–59, 2006.

[19] "Les adjuvants - ABC-MACONNERIE." .

[20] HANSEN.TC. (1992) ―Recycling aggregates end recycling aggregate and masonry‖, RILEM Report N° 06, LONDON, E & FN, SPON.

[21] TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO.K , HASBA. S. (1984) ―Applicability of recycled concrete aggregate as in aggregate for concrete pavement‖. Transaction of the Japan concrete institute, Vol6, pp.133-140.

[22] G.Dreux et J.Festa : « Nouveau guide du béton drainant ». Edition Eyolles ; 320 pages.

[23] VERS UNE COMPOSITION OPTIMALE DES BÉTONS ROUTIERS.

[24] Pierre charon : « Calcul des ouvrages en béton armé suivant les règles de BAEL83 », 1983.

[25] Khouadjia, M., Mezghiche, B., & Drissi, M. (2015, October). ETUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUES DES BÉTONS À BASE DES SABLES DE CARRIERE MODIFIES AVEC SABLE DE DUNE ET SABLE D'OUED: EXPÉRIMENTATION ET NUMÉRISATION. In *The 3rd International Workshop on Waste Management and Sustainable Development*.

[26] TORIL, KAWAMURA. M, TAKEMOTO.K , HASBA. S. (1984) ―Applicability of recycled concrete aggregate as in aggregate for concrete pavement‖. Transaction of the Japan concrete institute, Vol6, pp.133-140.

[27] Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées(1994): Béton de sable, Caractéristiques et pratique d'utilisation ; Projet " SABLOCRETE ", mémoire de présentation.

[28] D. Kabagire K. : « Nouvelle approche des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorés », Mars 2013

[29] G. Dreux and J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constitutants. Eyrolles, 1998.

[30] Y. MALIER, Les bétons à haute performance, caractérisation, durabilité et applications, Presse de. 1992.

[31] C. S. de A. & A. W. T. M. J. ESTEFANO de OLIVEIRA, ―Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate,‖ Université Estadual Paulista, Brazil.

[32] J.P. GONÇALVES & ALL, Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars, Cement & C. 2007.

[33] Neptune, A. I., 2008, Investigation of the effects of aggregate properties and gradation on pervious concrete mixtures, Master of Science Thesis in Civil Engineering, Clemson University, South Carolina, United States,177p.

[34] Park, J. H., Jeong, S. T., Bui, Q. T., & Yang, I. H. (2022). Strength and permeability properties of pervious concrete containing coal bottom ash aggregates. *Materials*, *15*(21), 7847.

[35] Ghafoori & Dutta, 1995.

[36] Crouch, L. K., Pitt, J. & Hewitt, R., 2007, Aggregate effects on pervious portland cement concrete static modulus of elasticity, Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 19, no. 7, pp. 561-67.

[37] Schaefer, V. R. & Kevern, J. T., 2011, An Integrated Study of Pervious Concrete Mixture Design for Wearing Course Applications, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Iowa, 158p.

[38] Bonicelli, A., Giustozzi, F., & Crispino, M. (2015). Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. *Construction and Building materials*, *91*, 102-110.

[39] Seeni, B. S., & Madasamy, M. (2021). A review of factors influencing performance of pervious concrete. *Građevinar*, *73*(10.), 1017-1030.

[40] BOUCHARD. M, (1984) ―Utilisation en technique routière de granulats provenant du concassage de béton de démolition ‖. Bulletin liaison laboratoire pont et chaussé, n° 134, Réf 2852, pp.53-57

[41] López, E. (2010). Control de calidad y colocación de concretos permeables. Propiedades del concreto permeable (Tesis de Pregrado). Universidad Autónoma de México, México D.F.

[42] Flores, C. & Pacompia, I. (2015). Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos f'c 175 kg/cm2 en la ciudad de Puno (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

[43] Sánchez-Mendieta, C., Galán, J. J., & Martinez-Lage, I. (2021). Physical and hydraulic properties of porous concrete. *Sustainability*, *13*(19), 10562

[44] Haselbach, L. M., Valavala, S., & Montes, F. (2006). Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of environmental management*, *81*(1), 42-49.

[45] D. K. Kibenga, O. BONNEAU, R. GAGNÉ, and S. MOHAMMED, “Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorées.” Université de Sherbrooke, 2013.

[46] J. T. Kevern, V. R. Schaefer, K. Wang, and M. T. Suleiman, “Pervious concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability,” J. ASTM Int., vol. 5, no. 2, 2008, doi: 10.1520/JAI101320.

[47] M. Academique, “Elaboration et étude d’un béton drainant Présenté,” 2019.

[48] Seeni, B. S., & Madasamy, M. (2021). A review of factors influencing performance of pervious concrete. *Građevinar*, *73*(10.), 1017-1030

[49] Cisse I., Laquerbe M. (mars 1999): Caractérisation des bétons de sable routiers compactés: application a cas du Sénégal ; Matériaux et construction ; volume 32 ; pp.151-157.

[50] Robu I., Jauberthie R.,CisseI.,Achoura D. (2005) : Comportement des bétons de sable en milieu sulfatique. Algérie Equipement

[51] Ghafoori, N. and S. Dutta, Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995: 7(3): p. 183-191.

[52] Nguyen, V.C., Nghien cuu che tao be tong rong cho cac cong trinh do thi cong cong mot vat lieu than thien cua moi truong. Research paper. Dai hoc quoc gia thanh pho ho chi minh truong dai hoc bach khoa, 2008. [Basic research about environmentally friendly materials for construction'. Research paper. National University of Ho Chi Minh City University of Technology, 2008 - my translation.

[53] Nguyen, N.T., et al., Porous concrete - preliminary research in Vietnam. The 2004 International Symposium on Advanced Science and Engineering, 2004: p. 415-418

[54] Huang B, Wu H, Shu X, Burdette EG. Évaluation en laboratoire de la perméabilité et de la résistance du béton perméable modifié aux polymères. Construire Build Mater 2010;24(5):818–23.

[55] X. Régal, “Caractérisation du comportement en traction du béton sous fortes sollicitations: essais de flexion trois points aux barres de Hopkinson.” Université d’Orléans, 2016.

[56] “Norme NF EN 12390-6.” .

[57] “Éprouvettes et résistance : les contrôles qualité sur béton durci | Concrete Dispatch.” .

[58] Pierre Charon : « Le calcul et la vérification des ouvrages en béton armé », 1983.

[59] RANDRIANASOLO Sedera : « Essai de Formulation des Bétons en Fibres de Paille de riz », mémoire de diplôme de Master II en Science et Ingénierie de Matériaux, Ecole Supérieur Polytechnique, Université d‘Antananarivo, 2014.

[60] rabenandrasanaNorokantoM_ESPA_MAST_18.pdf.

[61] Na Jin, B. E. (2010). Fly Ash Applicability in Pervious Concrète. Master's of science in civil engineering, School of The Ohio State University, Ohio, 1-186 p.

[62] Q. Dong, H. Wu, B. Huang, X. Shu, and K. Wang, ―Investigation into laboratory abrasion test methods for pervious concrete,‖ J. Mater. Civ. Eng., vol. 25, no. 7, pp.886–892, 2013.

[63] NLT-352/86 Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.‖

[64] Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.‖.

[65] DIN EN 12697-17 - European Standards.‖.

[66] Tennis, P.D., M.L. Leming, and D.J. Akers, Pervious concrete pavements. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, & National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2004.

[67] Ghafoori, N. and S. Dutta, Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995: 7(3): p. 183-191.

[68] J. BARON et J. P. OLIVIER, Les bétons, bases et données pour leur formulation, 2eme tirag. Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, 1997.

[69] B. Mohammed, "Use of non-destructive methods for determination of concrete properties," Thèse, 2019.

[70] M. Academique, "Elaboration et étude d'un béton drainant Présenté," 2019.

[71] A. Marolf, N. Neithalath, E. Sell, K. Wegner, J. Weiss, and J. Olek, "Influence of aggregate size and gradation on acoustic absorption of enhanced porosity concrete," ACI Mater. J., vol. 101, no. 1, pp. 82–91, 2004, doi: 10.14359/12991.

[72] H. A. L. Id, "Formulation et caractérisation physique d ' un béton léger de mousse et à base d ' argile : valorisation des sédiments fins de dragage Agnès Zambon To cite this version : HAL Id : tel-02049784 DOCTEUR DE L ' UNIVERSITÉ DE BORDEAUX," p. 243, 2019.

[73] S. T. MARTINS FILHO, E. M. BOSQUESI, J. R. FABRO, and R. PIERALISI, "Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing," *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 13, no. 3, pp. 483–500, 2020, doi: 10.1590/s1983-41952020000300003.

[74] N. Neithalath, J. Weiss, and J. Olek, "Predicting the permeability of pervious concrete (enhanced porosity concrete) from non-destructive electrical measurements," *United States Purdue Univ.*, 2006.

[75] Field R, Masters H, Singer M. An overview of porous pavement research. J Am Water Res Assoc 1982;18(2):265–70.

[76] Sata V, Wongsa A, Chindaprasirt P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. Constr Build Mater 2013;42:33–9.

[77] Z. Xing, R. Hébert, A. L. Beaucour, B. Ledésert, A. Noumowé, and N. Linder, ―Influence of aggregate's nature on their instability at elevated temperature,‖ in 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, 2011, pp. 149–156.

[78] J.-C. Mindeguia, ―Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons.‖ Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.

[79] Xu, Y., & Chung, D. D. L. (2000). Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement. *Cement and concrete research*, *30*(1), 59-61.

[80] Oliveira, J. L. A. (2010). RIEM: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais= IBRACON Structures and Materials Journals.

[81] GEORGES DREUX, JEAN FIESTA, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles, 1998 (8e édition).

[82] Yang, Z., Brown, H. et and Cheney, A., (2006). Influence of Moisture Conditionson Freeze and Thaw Durability of Portland Cernent Pervious Concrète,‖, Nashville, TN,May 24-25, 2006, 15 pp.). Dans Concrète Technology Forum: Focus on Pervious CoMcreteNashville, TN.

[83] Paul, T. D., Michael, L. L. et David, A. J. (2004). Pervious Concrète Pavements, Portland Cernent Association and the National Ready Mixed Concrète Association. Édition 32 p

[84] Zhifu, Y. (2011). Freezing-and-Thawing Durability of Pervious Concrète under Simulated Field Conditions. ACI Materials Journal/, volume 108-M21,p. 187-195.

[85] Cutler et al. (2010) et Mata (2008)

[86] DURCI, G. D. B., DéVERGLAçAGE, S. D., & FRAIS, G. D. B. CONCEVOIR DES OUVRAGES EN BÉTON RESISTANT AU GEL-DÉGEL ET AUX SELS DE DÉVERGLAÇAGE.

[87] Kevem, J. T., Wang, K. et Schaefer, V. R. (2008). A Novel Approach to Characterize Entrained air Content in Pervious Concrète. Journal o f ASTM International, volume 5, numéro 2.

[88] G. Dreux and J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constitutants*. Eyrolles, 1998.

[89] S. CHANDRA & L. BERNTSSON, *Lightweight Aggregate concrete*, Noyes Publ. 2002.

[90] S. HACHAICHI, “Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton,” 2008.

[91] S. CHANDRA & L. BERNTSSON, *Lightweight Aggregate concrete*, Noyes Publ. 2002.

[92] DURCI, G. D. B., DéVERGLAçAGE, S. D., & FRAIS, G. D. B. CONCEVOIR DES OUVRAGES EN BÉTON RESISTANT AU GEL-DÉGEL ET AUX SELS DE DÉVERGLAÇAGE.

[93] N. Ghafoori and S. Dutta, “Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 183–191, 1995.

[94] V. M. Malhotra, “No-fines concrete-its properties and applications,” in *Journal Proceedings*, 1976, vol. 73, no. 11, pp. 628–644.

[95] D. K. Kibenga, O. BONNEAU, R. GAGNÉ, and S. MOHAMMED, “Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorées.” Université de Sherbrooke, 2013.

[96] Rahmouni, I. (2019). Optimisation de la formulation des bétons d’éco-granulats obtenus par carbonatation accélérée des déchets d’incinérateurs (Doctoral dissertation, Université de

[97] Shink, M. (2003). Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers (Doctoral dissertation, Université Laval).

[98] Zouaghi, A., Nakazawa, T., Imai, F. & Shinnishi, N., 1999, An Experimental Study on Greening Porous Concrete, Proceedings of the Japan Concrete Institute, vol. 21, pp. 265-70.

[99] Nielsen, L. F., 1993, Strength development in hardened cemeot paste: examination of some empirical equations, Materials and Structures, vol. 159, pp. 255-60.

[100] Probeton, 2009, PTV 122 - Prescriptions techniques pour les pavés et dalles en béton perméables à l‘eau, 3ème édition, 12 p.

[101] Probeton, 2009, PTV 122 - Prescriptions techniques pour les pavés et dalles en béton perméables à l‘eau, 3ème édition, 12 p.

[102] Neville, A. M., 1996, Properties of Concrete, 4th edition, Longman Scientific and Technical,New York, 864p.

[103] Les%20memoires/DEVELOPMENT%20OF%20PERVIOUS%20CONCRETE.pdf

[104] Vemon, R. S., Kejin, W., Muhannad, T. S. et J, K. (2006). Mix Design Development for Pervious Concrète in Cold Weather Climates (Technique). National Concrète Pavement Technology Center, Ames (Iowa), 1-85 p.

[105] Meininger, R. C. (1988). No-fines Pervious Concrète for Paving. Concrète International, volume 10, numéro 8, p. 20-27.

[106] Crouch, L. K., Nathan, S., Adam C, W., Tim R, D. et Alan, S. (2006). Pervious PCC Compressée Strength in the Laboratory and the Field: The Effects of Aggregate Properties and Compactée Effort. Proceedings of Concrète Technology Forum, Nashville, 1-13 p.

[107] Schaefer, V.R., et al., Mix design development for pervious concrete in cold weather climates. National Concrete Pavement Technology Centre, 2006: p. 83.

[108] SHEN, P. et al. Development of high-strength pervious concrete incorporated with high percentages of waste glass. Cement and Concrete Composites, Barking, v. 114, 1 Nov. 2020. Available in: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103790

[109] XU, G. et al. Influence of size and surface condition of distributing-filling coarse aggregate on the properties of aggregate-interlocking concrete. Construction and Building Materials, Guildford, v. 261, p. 120002, 2020. Available in: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120002

[110] NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. Materials Characterization, New York, v. 61, n. 8, p. 802–813, 2010. Available in: http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.004

[111] IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V. C. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 50, p. 524–529, 2014.

[112] ĆOSIĆ, K. et al. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. Construction and Building Materials, Guildford, v. 78, p. 69–76, 2015. Available in: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073

[113] SHEN, P. et al. Development of high-strength pervious concrete incorporated with high percentages of waste glass. Cement and Concrete Composites, Barking, v. 114, 1 Nov. 2020. Available in: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103790

[114] DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. Construction and Building Materials, Guildford, v. 213, p. 643–651, 20 jul. 2019. Available in: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.099

[115] O. Deo, N. Neithalath, Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities, Construction and Building Materials. 25 (2011) 4181–4189. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.055.

[116] Crouch, L. K., Nathan, S., Adam C, W., Tim R, D. et Alan, S. (2006). Pervious PCC Compressée Strength in the Laboratory and the Field: The Effects o f Aggregate Properties and Compactée Effort. Proceedings of Concrète Technology Forum,Nashville, 1-13 p.

[117] Marolf, A., Neithalath, N., Sell, E., Wegner, K., Weiss, J. et Olek, J. (2004). Influence of Aggregate Size and Gradation on Acoustic Absorption of Enhanced Porosity Concrète. ACI Materials Journal, volume 101, numéro 1, p. 82-91.

[118] Kevem, J. T., Wang, K. et Schaefer, V. R. (2008). A Novel Approach to Characterize Entrained air Content in Pervious Concrète. Journal o f ASTM International, volume 5, numéro 2.

[119] Vemon, R. S., Kejin, W., Muhannad, T. S. et J, K. (2006). Mix Design Development for Pervious Concrète in Cold Weather Climates (Technique). National Concrète Pavement Technology Center, Ames (Iowa), 1-85 p.

[120] CONSEIL DU BATIMENT DURABLE DU CANADA (CBDCA) .Guide de référence LEED Canada, 2010

[121] COSTA.U, MASSAZA.F, « From materials science to construction materials engineering », Proc. 1st Int. Rilemcongress, Vol. 1 (Versailles, 1987), 159.

[122] pose.com/beton-drainant/

[123] https://blog.teralta-audemard.com/preparation-sol-beton-drainant-reunion

[124] forumconstruire.com/guides/guide-beton-drainant/

[125] COSTA.U, MASSAZA.F, « From materials science to construction materials engineering », Proc. 1st Int. Rilemcongress, Vol. 1 (Versailles, 1987), 159.

[126] Scholz, M. and P. Grabowiecki, Review of permeable pavement systems. Building and Environment, 2007: 42(11): p. 3830-3836.

[127] LEMING. M. L., MALCOM. H. R. AND TENNIS.P. D., Hydrologic Design of Pervious Concrete, EB303,Portland cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, SilverSpring, Maryland, USA, 2007, 72 p.

[128] EPA, U.S., Storm water technology fact sheet porous pavement. In Storm Water Technology Fact Sheet, EPA, Editor. United States Environmental Protection Agency: Washington, D.C, 1999.

[129] NA 442. NA (Norme Algérienne). (2013). 442: Ciments: composition, spécification et critères de conformité des ciments courants.‖

[130] Standard NF EN 197-1. De normalisation, C. E. Ciment Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. CEN,

[131] 168541177046835/photos/a.168558400378446/704761013424846/?type=3

[132] Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 | Superplastifiants.‖.

[133] NF P18-560, "P 18-560 Granulats Analyse granulométrique par tamisage analyse descripteurs modifications corrections," no. 1, pp. 1–9, 1992.

[134] GERVAIS. G. (2000) ―3Etudes des méthodes de mesures de la masse volumique et de teneur en eau des matériaux ‖ Université du QUEBEC.

[135] ASTMC29, ―ASTM C29 / C29M-07, Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate,ASTM International,‖ pp. 3–6, 2009, [Online]. Available: www.astm.org.

[136] D. K. Kibenga, O. BONNEAU, R. GAGNÉ, and S. MOHAMMED, ―Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorées.‖ Université de Sherbrooke, 2013.

[137] NF P 18-555, la norme a pour objet de définir les modes opératoires pour mesure le coefficient d'absorption du granulat.

[138] "Standard NF EN 1097-2."

[139] "Standard NF EN 206-1."

[140] NORME FRANÇAISE. (1990) ―Granulats -mesure de masse volumique, de la porosité et de la teneur en eau ‖, AFNOR, Paris.

[141] "Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter." .

[142] NORMES AFNOR. (1981), P18-406 ― Bétons – Essai de compression‖.

[143] NORMES AFNOR. (1981) P18-408 ― Bétons – Essai de fendage‖.

[144] "Standard NF EN 12504-4."

[145] Standard NF EN 993-15.‖ .

[146] NLT-352/86 Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.‖

[147] ACI Committee 522, “522R-10: Report on Pervious Concrete,” 2010.

[148] Standard Test Method for Bulk Density (‘Unit Weight’) and Voids in Aggregate.” .

[149] ACI Commitee 522 (2010). Report on Pervious Concrète. American Concrète Institute, Farmington Hills, MI, 1-38 p

[150] Standard Test Method for Bulk Density (‗Unit Weight‘) and Voids in Aggregate.‖ .

[151] Movassaghi, R. (2006). Durability of reinforced concrete incorporating recycled concrete as aggregate (RCA) (Master's thesis, University of Waterloo).

[152] Lee, K. H., Yang, K. H., Mun, J. H., & Van Tuan, N. (2019). Effect of sand content on the workability and mechanical properties of concrete using bottom ash and dredged soil-based artificial lightweight aggregates. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *13*, 1-13

[153] Standard NF EN 206/CN.‖.

[154] Tang, F., Zhang, H., Ji, X., & Wu, X. (2016, December). Effect of sand percentage on early-age cracking behaviors of concrete. In *2016 4th International Conference on Sensors, Mechatronics and Automation (ICSMA 2016)* (pp. 39-44). Atlantis Press.

[155] O. Kayali, M. N. Haque, et B. Zhu, « Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete », Cement and Concrete Composites, vol. 25, no 2, p. 207-213, févr. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00016-1.

[156] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsa, A., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 111, 15-21.

[157] Seeni, B. S., & Madasamy, M. (2021). A review of factors influencing performance of pervious concrete. *Građevinar*, *73*(10.), 1017-1030.

[158] Nataraja, M. C., Srinivasamurthy, L., Das, V. R., & Vineeth, L. (2023). Effect of aggregate gradation on the mechanical strengths and permeability properties of porous concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*, *70*(1), 15

[159] Sánchez-Mendieta, C., Galán, J. J., & Martinez-Lage, I. (2021). Physical and hydraulic properties of porous concrete. *Sustainability*, *13*(19), 10562.

[160] Pieralisi, R., Cavalaro, S. H. P., & Aguado, A. (2017). Advanced numerical assessment of the permeability of pervious concrete. Cement and Concrete Research, 102, 149-160.

[161] Haselbach, L. M., Valavala, S., & Montes, F. (2006). Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of environmental management*, *81*(1), 42-49.

[162] Messaoudene, I., Molez, L., & Amriou, A. (2020). Effet du Sable de dune sur la Durabilité du Béton de Terre Stabilisée et Compressée. *Academic Journal of Civil Engineering*, *38*(1), 101-104.

[163] K. J. Krakowiak et al., ―Engineering of high specific strength and low thermal conductivity cementitious composites with hollow glass microspheres for hightemperature high-pressure applications,‖ Cem. Concr. Compos., vol. 108, p. 103514, 2020.

[164] Setti, F., Ezziane, K., & Setti, B. QUANTIFICATION DE LA RESISTANCE A L'ABRASION D'UN BETON RENFORCE PAR DES FIBRES METALLIQUES.

[165] D. Tavakoli, R. S. Dehkordi, H. Divandari, and J. de Brito, ―Properties of rollercompacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO2,‖ Constr. Build. Mater., vol. 249, p. 118747, 2020.

[166] T. Boucetta, ―contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances.‖ Thèse de doctorat de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, 2014.

[167] Bhutta, M. A. R., Hasanah, N., Farhayu, N., Hussin, M. W., bin Md Tahir, M., & Mirza, J. (2013). Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). Construction and building materials, 47, 1243-1248.

[168] YangZ,MaW,ShenW,ZhouM(2008)Theaggregategradationfortheporousconcretepervious roadbasematerial.JWuhanUnivTechnolMater Sci Ed 23:391–394. https://doi.org/10.1007/s11595-0073391-4

[169] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Fawzy, A. M. (2018). Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials, 193, 105-127.

[170] Ashteyat, A., Obaidat, A., Kirgiz, M., & AlTawallbeh, B. (2022). Production of roller compacted concrete made of recycled asphalt pavement aggregate and recycled concrete aggregate and silica fume. International Journal of Pavement Research and Technology, 1-16.

[171] R. Demirbog˘a, Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures, Build. Environ. 42 (7) (2007) 2467– 2471.

[172] Livet, J. (1996). Evaluation des betons bitumineux drainants en termes d'exploitation hivernale d'un reseau routier. *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 15-24.

[173] Messaoudene, I., Molez, L., & Amriou, A. (2020). Effet du Sable de dune sur la Durabilité du Béton de Terre Stabilisée et Compressée. *Academic Journal of Civil Engineering*, *38*(1), 101-104.

[174] Z. Pásztory, ―An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials,‖ J. Build. Eng., vol. 44, p. 102604, 2021.

[175] N. Hilal, N. Hamah Sor, and R. H. Faraj, ―Development of eco-efficient lightweight self-compacting concrete with high volume of recycled EPS waste materials,‖ Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 28, no. 36, pp. 50028–50051, 2021.

[176] Y. Esen and Z. M. Doğan, ―Evaluation of physical and mechanical characteristics of siderite concrete to be used as heavy-weight concrete,‖ Cem. Concr. Compos., vol. 82, pp. 117–127, 2017.

[177] A. J. Hamad and E. T. Dawood, ―Effect of glass fibers on mechanical properties of structural lightweight foamed concrete (SLFC),‖ Univ. Thi-Qar J. Eng. Sci., vol. 4, no. 3, pp. 108–126, 2013.

[178] BENALIA, A. A., BOUKRIA, A., DEBIEB, F., & SAHRAOUI, M. (2022). Contribution à l'élaboration d'un béton léger drainant.

[179] KERBOUCI, A. BEN, BABA, A., DEBIEB, F., DJIREB, I.& SAHRAOUI,M. (2023). Élaboration d'un béton caverneux à base de déchets d'ancien béton.

Annexes

Annexe A : fiches technique de martiaux utilisés

BUILDING TRUST

NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10

Superplastifiant/Haut réducteur d'eau de nouvelle génération polyvalent

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 convient pour la confection de béton en préfabrication, béton sur chantier et béton prêt à l'emploi. Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est utilisé pour béton en cas de temps de transport ou délai de mise en oeuvre prolongés.
Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 permet la fabrication des:

- Bétons plastiques à très fluides
- Bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice
- Bétons avec réduction d'eau maximale (jusqu'à 30 %)
- Bétons avec air entraîné

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 combine plusieurs mécanismes d'action. Par adsorption à la surface et le cloisonnement des fines pendant le processus d'hydratation les propriétés suivantes sont atteintes:

- Réduction d'eau extrêmement importante (donc étanchéité et résistances élevées)
- Fluidité élevée (donc moins de travail pour la mise en oeuvre et le compactage)
- Evolution plus rapide des résistances à court terme
- Etanchéité fortement améliorée
- Meilleures caractéristiques de fluage et de retrait
- Carbonatation du béton ralentie

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 ne contient ni chlorures ni autres substances susceptibles de provoquer ou de favoriser la corrosion de l'acier, et peut donc être utilisé sans restrictions pour la construction d'ouvrages en béton armé et précontraint.

AGRÉMENTS / NORMES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 répond aux exigences de la norme NF EN 934-2 tableaux 1, 3.1 & 3.2.
PV CNERIB: DTEM 251/2016.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	• Fût de 200 kg. • Cubi de 1100 kg.
Aspect / Couleur	Liquide brun clair.
Durée de Conservation	12 mois de la date de production si le produit est stocké correctement en emballage intact.
Conditions de Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 peut geler, mais une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Densité	1.060 ± 0.010



مَتِين
MATINE

ALGÉRIE

LAFARGE
Construire
des villes meilleures



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/A-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/A-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

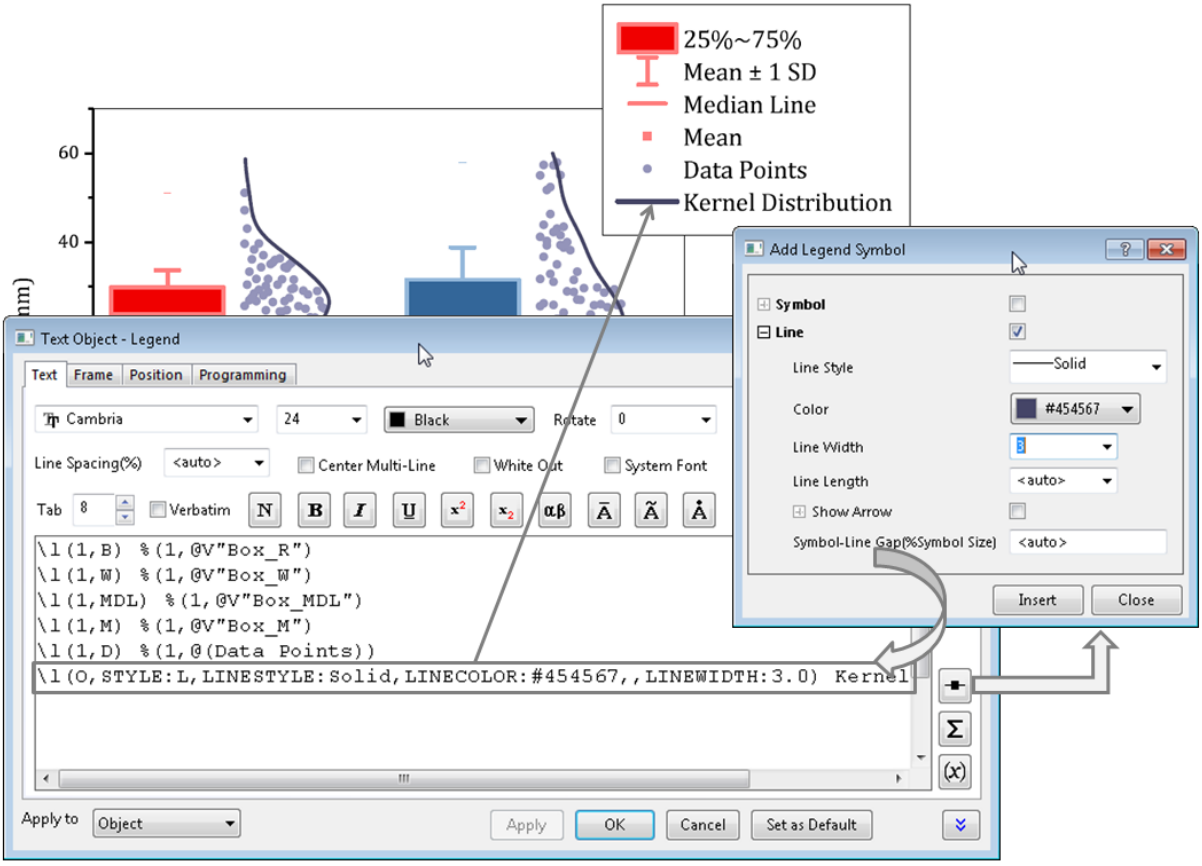
AVANTAGES PRODUIT

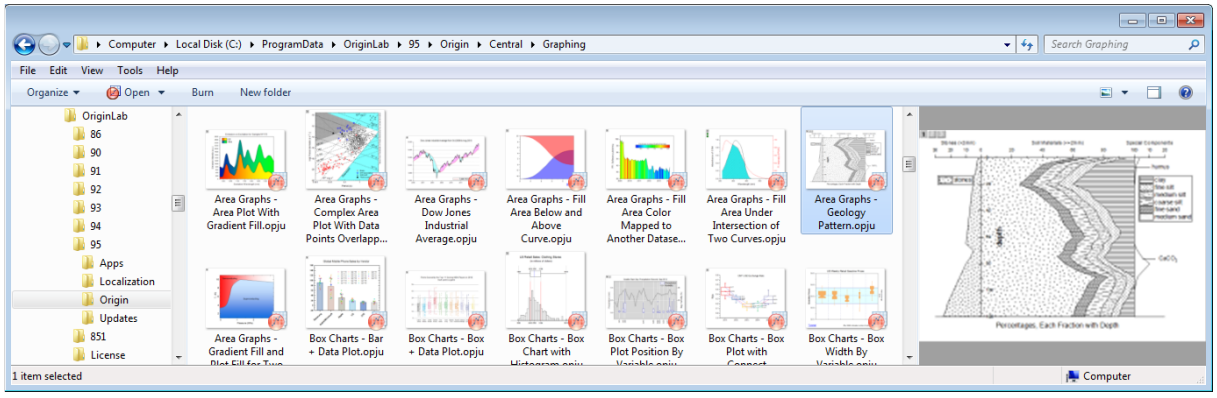
- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitants un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

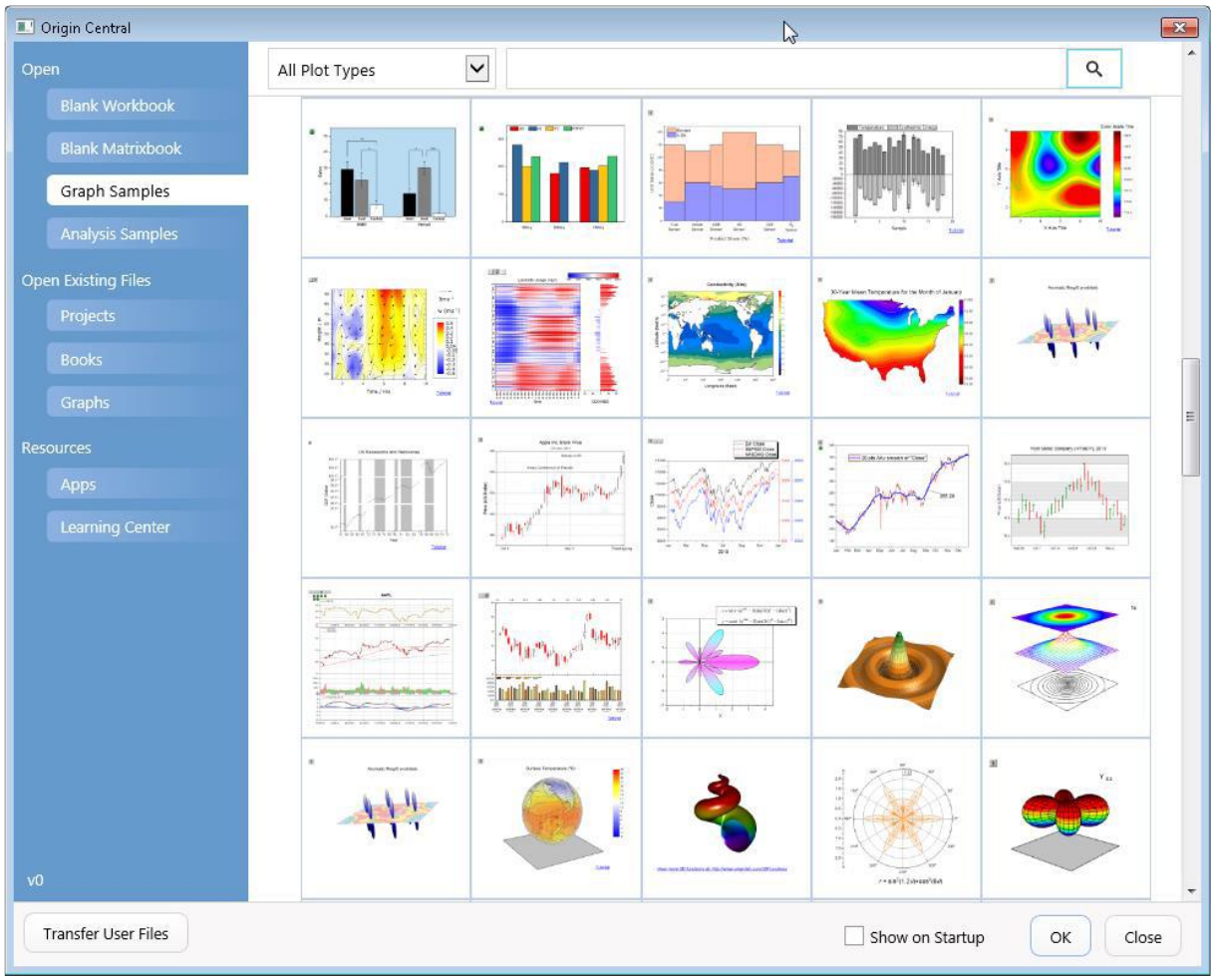
A member of LafargeHolcim

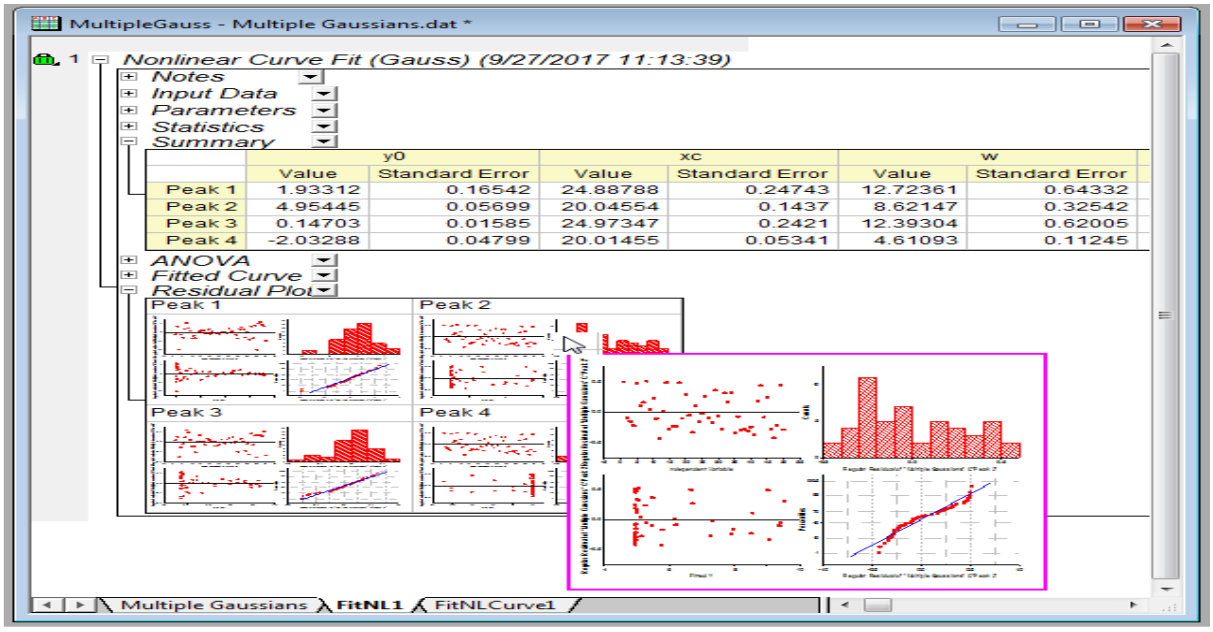
Annexe B : Logiciel Origin 2018

Origin est le logiciel d'analyse de données et de représentation graphique de choix pour plus d'un demi-million de scientifiques et d'ingénieurs dans les industries commerciales, les universités et les laboratoires gouvernementaux du monde entier. Origin offre une interface facile à utiliser pour les débutants, combinée à la possibilité d'effectuer une personnalisation avancée à mesure que vous vous familiarisez avec l'application.









	y0		xc		w	
	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Value	Standard Error
Peak 1	1.93312	0.16542	24.88788	0.24743	12.72361	0.64332
Peak 2	4.95445	0.05699	20.04554	0.1437	8.62147	0.32542
Peak 3	0.14703	0.01585	24.97347	0.2421	12.39304	0.62005
Peak 4	-2.03288	0.04799	20.01455	0.05341	4.61093	0.11245

Figure b.1 Les images de la méthode de travail avec l'origin

Annexe C : Logiciel de modélisation statistique JMP

JMP est un outil de visualisation des données qui permet de réaliser des analyses et de modélisations statistiques, il permet aussi de créer des graphiques et des diagrammes pour explorer les données et découvrir des interactions entre les paramètres étudiés. Les modèles résultants sont établis par un ajustement par régression « moindres carrés standard ».

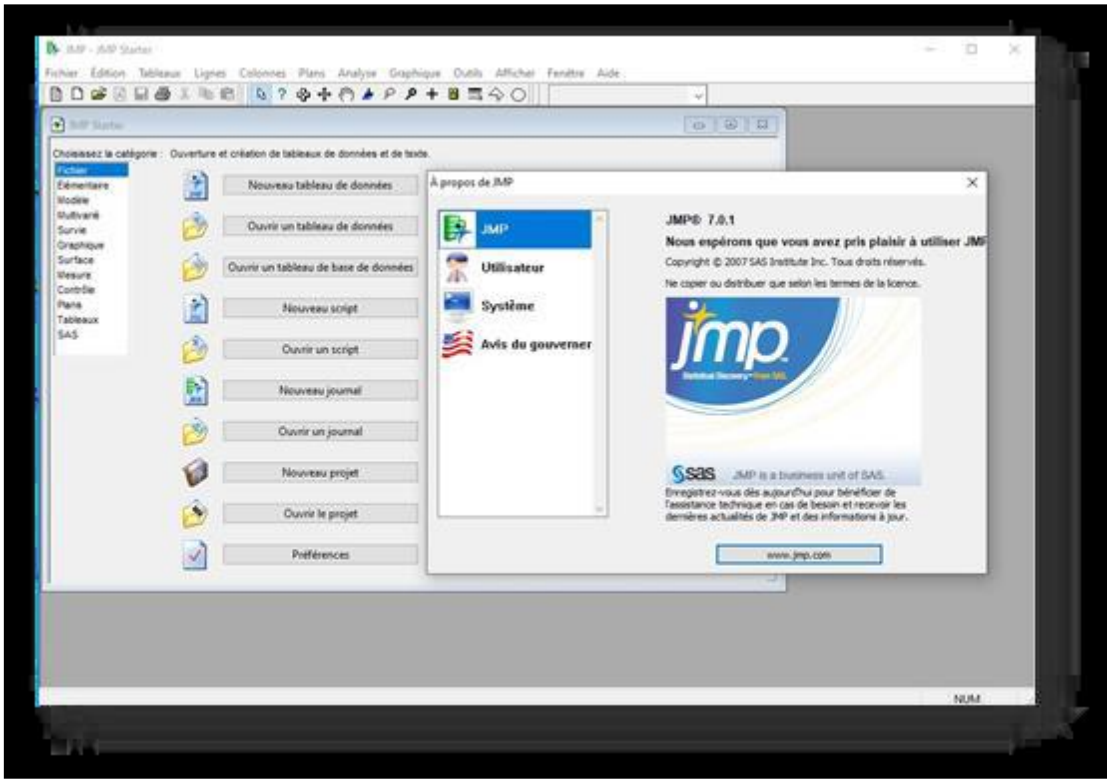


Figure B. 1 L'interface de logiciel JMP (Version 2007)

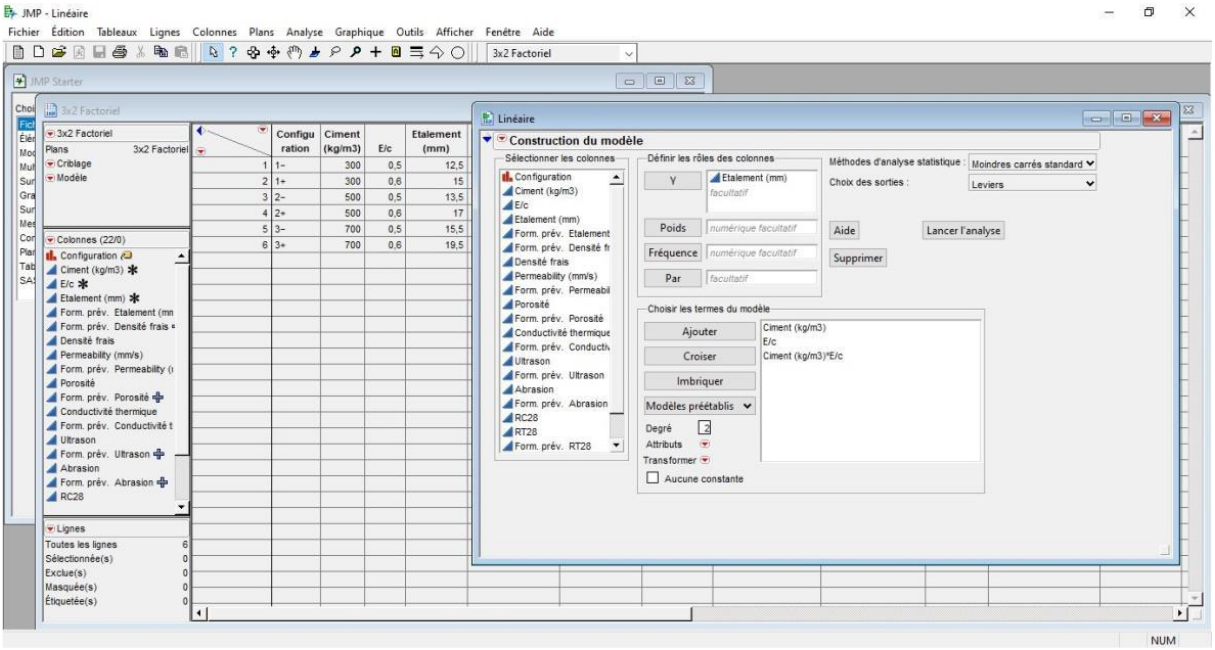


Figure B. 2 La régression par la méthode des moindres carrés standards

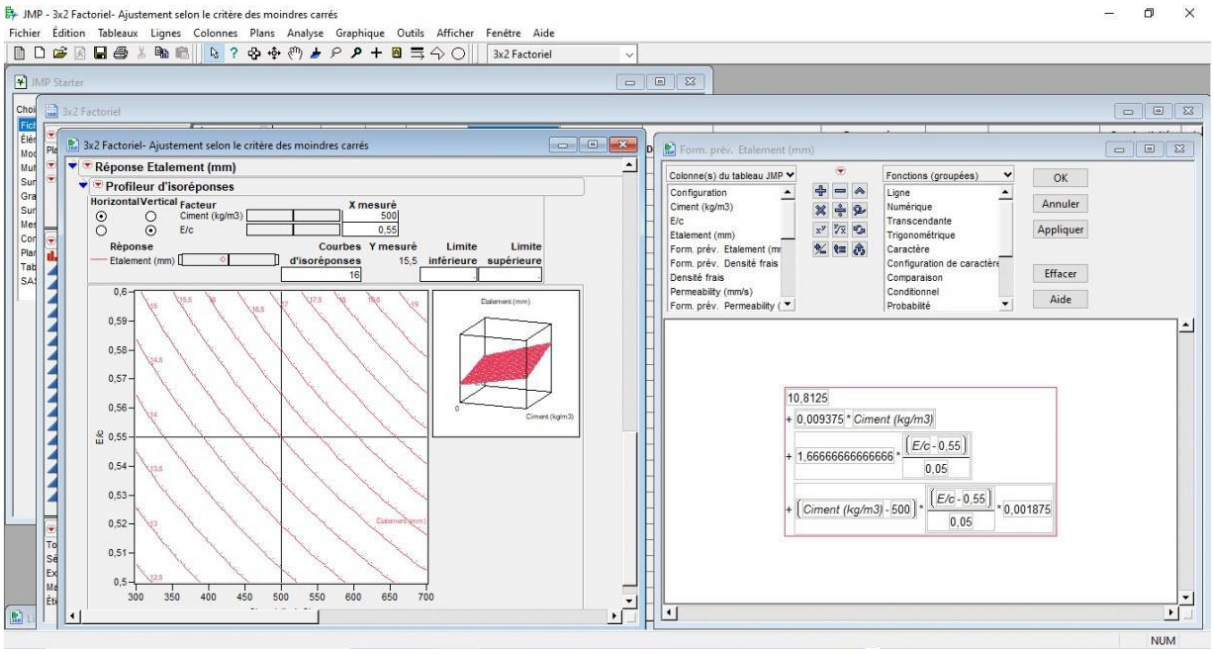


Figure B. 3 La génération des modèles postulés et le traçage des courbes isoréponses



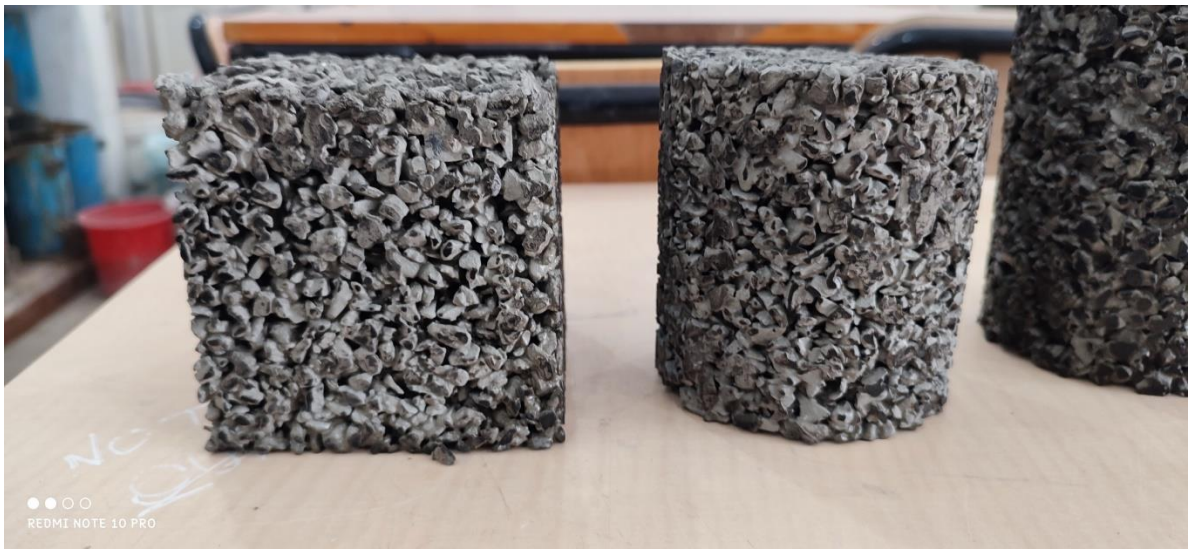
Analyse granulométrique par tamisage



Echantillons de béton étudié



Echantillons de béton étudié



Echantillons de béton étudié