REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de Fin d'Etudes de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème
Etude et élaboration d'un béton caverneux à base de déchets d'ancien béton

---

Présenté par

KERBOUCI Abderahmane

BEN BABA ALI Ismail

Proposé et Dirigé par

Encadreur : Pr DEBIEB Farid

Co-Encadreur : Doctorante DJIREB Iman

Co-Encadreur : Dr SAHRAOUI Mohamed

Promotion Juin 2023

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 Iman** d'avoir accepté 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 **BOUKRIA Abderrahime** 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 entourés 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**,

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

Kerboucí A

Ben Baba alí I

ملخص

تعرف خرسانة الصرف على أنها نوع خاص من الخرسانة ذات النفاذية العالية التي تعزز امتصاص مياه الأمطار وتسربها في التربة. حيث يتم استخدامها على نطاق واسع في تطبيقات مثل مواقف السيارات وممرات المشاة والطرق وفضائات التسلية. بالإضافة إلى ذلك، توفر رسكلة الركام المعاد تدويره في خرسانة الصرف فوائد بيئية هامة، بما في ذلك تقليل نفايات البناء والحفاظ على الموارد الطبيعية وتقليل البصمة الكربونية .الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم تأثير ركام الخرسانة المعاد تدويره (GBe) على سلوك خرسانة الصرف، سواء في الحالة السائلة أو الصلبة. تم استخدام GBe لاستبدال الركام الطبيعي، مع معدلات استبدال حجمية تتراوح بين 0 إلى 100%، بزيادة 25%. أشارت النتائج المحصل عليها إلى أن استخدام ركام الخرسانة المعاد تدويرها يؤدي إلى تقليل في قابلية التدفق، الكثافة، النفاذية والقوة الميكانيكية. ومع ذلك، لوحظ تحسين في مجال التوصيل الحراري، الفحص الديناميكي ومقاومة التآكل.

كلمات مفتاحية: خرسانة الصرف، ركام الخرسانة، الأثر البيئي، التدفق، الكثافة، النفاذية، المسامية، القوة الميكانيكية، التوصيل الحراري، الفحص الديناميكي، مقاومة التآكل.

Résumé

Le béton drainant est un type spécifique de béton à haute porosité qui favorise l'absorption des eaux de pluie et leur infiltration dans le sol. Il est largement utilisé dans des applications telles que les aires de stationnement, les voies piétonnes, les routes et les terrains de jeux. De plus, l'incorporation des granulats recyclés dans le béton drainant présente des avantages environnementaux considérables, notamment la réduction des déchets de construction, la préservation des ressources naturelles et la diminution de l'empreinte carbone. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence des granulats de béton recyclés (GBe) sur le comportement du béton drainant, à la fois lorsqu'il est frais et lorsqu'il est durci. Les GBe ont été utilisés pour remplacer les granulats naturels, avec des taux de substitution volumique variant de 0 à 100%, avec un pas de 25%. Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation des granulats de béton recyclé entraîne une réduction de la fluidité, de la densité et de la perméabilité et de la résistance mécanique. Cependant, des améliorations ont été observées en termes de conductivité thermique, d'auscultation dynamique et de résistance à l'usure.

Mots clés : Béton drainant, granulats de béton recyclés, l’impact environnementale, fluidité, densité, perméabilité, porosité, résistance mécanique, conductivité thermique, auscultation dynamique, résistance à l'usure.

Abstract

Pervious concrete is a special type of high-porosity concrete that helps to absorb and infiltrate rainwater into the ground. It is widely used in applications such as parking lots, pedestrian walkways, roads and playgrounds. In addition, the incorporation of recycled aggregates in pervious concrete offers considerable environmental benefits, including the reduction of construction waste, the preservation of natural resources and the reduction of the carbon footprint. The main objective of this study is to evaluate the influence of recycled concrete aggregates (GBe) on the behavior of pervious concrete, both in the fresh and hardened states. GBe was used to replace natural aggregates, with volume substitution rates ranging from 0 to 100%, with a step size of 25%. The results obtained indicate that the use of recycled concrete aggregates leads to a reduction in fluidity, density, permeability and mechanical strength. However, improvements were observed in terms of thermal conductivity, dynamic auscultation and wear resistance.

Keywords: pervious concrete, recycled concrete aggregates, environmental impact, fluidity, density, permeability, porosity, mechanical strength, thermal conductivity, dynamic auscultation, wear resistance.

Sommaire

Introduction générale **1**

Chapitre 1. Etude bibliographique **3**

1.1 Introduction **3**

1.2 Les composants du béton drainant **4**

1.2.1 Ciment **4**

1.2.2 Granulats **5**

1.2.2.1 Définitions ***5***

1.2.2.2 Classifications ***5***

1.2.2.3 Les granulats recyclés ***6***

1.2.3 Eau **8**

1.2.4 Additifs **8**

1.3 Propriétés du béton drainant **9**

1.3.1 Propriétés à l'état frais **9**

1.3.1.1 Ouvrabilité du béton frais ***9***

1.3.1.2 Affaissement au cône d'Abrams ***10***

1.3.2 Propriétés à l'état durci **11**

1.3.2.1 Densité ***11***

1.3.2.2 Porosité ***12***

1.3.2.3 Perméabilité ***13***

1.3.2.4 Résistance à la compression du béton drainant ***14***

1.3.2.5 La résistance à la traction ***16***

1.3.2.6 Résistance à l'abrasion ***18***

1.3.2.7 Auscultation dynamique ***20***

1.3.2.8 Conductivité thermique ***22***

1.3.2.9 Résistance au cycle du gel/dégel ***22***

1.3.2.10 Retrait et Gonflement ***24***

1.3.2.11 Module d'élasticité ***26***

1.4 Facteurs influençant sur les bétons drainants **27**

1.4.1 Influence du rapport E/C 27

1.4.1.1 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C 27

1.4.1.2 Perméabilité en fonction du rapport E/C 28

1.4.1.3 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C 28

1.4.2 Effet de la granulométrie des granulats pour le béton drainant 29

1.4.3 Effet de l'énergie de consolidation 29

1.4.4 Effet de la porosité sur la résistance à la compression 30

1.4.5 Influence de la taille et du conditionnement des granulats dans le béton drainant 31

1.4.6 Influence du volume de pâte 32

1.4.7 Effet de la porosité effective 33

1.5 Applications du béton drainant 34

1.6 Mise en place 35

1.6.1 Préparation du sol 35

1.6.2 Pose des joints de dilatation 36

1.6.3 Etalage du béton drainant 36

1.6.4 Fin du chantier 37

1.7 Histoire des revêtements perméables 37

1.8 Avantages et les inconvénients du béton drainant 38

Chapitre 02 : Matériaux Et Méthodes 39

2.1 2.1. Introduction 39

2.2 Matériaux utilisé 39

2.2.1 Le ciment 39

2.2.2 Gravier 40

2.2.3 Superplastifiant : 41

2.3 Essais 41

2.3.1 Essais de caractérisation des matériaux 41

2.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage 41

2.3.1.2 Masses volumiques (NF P18-555) 42

2.3.1.3 Masse volumique pilonnée ASTM C29 43

2.3.1.4 Absorption d'eau 43

2.3.1.5 Coefficient de Los Angeles (EN 1097-2) *44*
2.3.1.6 Démoulage et conservation des éprouvettes *45*
2.3.2 Essais à l'état frais **45**
2.3.2.1 Essai au cône d'Abrams (NF EN 12350-2) *45*
2.3.2.2 Densité à l'état frais *47*
2.3.3 Essais sur le béton à l'état durcis **47**
2.3.3.1 Densité à l'état durci *47*
2.3.3.2 Essai de porosité (NF P18-459) *48*
2.3.3.3 Essai de perméabilité (ASTM D 5084) *49*
2.3.3.4 Essai de la résistance à la compression (NFP 18-406) *50*
2.3.3.5 Essai de traction (Essai brésilien) (NF P94-422) *51*
2.3.3.6 Essai d'auscultation dynamique (NF EN 12504-4) *51*
2.3.3.7 Essais de la conductivité thermique (NF EN 993-15) *52*
2.3.3.8 Essai de retrait et gonflement (NF P 18-427) *53*
2.3.3.9 Essai d'abrasion NLT-352/86 ..... *53*
2.4 Confection des bétons étudiés **54**
2.5 Formulation du béton drainant ACI 522 ..... **55**
Chapitre 3 : Résultats et Discussions **58**
3.1. Introduction **58**
3.2. béton drainant a base de déchets de béton **58**
3.2.1 Affaissement au cône d'Abrams **60**
3.2.2 Densité a l'état frais et durci **61**
3.2.3 Les résistances à la compression **62**
3.2.4 La résistance à la traction **63**
3.2.5 Porosité connectée **64**
3.2.6 Perméabilité hydraulique **65**
3.2.7 Conductivité thermique **66**
3.2.8 Auscultation dynamique **67**
3.2.9 Retrait et gonflement **68**
3.2.10 Résistance à l'abrasion **69**
3.2.11 Relation entre la porosité connectée et la résistance **70**

3.2.12 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique 71

3.2.13 Relation entre la densité et la résistance 72

3.2.14 Relation entre la densité et la conductivité thermique 73

3.2.15 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique 74

Références bibliographiques 77

Annexe 92

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Classement de la consistance d'un béton……11
Tableau 1.2 Porosité des granulats fins et gros ……..13
Tableau 2.1 : Caractéristiques du ciment utilisé…….40

Tableau 2.2 Caractéristiques du TEMPO-10……..…….41
Tableau 2.3 Masse volumique absolue et apparente des granulats…….…….43
Tableau 2.4 résultats de la masse volumique pilonnée…….……...43
Tableau 2.5 Résultats de l'essai de l'absorption d'eau……44
Tableau 2.6 Résultats de l'essai de los angeles……45
Tableau 2.7 Classes de consistance selon la norme NF EN 206-1……..46
Tableau 2.8 Les valeurs effectives de b/b0 selon ACI 522…….56
Tableau 2.9 Quantités utilisées pour fabriquer du béton drainant par 1m^3……..…57

Tableau 3. 1 Résultats des essais réalisés(a)…….……..59
Tableau 3. 2 Résultats des essais réalisés(b)……...59

Liste des figures

Figure 1.1 : Echantillon d'un béton drainant……..3
Figure 1.2 Procédé de fabrication du ciment ……5
Figure 1.3 Caractéristiques et types de granulats ……..6
Figure 1.4 Déchets de chantier non triés ……...7
Figure 1.5 Recyclage béton ……...8
Figure 1.6 Action des superplastifiants-défloculation des grains de ciment …….9
Figure 1.7 Essai d'affaissement au cône d'Abrams ……...…10
Figure 1.8 Masse volumique du béton à 28 jours en fonction de l'énergie de compactage et du rapport graviers/ciment (G/C) ……..….12
Figure 1.9 Distinction des différents pores des bétons drainants ……13
Figure 1.10 Relation entre la perméabilité et la teneur en vide d'air ……..14
Figure 1.11 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression du béton sans fines ……..….15
Figure 1.12 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression du béton sans fines…….…..16
Figure 1.13 Essai de traction par fendage ……...17
Figure 1.14 Essai de traction par flexion ……..…18
Figure 1.15 Essai par traction directe ……..18
Figure 1.16 Évolution de l'usure à l'abrasion à 25°C et 60°C en fonction de la teneur en…...19
Figure 1.17 Test de vitesse d'impulsion ultrasonore : (a) diagramme formel UPV, (b) test d'échantillon…….…….21
Figure 1.18 Relation entre la porosité totale et la vitesse d'impulsion ultrasonore ……..…21
Figure 1.19 Coefficient de conductivité thermique et la densité ……22
Figure 1.20 Mise en place de l'essai de résistance au gel/dégel …….23
Figure 1.21 Evolution de la perte de masse des bétons drainants témoins soumis à des cycles de gel/dégel avec de l'eau potable……..…24
Figure 1.22 Relation entre les retraits des bétons recyclés et un béton conventionnel…...…25
Figure1.23 Evolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution en granulats recyclés……..26
Figure 1.24 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels ……...…27

Figure 1.25 Perméabilité en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels ...……28
Figure 1.26 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels …….29
Figure 1.27 Effet de l'énergie de consolidation sur la masse volumique ……..…..30
Figure 1.28 Relation entre la résistance à la compression et la teneur en vides ……..…31
Figure 1.29 Comparaison visuelle d'échantillons de béton drainant avec des granulats de différentes dimensions et combinaisons ……..…….31
Figure 1.30 Corrélations entre CPV et a) densité, b) porosité, c) perméabilité, d) résistance à la compression et énergie d'impact ……..….33
Figure 1.31 Relation entre la taille des granulats et la porosité effective ……...34
Figure 1.32 Applications du béton drainant : (a) aires de stationnement ; (b) pistes cyclables et espaces verts……..35
Figure 1.33 Préparation du sol ……35
Figure 1.34 Pose des joints de dilatation ……36
Figure 1.35 Etalage du béton drainant ……36
Figure 1.36 Damage du béton drainant ……..…..37

Figure 2.1 Le ciment utilisé……..39
Figure 2.2 échantillons de graviers utilisés……...……...…40
Figure 2.3 Superplastifiant Sika TEMPO-10……...…41
Figure 2.4 Courbes granulométriques des granulats utilisés……...….42
Figure 2.5 Mesure de la masse volumique absolue……..…42
Figure 2.6 Appareillage utilisé pour déterminer la masse volumique pilonnée……...…43
Figure 2.7 Essai de l'absorption d'eau…….....44
Figure 2.8 Essai de Los Angeles……..…44
Figure 2.9 Conservation des éprouvettes…….…45
Figure 2.10 Essai de cône d'Abrams…….…...46
Figure 2.11 La densité à l'état frais……..47
Figure 2.12 Densité à l'état durci…….48
Figure 2.13 Essai de porosité……...…49
Figure 2.14 Essai de perméabilité à charge variable……50
Figure 2.15 Essai de résistance à la compression…….50
Figure 2.16 Résistance à la traction par fendage……..51
Figure 2.17 Essai d'auscultation dynamique……...….52

Figure 2.18 Essai de conductivité thermique……...……52
Figure 2.19 Mesure de retrait et gonflement……53
Figure 2.20 Essai d'abrasion (a) le tambour de Los Angeles (b) échantillon avant essai ; (c) échantillon après l'essai……..54
Figure 2.21 Malaxeur à axe vertical……55
Figure 2.22 Relation entre le volume de pâte et le volume de vide……56

Figure 3. 1 Affaissement en fonction de la teneur en GBe……60
Figure 3.2 Évolutions de la densité en fonction de la teneur en GBe……61
Figure 3.3 Évolutions de la résistance à la compression en fonction de la teneur en GBe….62
Figure 3.4 Évolutions de la résistance à la traction en fonction de la teneur en GBe…….63
Figure 3.5 Évolutions de la porosité connectée et Rc 28j en fonction de la teneur en GBe…64
Figure 3.6 Perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de la teneur en GBe……..65
Figure 3.7 Evolution de la conductivité thermique et la porosité en fonction de la teneur en GBe……..…66
Figure 3.8 Auscultation dynamique et Rc28j en fonction de la teneur en GBe……..67
Figure 3.9 Évolutions du retrait en fonction de la teneur en GBe……...68
Figure 3.10 Évolutions du gonflement en fonction de la teneur en GBe…….68
Figure 3.11 la résistance à l'abrasion en fonction de la teneur en GBe…….….69
Figure 3.12 Corrélations entre la porosité connectée et Rc28…….70
Figure 3.13 Corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique……...…71
Figure 3.14 Corrélation entre la densité et la résistance à la compression……..72
Figure 3.15 Relation entre la densité et la conductivité thermique……....73
Figure 3.16 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique…….74

Liste des symboles

ACI : American Concrète Institute
AD: Auscultation dynamique
ASTM: American Society of Testing Materials
BD : Béton drainant
BR : béton recyclé
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
GBe : Granulat de béton recyclé
GN : Granulats naturels
k : Coefficient de perméabilité hydraulique
K : kelven
Kg : Kilogramme
kg/m3 : Kilogramme sur mètre cube
kwh : kilowatt heur
L : Litre
m : Mètre
m3 : 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 superplastifiant /ciment
Sp : Superplastifiant
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 est un type particulier de béton à haute porosité conçu pour absorber les eaux de pluie et facilite leur écoulement dans le sol. Grâce à sa structure spéciale, il permet la percolation de l'eau, réduisant ainsi les problèmes d'accumulation d'eau et aidant à prévenir les inondations. C'est un matériau efficace pour la gestion des eaux pluviales et une solution durable pour favoriser le cycle naturel de l'eau.

Lorsqu'on formule un béton drainant, la porosité et la résistance mécanique sont des facteurs essentiels à prendre en compte. Il est crucial de contrôler la taille des granulats et leur compacité pour garantir des propriétés optimales en termes de drainage et de résistance mécanique. Cette étape de contrôle granulométrique et de compacité granulaire est essentielle pour obtenir les caractéristiques désirées en matière de drainage et de performance mécanique du béton drainant.

L’utilisation de granulats recyclés dans le béton drainant offre des avantages considérables en termes de réduction des déchets, de conservation des ressources naturelles et de réduction des émissions de CO_2. C'est une approche durable qui contribue à minimiser l'impact environnemental de la construction et favorise une gestion responsable des ressources.

L'objet principal de cette étude concerne l’élaboration d’un béton drainant tout en variant le taux de substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclés.

Notre mémoire sera structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur le béton drainant, mettant en évidence son importance et son utilisation dans le domaine de la construction. Ensuite, nous examinerons en détail les principaux composants du béton drainant et leurs caractéristiques spécifiques. Nous passerons en revue les propriétés du béton drainant à l'état frais et à l'état durci, en mettant l'accent sur ses caractéristiques hydrauliques et mécaniques et esthétiques. Nous explorerons également les différentes applications du béton drainant dans le monde, en soulignant ses avantages et ses succès.

Le deuxième chapitre se concentre sur la détermination des propriétés physiques et mécaniques des différents matériaux utilisés. Ensuite, nous avons procédé à la formulation du béton drainant étudié, suivi de tests à l'état frais et durci pour évaluer la qualité de notre béton. Ces tests comprenaient 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 est consacré à la présentation des résultats expérimentaux, qui seront ensuite analysés et interprétés.

Par la suite, ce mémoire se conclut par une synthèse générale mettant en évidence les principaux résultats obtenus, résumant le travail réalisé, et proposant des perspectives et recommandations éventuelles pour de futures études.

Chapitre 1. Etude bibliographique

1.1 Introduction

Le béton drainant, également connu sous les noms de béton poreux ou béton perméable, a été utilisé pour la première fois dans les années 80 en Europe, notamment pour la construction de sols dans les aires de jeux, les parcs et les revêtements de chaussées. Depuis lors, ce type de béton a connu un développement considérable au cours des dernières décennies en raison de ses nombreux avantages.

Ce matériau constitue un type de béton spécifique, caractérisé par une perméabilité élevée, atteignant jusqu'à 35 % de porosité. Cette perméabilité permet une absorption et une évacuation efficace des eaux de pluie, favorisant leur écoulement naturel et durable dans le sol. En conséquence, il contribue à éviter la saturation des réseaux de traitement des eaux pluviales. Le béton drainant a la capacité d'évacuer entre 85 et 730 litres d'eau par mètre carré en une minute, en fonction de la taille des gros granulats utilisés et de la densité du mélange [1].

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 [2].



Figure 1.1 : Echantillon d’un béton drainant

1.2 Les composants du béton drainant

1.2.1 Ciment

Le ciment est un matériau en poudre composé de silicates de chaux et d'aluminates, obtenu par cuisson de matières premières telles que le calcaire et l'argile, dans des proportions variables. Ces matières premières de base subissent un processus de broyage et peuvent être éventuellement ajoutées comme produits secondaires.

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 [24]. 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/ m^3 [3].

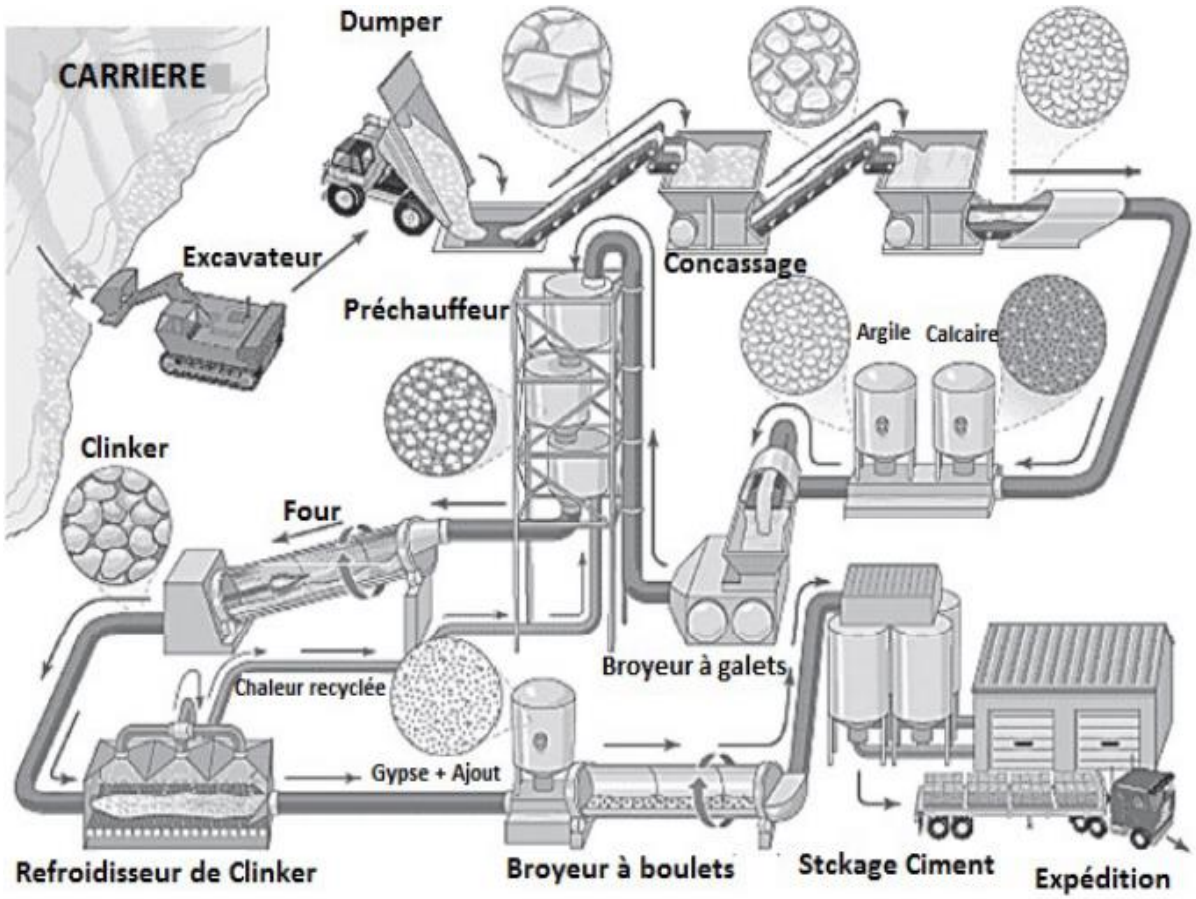


Figure 1.2 Procédé de fabrication du ciment [127]

1.2.2 Granulats

1.2.2.1 Définitions

Les granulats sont des petits morceaux de roches, c'est-à-dire un mélange de sables et graviers de grosseurs différentes comprises entre 0 et 125 mm D'après leurs dimensions, ils se situent dans la famille des fillers, des sablons, des sables, des graves ou des gravillons, des ballasts et des enrochements. Ils constituent le squelette du béton en apportant une amélioration sur sa résistance. Selon les formulations retenues, ils constituent 70 à 90 % en masse d'un mètre cube de béton [7].

1.2.2.2 Classifications

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/m^3;
- Granulats légers, dont la masse volumique réelle est inférieure à 2t/ m^3;
- Granulats lourds, dont la masse volumique réelle est supérieur à 3t/ m^3 [8].

c) Coupures granulométriques

- Filler, 0/D avec D < 1mm et 70% passant pour D = 0,063mm ;
- Sablons, 0/D avec D ≤ 2mn et 70% passant pour D = 0,063mm ;
- Sables, 0/D avec 1 < D < 6,3mm ;
- Gravillons, d/D avec d ≥ 1mm et D ≤ 125mm.

d) 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 [9].

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



Figure 1.3 Caractéristiques et types de granulats [128]

1.2.2.3 Les granulats recyclés

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux…

a) Les déchets de chantier :

Les déchets de chantiers sont principalement constitués de débris provenant des chantiers de construction et des activités industrielles liées à la production de matériaux de construction. Ces déchets sont généralement classés comme étant inertes, ce qui signifie qu'ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et n'entraînent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et n'endommagent pas les autres matériaux avec lesquels ils entrent en contact, évitant ainsi toute pollution environnementale ou risque pour la santé humaine [4].

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron. L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé [5].



Figure 1.4 Déchets de chantier non triés [129]

b) Les déchets de démolition :

Les déchets de démolition sont une sous-catégorie des déchets du bâtiment qui regroupent tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation. Comme le béton constitue presque 75 % en poids de tous les matériaux de construction, il s'en suit donc que les fortes proportions des rebuts de démolition soient du béton [6].



Figure 1.5 Recyclage béton [130]

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.

Lors de la mise en place du béton drainant, il est important que celui-ci présente une apparence humide et métallique. La pâte doit avoir une viscosité adéquate afin de bien enrober les granulats et assurer une bonne cohésion du mélange. La quantité d'eau est un facteur critique pour obtenir un béton drainant de qualité. Une teneur en eau trop élevée peut entraîner un écoulement excessif de la pâte et obstruer les vides du mélange. En revanche, une quantité d'eau insuffisante rendra le matériau difficile à manipuler et entraînera un faible développement des résistances mécaniques, que ce soit à l'état frais ou à l'état durci [10].

1.2.4 Additifs

Selon le Règlement National de Construction (2017), définit l'additif comme un matériel différent de l'eau, des granulats ou du ciment Portland, utilisé comme composant du béton, qui y est ajouté avant ou pendant le mélange afin de modifier leurs propriétés. Ceux-ci sont ajoutés au mélange, afin de : (a) varier certains de ses propriétés pour répondre à vos besoins ; (b) aider à son placement et (c) réduire les coûts (Pacheco, 2017) [11]. Par l'influence qu'il a sur le béton, les additifs peuvent classer selon les exigences de la norme technique péruvienne NTP 334.001.

- Réducteur d'eau qui diminue la quantité d'eau de mélange nécessaire pour produire du béton d'une consistance déterminée.

- Retardateur de prise qui prolonge le temps de prise du béton.
- Accélérant de prise qui raccourcit le temps de prise du béton et développe une résistance initiale rapide du béton.
- Réducteur d'eau et retardateur qui réduit la quantité d'eau de mélange requise pour produire un béton d'une consistance donnée et retarde la prise.
- Réducteur d'eau et accélérant qui réduit la quantité d'eau de mélange déterminée pour produire un béton d'une consistance établie et accélère le prise et le développement de sa résistance.
- Réducteur d'eau de haut rang qui réduit de 12% ou plus, la quantité d'eau de mélange pour produire un béton d'une consistance établie.
- Réducteur d'eau de haut de gamme et ignifuge qui réduit de 12% ou plus, la quantité d'eau de mélange pour produire un béton d'une consistance établie et retarde la prise [12].

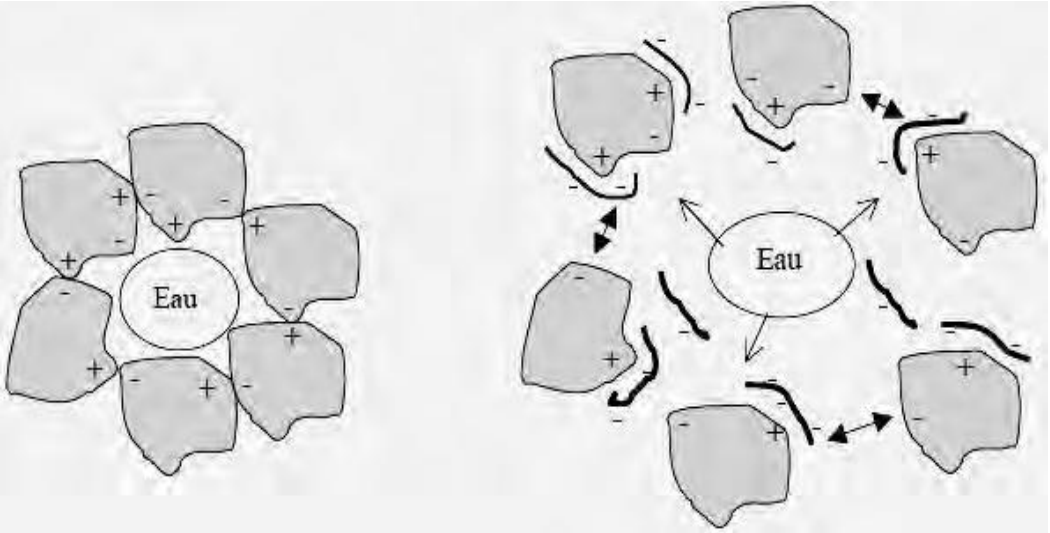


Figure 1.6 Action des superplastifiants-défloculation des grains de ciment [131]

1.3 Propriétés du béton drainant

1.3.1 Propriétés à l'état frais

1.3.1.1 Ouvrabilité du béton frais

C'est une propriété essentielle du béton frais, car il le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement 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'Abrams et l'étalement à la table de secousse [116].

Logiquement, compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces granulats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui de béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont trouvé qu'une ouvrabilité comparable à celle du béton des granulats naturels si uniquement les gros granulats sont recyclés. Par contre, l'introduction de granulats fins recyclés réduit Considérablement l'ouvrabilité [117].

Selon certains travaux, la demande supplémentaire en eau était de l'ordre de 5 % Pour le béton à base de gros granulats recyclés et jusqu'à 15 % pour le béton à base de gros et fins granulats recyclés [118].

1.3.1.2 Affaissement au cône d'Abrams

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Il s'agit de mouler manuellement un tronc de cône de dimensions normalisées et de mesurer, après démoulage, son affaissement sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement est grand, plus le béton est fluide. Il est composé de 4 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 [13].

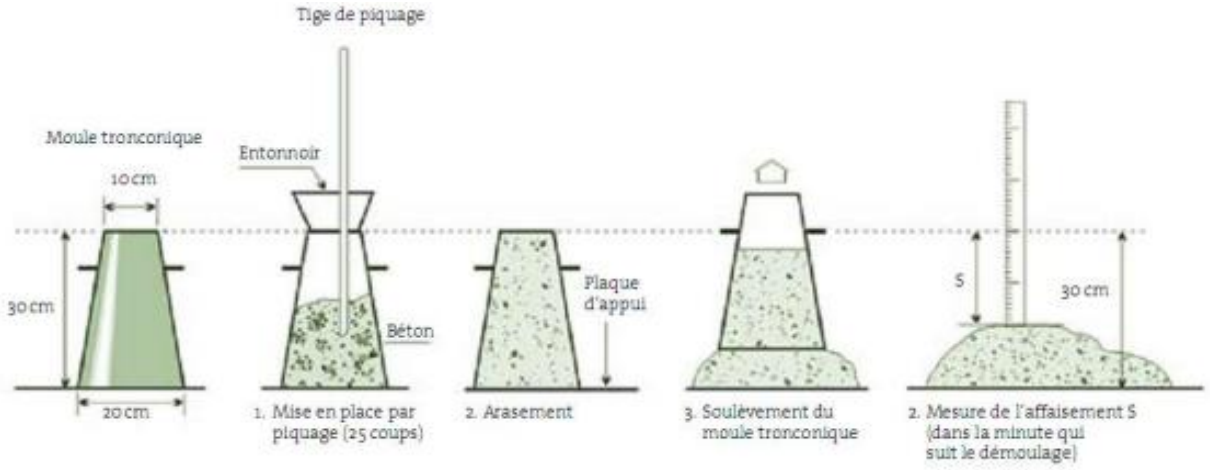


Figure 1.7 Essai d'affaissement au cône d'Abrams [132]

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 [14].

L'ouvrabilité des bétons recyclés est généralement affectée par la capacité d'absorption d'eau des granulats. La forme et la texture des granulats peuvent également affecter l'efficacité de l'ouvrabilité des bétons cités. Cela dépend du type de broyeur utilisé [110].

Logiquement, compte tenu de la porosité élevée des granulats recyclés (gros et fins), la consistance du béton à base de ces granulats (selon le pourcentage de substitution), demande beaucoup plus d'eau de gâchage que celui de béton témoin. Cependant, de nombreux chercheurs ont trouvé qu'une ouvrabilité comparable à celle du béton des granulats naturels si uniquement les gros granulats sont recyclés. Par contre, l'introduction de granulats fins recyclés réduit considérablement l'ouvrabilité [111].

Tableau 1.1 Classement de la consistance d'un béton [144]

Constance 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 [15]. 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 [16], [17] et d'autre part, du processus de concassage adopté [18].

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 1.8**)** [19].

Les masses volumiques des bétons recyclés sont toujours nettement plus basses que celle des bétons témoins [112], ce qui est logique puisque les granulats de base sont plus légers ; il en résulte que les bétons recyclés ont des performances physiques et mécaniques différentes de celles des bétons originaux.

Plusieurs chercheurs [113 ,114], affirment que la densité du béton recyclé à l'état frais est inférieure d'environ 15% et que le pourcentage d'air occlus augmente jusqu'à 0.6% par rapport au béton des granulats naturels.

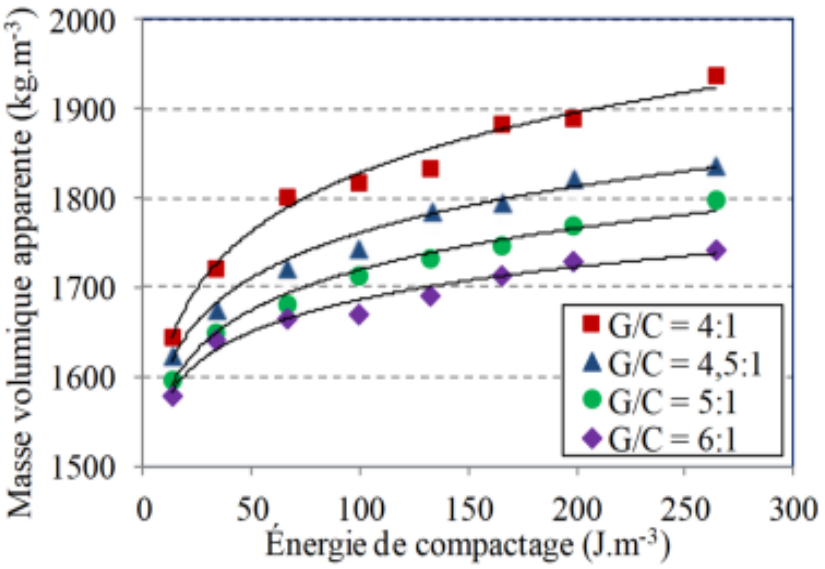


Figure 1.8 Masse volumique du béton à 28 jours en fonction de l'énergie de compactage et du rapport graviers/ciment (G/C) [133]

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 1.9) [20].

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 1.9) [21].

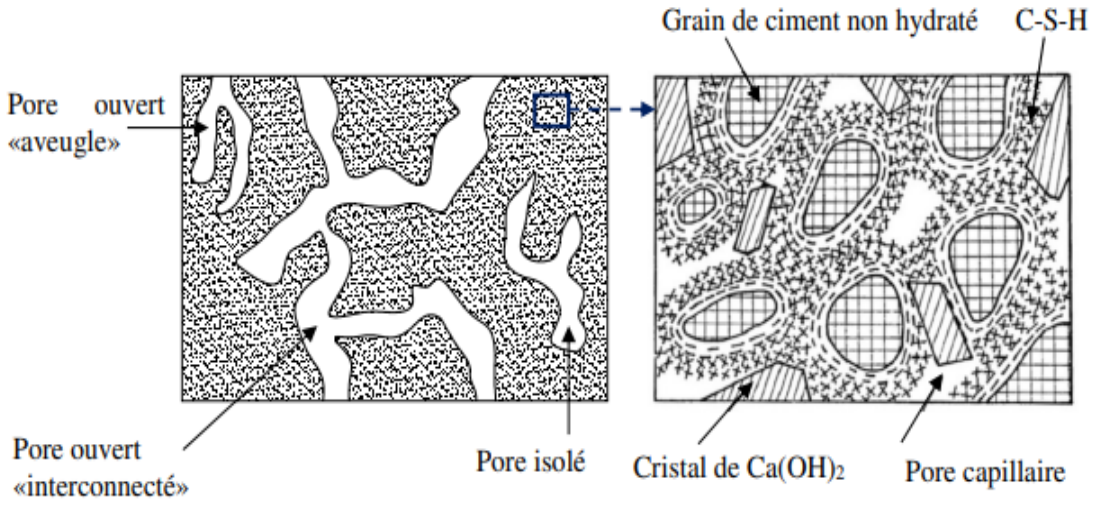


Figure 1.9 Distinction des différents pores des bétons drainants [20]

La proportion importante des grains de mortiers attachés aux granulats recyclés, conduit à des teneurs en eau plus importantes et par conséquent à une porosité élevée. Selon Kazuyuki et autres [115], 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 [115]

	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 [22].

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/m^2) 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. (Meininger, 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 [23].

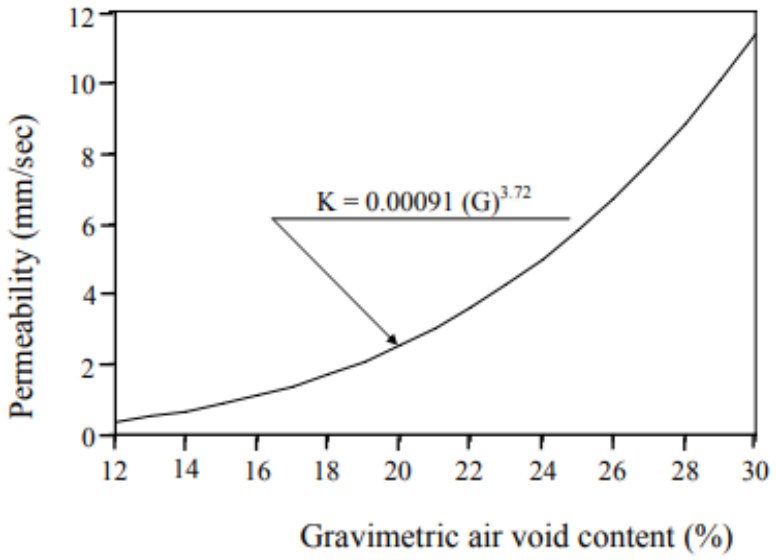


Figure 1.10 Relation entre la perméabilité et la teneur en vide d'air [23]

L'augmentation de la perméabilité et de l'absorption d'eau du béton recyclé par rapport au béton à base des granulats naturels est généralement due à la présence de mortier provenant de l'ancien béton adhéré aux granulats recyclés, ainsi qu'à la résistance réduite du béton recyclé. Le béton d'origine, qui présente une résistance à la compression élevée, donne toujours des granulats recyclés nécessitant un rapport E/C similaire à celui du béton à base des granulats naturels, ce qui entraîne une absorption d'eau moindre [126].

1.3.2.4 Résistance à la compression du béton drainant

Il est connu que le béton à base des granulats recyclés possède une résistance à la compression plus faible que celle du béton témoin fabriqué avec des granulats naturels et ayant la même ouvrabilité [119]. En général, il y a une perte de résistance et de 20 à 40% par rapport à un béton à granulats naturels [120].

Selon d'autres chercheurs et pour une même plasticité du béton frais, la résistance à la compression du béton recyclé à base de gros granulats recyclés et sable naturel est inférieure de l'ordre de 14 à 30 % que celle du béton original [121]. Cependant lorsqu'il s'agit de béton à base de granulats fins recyclés, la résistance à la compression ne chute que de 15 à 25 % par rapport à celle de béton original, et lorsque le béton recyclé est composé des deux types des granulats recyclés (gros et fins), la chute de résistance à la compression arrivera jusqu'à 40 % par rapport à celle du béton témoin [122].

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

Ghafoori et Dutta [25] 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 1.11. Ils ont indiqué qu'une énergie de compactage accrue peut conduire à améliorer la résistance à la compression.

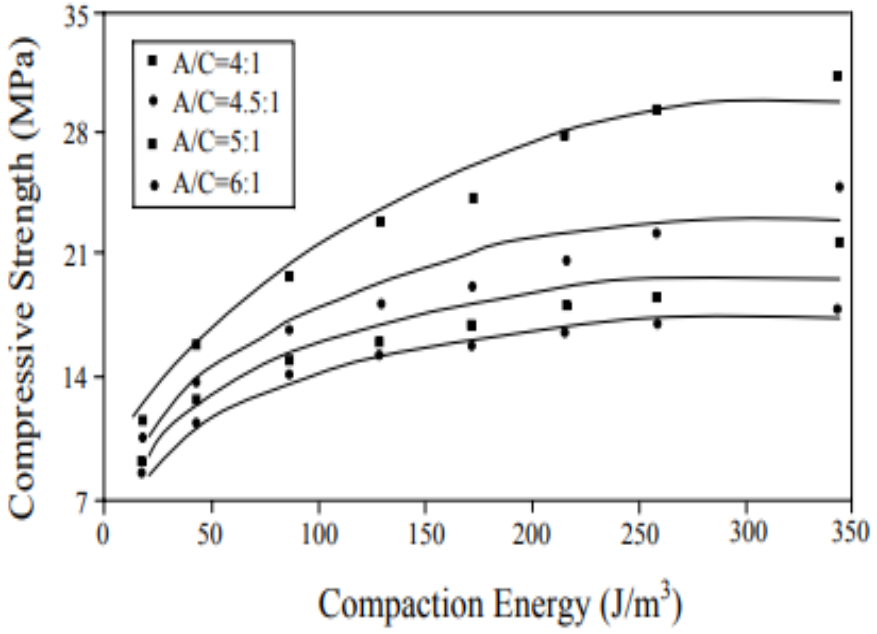


Figure 1.11 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression du béton sans fines [25]

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

La figure 1.12 montre la relation entre la résistance à la compression et le rapport granulats/ciment [26,27]. 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 recyclés est illustrée dans la figure 1.12. Une réduction de la résistance est observée pour le béton poreux utilisant des granulats recyclés par rapport au béton poreux incorporant des granulats naturels.

Cela pourrait être dû à la réduction de la liaison entre l'agrégat et la pâte de ciment lors de l'utilisation des granulats recyclés et en partie à l'augmentation 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 [28].

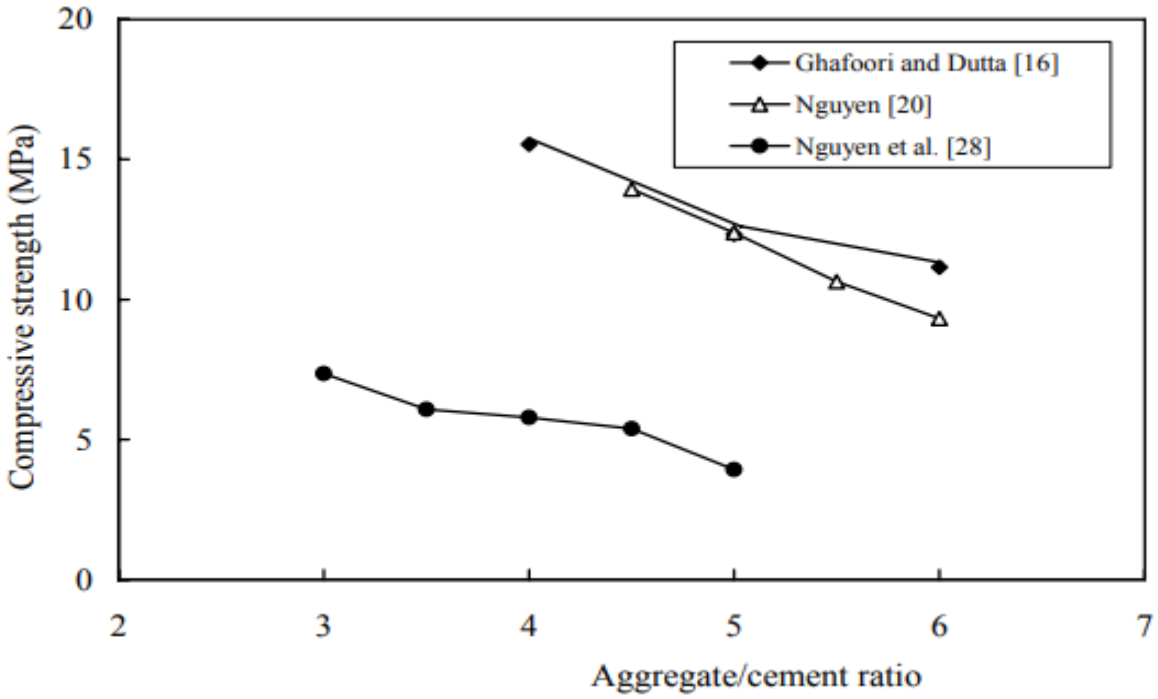


Figure 1.12 Effet de l'énergie de compactage sur la résistance à la compression du béton sans fines [26]

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 au 1/10 de la résistance à la compression). La résistance à la traction du béton recyclé est plus faible que celle de béton des granulats naturels ayant la même ouvrabilité, La résistance à la traction par flexion du béton des granulats recyclés dépend en général du rapport E/C et de la période de malaxage [123]. La nature des granulats recyclés (béton de structure ou de chaussée) influe considérablement sur le taux de chute de cette résistance par rapport à celle du béton ordinaire. La résistance à la traction du béton recyclé est comme celle du béton ordinaire de l'ordre de 1/5 à 1/8 par rapport à celle de compression [124].

Il existe 3 types de résistances à la tractions 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 », il consiste à écraser un cylindre de béton en suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre verticale [29], la résistance en traction sera :

$$F_{tj} = 2\frac{p}{\pi DL}$$

Avec :

j : âge du béton (en jours) au moment de l'essai.

D : le diamètre de l'éprouvette.

L : la longueur de l'éprouvette.

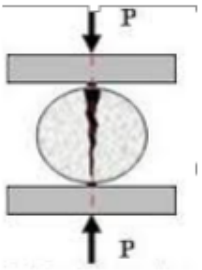


Figure 1.13 Essai de traction par fendage [134]

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) [30].

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

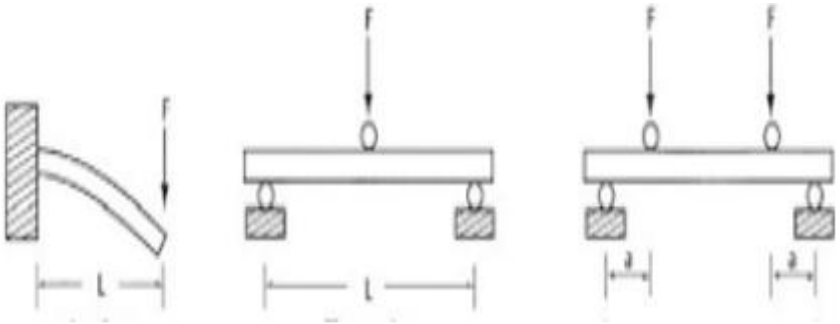


Figure 1.14 Essai de traction par flexion [30]

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 [31].

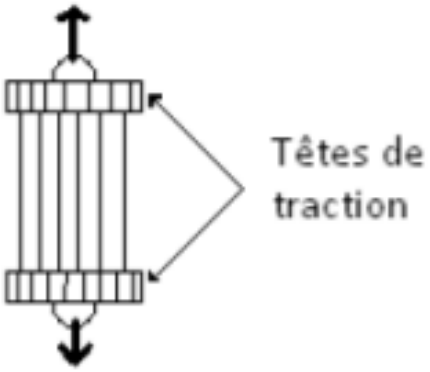


Figure 1.15 Essai par traction directe [134]

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 [32].

Trois méthodes d'essai d'abrasion en laboratoire ont été étudiées par Dong et al [33] 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 [34] et basées sur la norme ASTM C 131 [35], 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 [36].

Tennis et coll [135] 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 [136] 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.

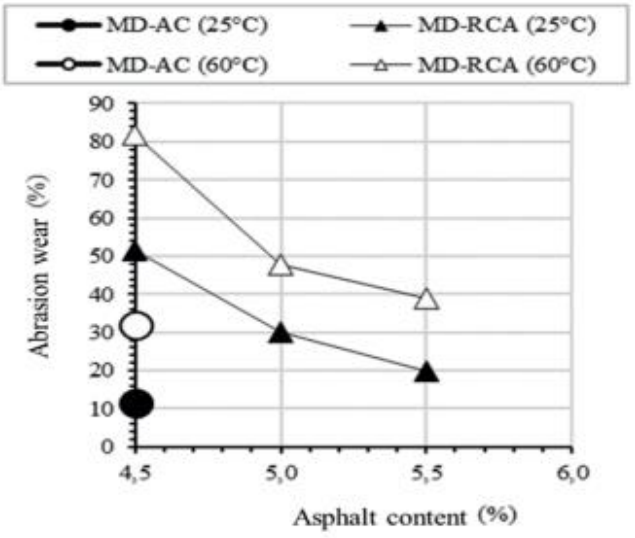


Figure 1.16 Évolution de l'usure à l'abrasion en fonction de la teneur en asphalte [37]

1.3.2.7 Auscultation dynamique

Un essai non destructif a été effectué sur le béton afin d'analyser son comportement et de déterminer ses caractéristiques mécaniques. Ses caractéristiques mécaniques. Il est simple à utiliser et les résultats ont été rapidement obtenus sur place [38,39]. Le principe de base de l'UPV est que l'onde d'impulsion est produite par le transducteur électroacoustique. Cette onde d'impulsion se déplace dans le béton et le temps que l'onde d'impulsion met à parcourir l'échantillon doit être mesuré. L'échantillon est mesuré. Ce temps permet de mesurer la vitesse longitudinale ou la vitesse d'impulsion. Est mesurée. Deux transducteurs sont utilisés, l'un étant un émetteur et l'autre un récepteur [40].

Le schéma formel Le diagramme formel de l'UPV [41] selon l'ASTM C-597 est illustré à la figure 1.17. Essai de vitesse d'impulsion ultrasonique équipement de marque MATEST (Italie) avec une plage de mesure (0-3000 µs-précision +/-0,1 µs) et deux sondes de 55 kHz avec connexion. Deux sondes de 55 kHz avec câbles de connexion, basées sur la norme ASTM C597, ont été utilisées dans cette étude. Comme le montre la figure 1.17.

La vitesse d'impulsion et le module d'élasticité dynamique doivent être calculés à l'aide des équations énumérées dans la norme ASTM C-597.

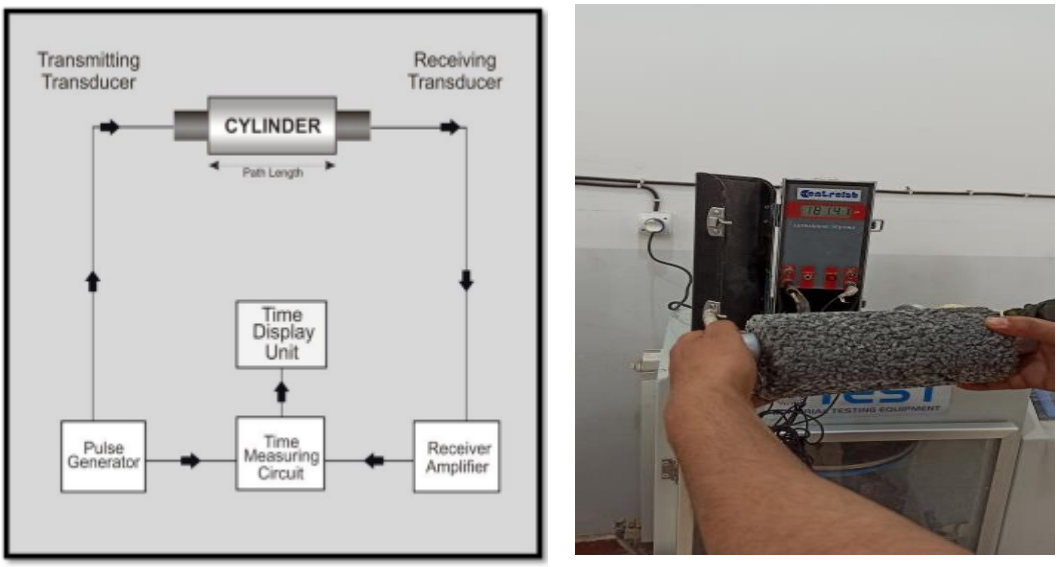
$$\mathbf{V} = \frac{L}{T}$$

L= longueur du trajet (m).

T = transit (µs).

V = vitesse d'impulsion (km/s).

La fréquence de la paire de transducteurs est de 55 kHz. Le coefficient de Poisson a été fixé à 0,28 pour cette étude expérimentale [42]. L'agent de couplage a également été utilisé pour obtenir de meilleurs résultats et, avec l'aide de l'agent de couplage, le contact ferme a été développé entre le transducteur et la surface du béton. Les gammes de transducteurs se situent entre 20 et 150 kHz. Les transducteurs d'une fréquence de 50 kHz à 60 kHz conviennent aux applications les plus courantes. Fondamentalement, la vitesse d'impulsion indique la qualité du béton, ainsi que la présence de vides et l'homogénéité du béton [43]. Selon Jones, la limite inférieure de la vitesse d'impulsion (V) pour un béton de bonne qualité se situe entre 4,1 et 4,7 km/s [44]. Dans cette recherche, la vitesse d'impulsion (V) et le module d'élasticité dynamique (Ed) ont été estimés pour chaque spécimen de béton et les essais sur les spécimens sont illustrés à la figure 1.17.



(a) (b)

Figure 1.17 Test de vitesse d'impulsion ultrasonore : (a) diagramme formel UPV, (b) test d'échantillon [42]

Certaines corrélations peuvent être réalisées afin de comprendre le comportement du béton perméable par une méthode non destructive sur la figure 1.17a, la relation entre le VPU et la porosité totale, on constate que la VPU augmente lorsque la porosité diminue. Ce comportement est attendu car les vides d'air provoquent une atténuation de la vitesse de l'onde ultrasonore.

De plus, plus le rapport P/Ag est élevé, plus la possibilité de l'onde pour trouver des chemins plus courts pour sa propagation, augmentant la vitesse de l'onde [45].

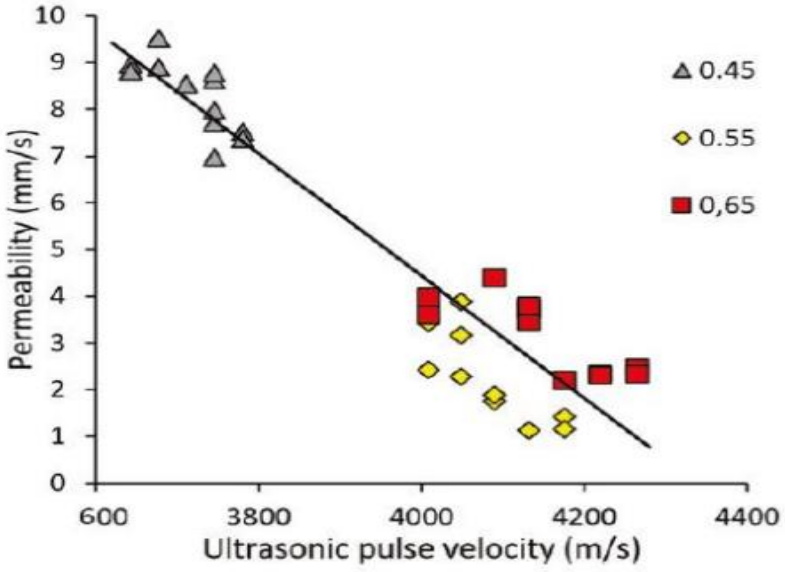


Figure 1.18 Relation entre la porosité totale et la vitesse d'impulsion ultrasonore [45]

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 [47]. 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 [49].

Pour les bétons courants, la conductivité thermique diminue lorsque la température augmente. Cette baisse de conductivité est montrée à travers les travaux de [50], et suivant le type de béton et la nature des granulats [51].

Le tracé des conductivités thermiques des bétons drainants dans cette étude avec les valeurs de densité sont comparés à ceux des bétons normaux et légers. La conductivité thermique du béton drainant contenant des granulats recyclés a suivi la même ligne de tendance que celle du béton normal. D'après les résultats obtenus, il est clair que les granulats recyclés, à savoir le RBA et le RCA, pourraient être utilisés de manière avantageuse pour produire des bétons légers [46].

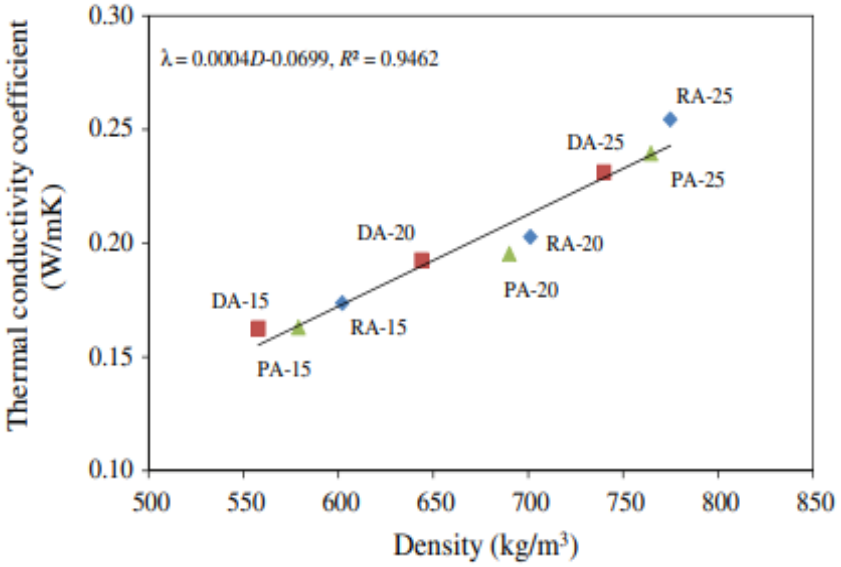


Figure 1.19 Coefficient de conductivité thermique et la densité [45]

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 [52].

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 [53]. 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 [54].

Les cycles de mouillage et séchage seraient le facteur le plus affectant ces bétons à cause de leur structure poreuse ouverte [55]. 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 [57]. 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.

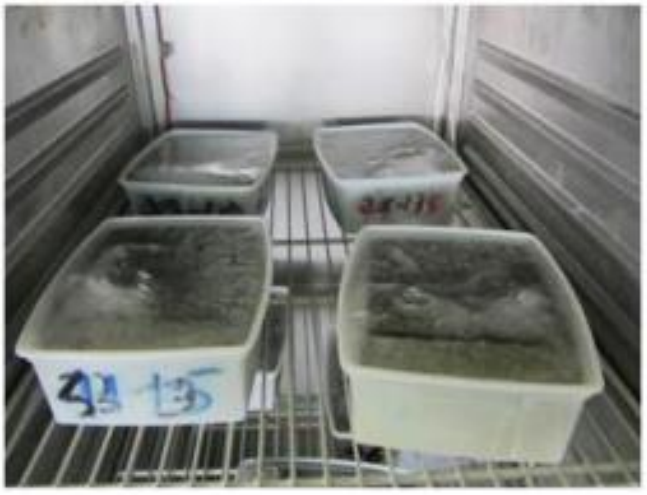


Figure 1.20 Mise en place de l'essai de résistance au gel/dégel [139]

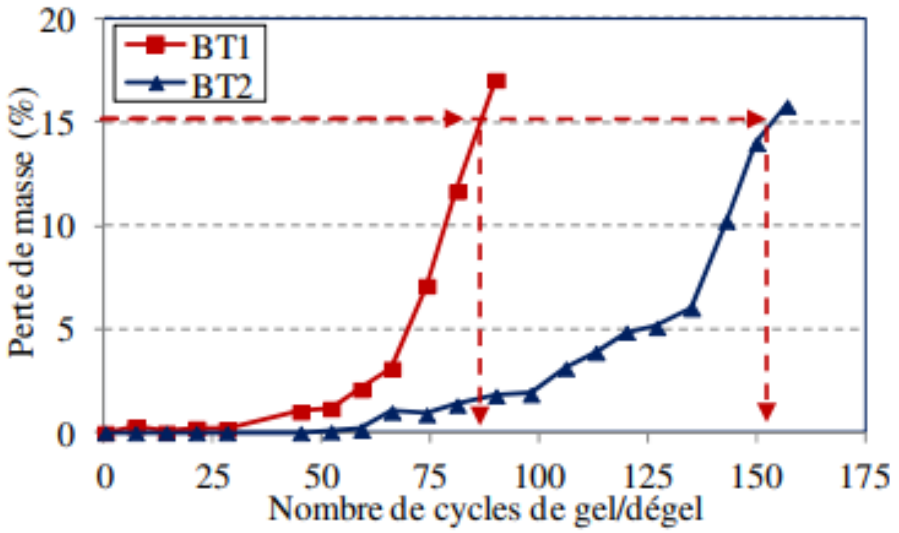


Figure 1.21 Evolution de la perte de masse des bétons drainants témoins soumis à des cycles de gel/dégel avec de l'eau potable [56]

1.3.2.10 Retrait et Gonflement

Il existe plusieurs types de rétrécissement : le rétrécissement autogène ou chimique, le rétrécissement par séchage et le rétrécissement par carbonatation. Autogène ou chimique, le retrait de séchage et le retrait de carbonatation. Le retrait de séchage se produit lorsque le béton sèche. La pression négative La pression négative de l'eau est causée par le ménisque capillaire, ce qui crée des contraintes de compression dans la pâte de ciment solide. Ce processus entraîne un compactage et la déformation augmente avec la diminution du rayon capillaire [58].

Le retrait du béton augmente avec la proportion de granulats de recyclage. Le retrait doit être retardé au moyen de mesures adéquates (temps de prise plus longs). Le mouillage préalable des granulats de recyclage est une mesure souvent utilisée pour limiter l'absorption d'eau de ces granulats. Or, le mouillage préalable des granulats entraîne leur gonflement, ce dernier étant réversible au moment de la prise. Cette mesure tend donc à augmenter le retrait du béton [59].

Le retrait de la pâte de ciment est d'autant plus grand 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 [60], par la présence des argiles et fines dans les granulats [61] et à la grandeur du module élastique de ces derniers.

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 [62].

Certaines études K ATZ (2003) [63] montrent qu'à l'âge de 90 jours, le retrait pourrait être d'environ 0,55 à 0,8 mm/m pour un béton recyclé, alors que la valeur comparable pour le béton conventionnel est seulement d'environ 0,30 mm/m. Sur d'autres études [84] l'effet de la teneur en granulats recyclés n'aboutit à aucune différence notable dans le retrait si cette teneur ne dépasse pas 50% comme l'illustre bien la figure (1.22).

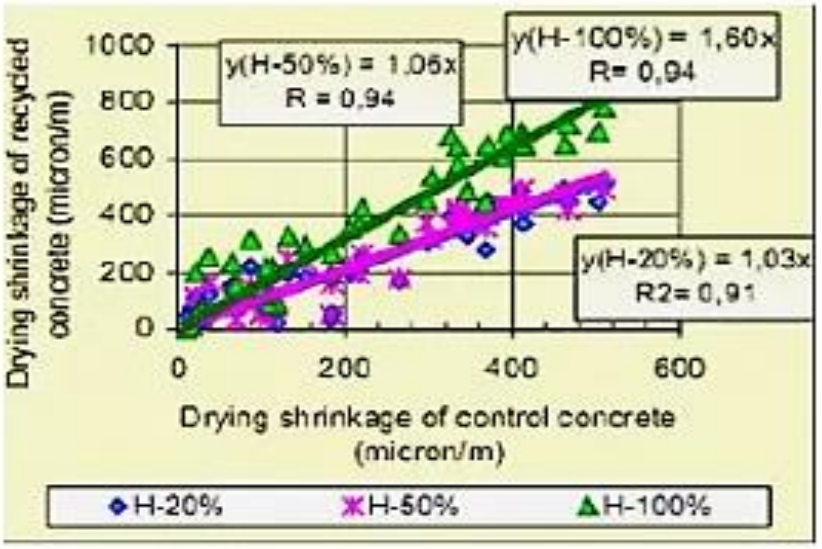


Figure 1.22 Relation entre les retraits des bétons recyclés et un béton conventionnel [84]

Le fluage ce phénomène résulte en premier lieu d'une migration d'humidité. En cas de charge plus importante, des microfissures se développent dans la pâte de ciment durcie. Un béton jeune est plus sensible au fluage parce que la structure du matériau résiste moins bien aux contraintes de compression et de traction internes. Le fluage est donc une déformation sous contrainte constante appliquée au béton [107].

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 [108]. 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 [109].

1.3.2.11 Module d'élasticité

Les bétons de recyclage, compte tenu de leurs légèreté, ont toujours des modules d'élasticité inférieurs de 20à 40% que celle du béton comparable comportent des granulats naturels.

Les modules d'élasticité trouvés par Coquillat sont de 29 GPa pour le béton recyclé de granulats de béton démolis, de 25GPa pour le béton de brique et de 24GPa pour le béton de brique et béton démolis en comparaison à un module d'élasticité de 40GPa pour le béton témoin [125].

Le module d'élasticité est l'un des propriétés les plus touchées de bétons recyclés, même à des taux de substitution faibles en granulats recyclés [137]. Le module d'élasticité du béton recyclé a été signalé comme étant de l'ordre de 50-70% par rapport à celui du béton ordinaire, comme l'ont rapporté certains auteurs [50, 96, 97, 98].

Ceux-ci ont constaté qu'avec des niveaux de remplacement en granulats recyclés de 20, 50 et 100% dans des bétons, les valeurs moyennes du module d'élasticité sont de 10, 20 et 40% respectivement inférieures à celles enregistrées pour un béton conventionnel [138] comme l'illustre la figure (1.23). Sur celle-ci on remarque que la perte de rigidité pour les bétons recyclés s'accentue d'avantage avec l'accroissement du rapport E/C. Une certaine corrélation se dégage entre les modules élastiques statiques du béton conventionnel et le béton recyclé lorsque la substitution en granulats recyclés est partielle (20 et 50%) et elle devient médiocre lorsque le taux de remplacement est à 100%.



Figure1.23 Evolution du module élastique statique en fonction du taux de substitution en granulats recyclés [138]

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 1.24 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 [64] qui observent une variation de la résistance de 73% lorsque le rapport E/C passe de 0,30 à 0,40.

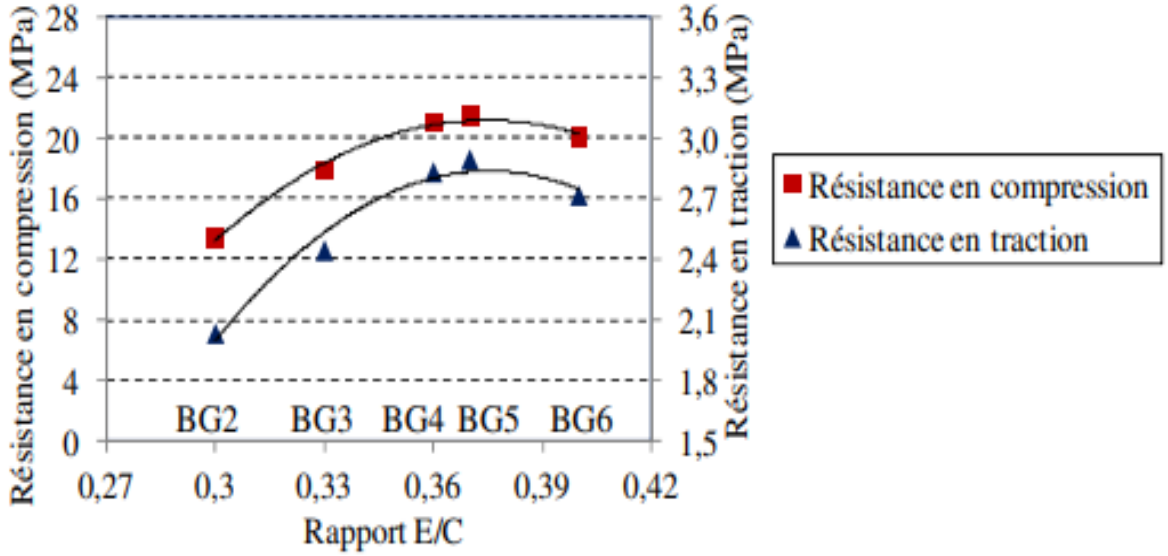


Figure 1.24 Résistance mécanique en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels [64]

En outre, au vu de la variation de la résistance mécanique, on confirme qu'un rapport E/C plus faible n'apporte pas nécessairement une résistance plus importante pour le béton drainant, contrairement au béton ordinaire. Les résistances en compression et en traction atteignent leur maximum lorsque le rapport E/C est égal à 0,37, valeur qui se trouve bien dans l'intervalle conseillé de 0,34 à 0,40 dans le cas où aucun super plastifiant ne serait 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 [65] . 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 [66].

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 [67].

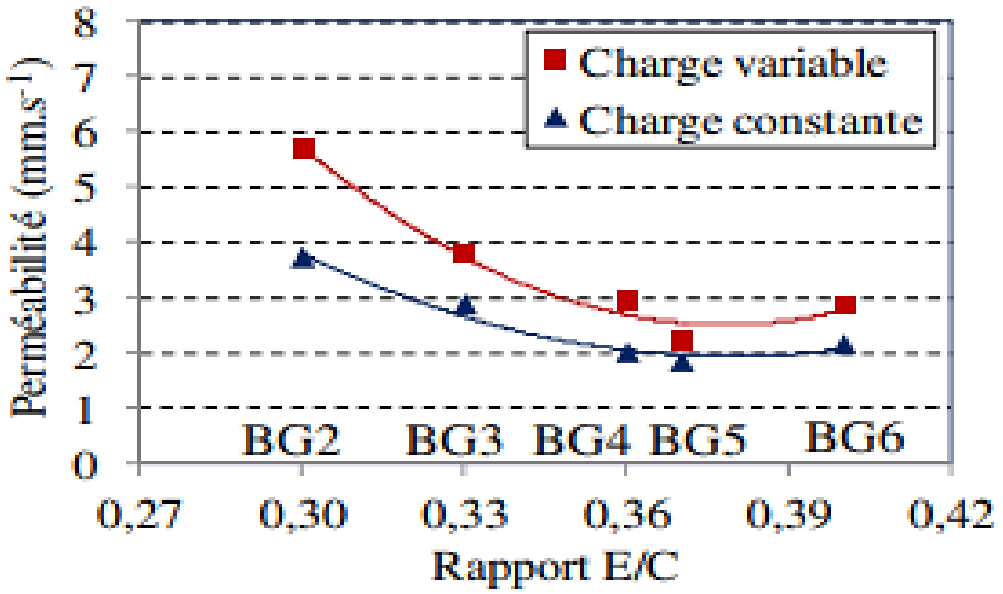


Figure 1.25 Perméabilité en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels [66]

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

Afin de pouvoir apporter une bonne compréhension de l'effet du rapport E/C, nous avons tracé la courbe d'évolution des porosités et des masses volumiques apparentes des bétons (Figure 1.26).

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 [68].

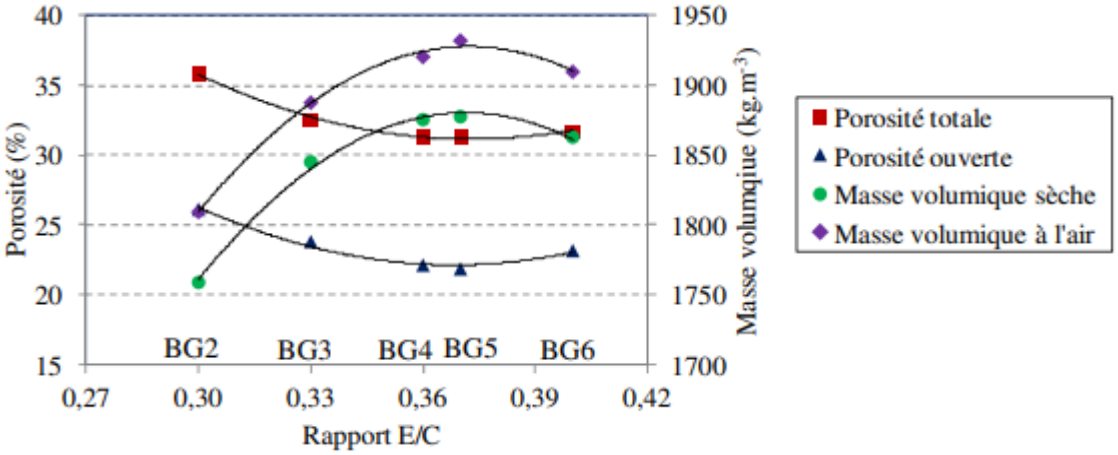


Figure 1.26 Masses volumiques et porosités en fonction du rapport E/C des bétons de graviers naturels [67]

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 [69].

1.4.3 Effet de l'énergie de consolidation

L'énergie de consolidation est un paramètre déterminant sur les propriétés mécaniques et drainantes du béton drainant. Les précédents travaux sur le béton drainant utilisent soit le pilonnage à l'aide d'une barre métallique, la consolidation à l'aide d'un Proctor, une table vibrante, ou bien une combinaison de deux de ces trois méthodes de consolidation.

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 [70]. 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) [71].

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 [72].

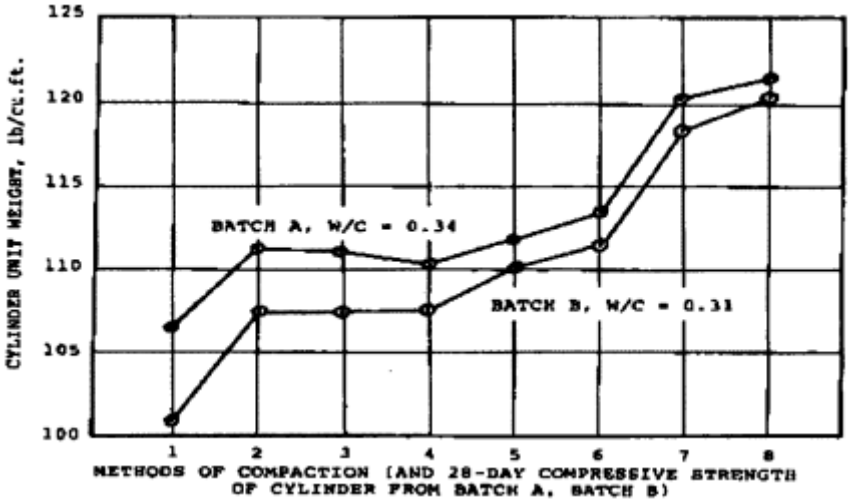


Figure 1.27 Effet de l'énergie de consolidation sur la masse volumique [71]

1.4.4 Effet de la porosité sur la résistance à la compression

Schaefer et al. [87] ont trouvé une relation linéaire entre la résistance à la compression et le taux de vide (figure 1.28). 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 figure1.28 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 %.

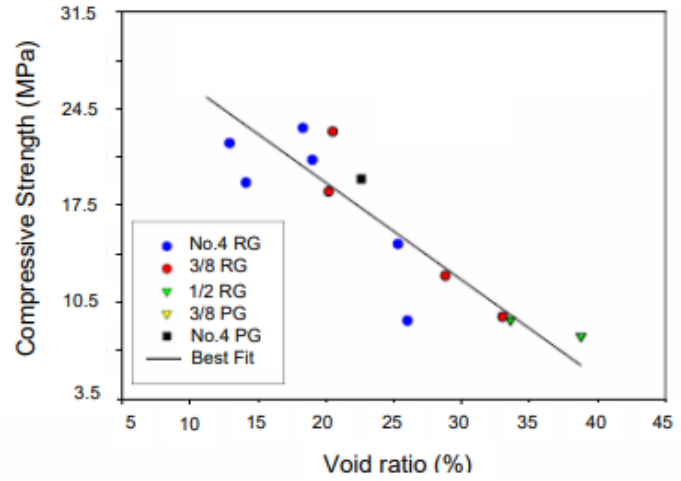


Figure 1.28 Relation entre la résistance à la compression et la teneur en vides [87]

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 1.29 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 [73].



Figure 1.29 Comparaison visuelle d'échantillons de béton drainant avec des granulats de différentes dimensions et combinaisons [73]

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 [74].

Neithalath et al. [75] 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 [76] 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 [77] 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 [78] 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 [79] 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. [80].

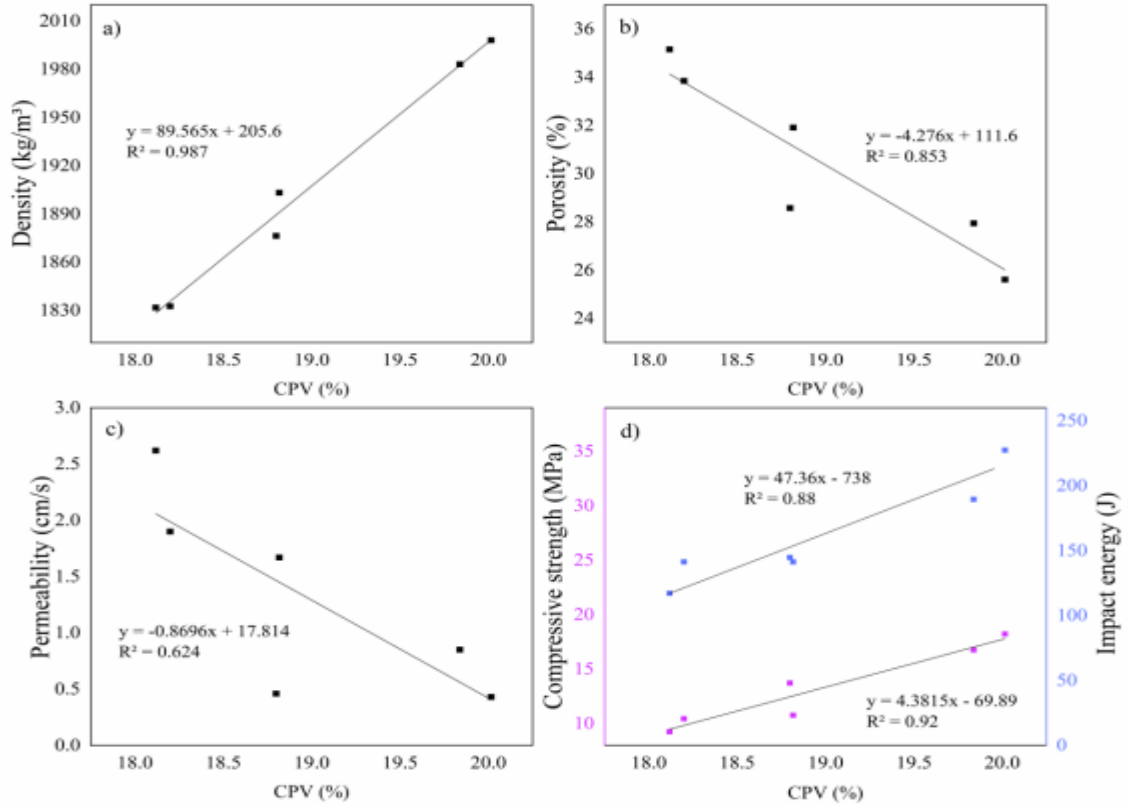


Figure 1.30 Corrélations entre CPV et a) densité, b) porosité, c) perméabilité, d) résistance à la compression et énergie d'impact [80]

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 [81]. Une étude a montré une relation entre la taille des granulats et la porosité effective des échantillons du béton drainant (figure 1.31) [82]. 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 1.31). Une porosité effective d'au moins de 15% est nécessaire pour assurer une perméabilité minimale [83]. 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 [84] ont trouvé une excellente relation entre la masse volumique des échantillons au laboratoire et le volume total des vides.

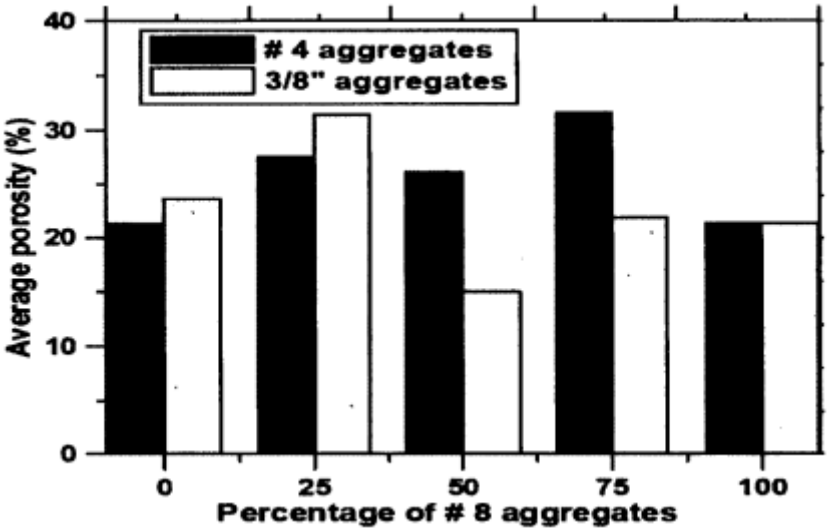


Figure 1.31 Relation entre la taille des granulats et la porosité effective [82]

1.5 Applications du béton drainant

Mentionne que le béton drainant a été utilisé dans un large éventail d'applications. Celles-ci sont présentées ci-dessous :

- Revêtement perméable pour les parkings.
- Couches de drainage rigides sous les zones extérieures du centre commercial.
- Sols de serres pour éviter la formation d'eau stagnante.
- Applications de murs structuraux où la lumière ou de meilleures caractéristiques d'isolation thermique, ou les deux, sont requises.
- Pavages, murs et sols pour lesquels des caractéristiques d'absorption acoustique améliorées sont souhaitées.
- Sous-couche pour les rues, les autoroutes, les voies d'accès et les aéroports.
- Couche de roulement pour les parcs et les courts de tennis.
- Pont pour les zoos, les animaleries et les terrasses de piscine [85].



Figure 1.32 Applications du béton drainant : (a) aires de stationnement ; (b) pistes cyclables et espaces verts [140]

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 [86].



Figure 1.33 Préparation du sol [142]

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 1.34 Pose des joints de dilatation [143]

1.6.3 Etalage du béton drainant

Cette étape sera la plus longue et la plus laborieuse. En effet, il est nécessaire de transporter une grande quantité de béton frais, puis de l'étaler, le niveler et le compacter. Lorsque le béton est livré, il est encore humide et a une apparence similaire à celle de la terre. Il doit donc être réparti uniformément à l'aide d'un râteau pour remplir tous les espaces vides et recouvrir entièrement la zone concernée.



Figure 1.35 Etalage du béton drainant [141]

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 [86].



Figure 1.36 Damage du béton drainant [141]

1.7 Histoire des revêtements perméables

Le béton drainant a été largement utilisé comme matériau principal dans la construction de chaussées perméables. Ces systèmes de chaussées perméables ont gagné en popularité au cours de la dernière décennie en raison de leur contribution significative aux systèmes de drainage durables. Contrairement au système traditionnel de drainage basé sur des canalisations développé depuis le 19e siècle, qui tend à entraîner des ruissellements des eaux pluviales, notamment dans les zones urbaines, les systèmes de chaussée perméable offrent une alternative plus efficace.

Les systèmes de chaussée perméable jouent un rôle essentiel dans la gestion des eaux de ruissellement, en particulier dans les zones urbaines. 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'inscrivent 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. [91].

1.8 Avantages et les inconvénients du béton drainant

Les principaux avantages des revêtements perméables sont les suivants [90] :

- 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 [92] :

- Le manque d'expérience des ingénieurs.
- 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 02 : Matériaux Et Méthodes

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons, au premier lieu présenté les différents matériaux utilisés dans la confection des bétons étudiés. Par la suite nous avons présenté les démarches techniques suivies pour faire des mesures fiables et représentatives. Enfin, nous exposons les différentes méthodes de formulation adoptées, les outils et les procédures lors de réalisation des essais expérimentaux.

2.2 Matériaux utilisé

2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un Ciment Portland Composé (CEM II/B-L 42,5 N), conforme à la norme Algérienne NA 442 [93] et Européenne EN 197-1 [94].



Figure 2.1 Le ciment utilisé [148]

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

Tableau 2.1 : Caractéristiques du ciment utilisé

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 (cm^2/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 Gravier

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé deux types de granulats 3/8 : l'un d'origine naturelle et l'autre recyclé. Les granulats naturels utilisés proviennent du concassage de roches calcaires de la région de Djelfa, tandis que les granulats recyclés ont été préparés manuellement en utilisant un marteau après avoir concassé les cubes de béton, puis ils ont été broyés au concasseur à mâchoires.



Figure2.2 échantillons de graviers utilisés

2.2.3 Superplastifiant :

L'adjuvant utilisé dans notre étude est le superplastifiant "Sika® ViscoCrete® TEMPO-10", C'est un haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération sans chlore, formulé à base d'un copolymère acrylique. Les caractéristiques du superplastifiant utilisé sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristiques du TEMPO-10 [149]

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 2.3 Super plastifiant Sika TEMPO-10 [149]

2.3 Essais

2.3.1 Essais de caractérisation des matériaux

2.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse Granulométrique par tamisage est une méthode d'essai qui consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. On trace ensuite la courbe granulométrique, courbe exprimant les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs. L'analyse a été effectuée conformément à la norme EN-12620 [95].

La courbe de l'analyse granulométrique des différents graviers est présentée dans la figure 2.4.

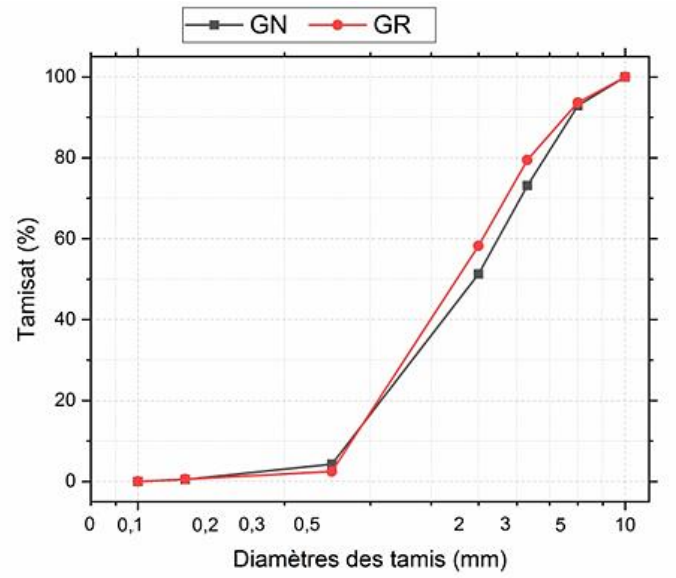


Figure 2.4 Courbes granulométriques des granulats utilisés

2.3.1.2 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) [96].

- **Masse volumique apparente (M_{va})** : C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

- **Masse volumique absolue ou réelle (M_{vr})** : 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 2.5 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 granulates	**Gravier naturel 3/8**	**Gravier recyclé 3/8**
$\boldsymbol{M_{va}}$ (g/cm³)	1.21	1.16
$\boldsymbol{M_{vr}}$ (g/cm³)	2.68	2.48

2.3.1.3 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 figure2.6). 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 intergranulaire [97, 98].



Figure 2.6 Appareillage utilisé pour déterminer la masse volumique pilonnée

Tableau 2.4 résultats de la masse volumique pilonnée.

Granulats	G N (g/cm³)	G R (g/cm³)
M_v Pilonnée	1,47	1,31

2.3.1.4 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 [99].



Figure 2.7 Essai de l'absorption d'eau.

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

Granulats	G N (%)	G R (%)
Absorption	0 ,91	6,66

2.3.1.5 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 [100].

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

$$L_A = \frac{m}{M} \text{ x } 100 \quad \text{…….. (II.1)}$$



Figure 2.8 Essai de Los Angeles

Tableau 2.6 Résultats de l'essai de los angeles

	Gravier naturel		Gravier recyclé	
M (g)	5000	5000	5000	5000
Diamètre de G (mm)	4/6.3	6.3/8	4/6.3	6.3/8
La masse totale de la charge (g)	3065	3950	3065	3950
m' (g)	3870	3710	3836	3695
m (g)	1130	1279	1132	1258
L_A (%)	22,6	25,8	23,28	26,1

2.3.1.6 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 2.9, jusqu'à la fin des essais prévus.



Figure 2.9 Conservation des éprouvettes

2.3.2 Essais à l'état frais

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

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il peut être utilisé tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm [101]. Pour mesurer l'affaissement, on verse le béton frais dans le moule dès la fin de son malaxage, en le répartissant en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage.

Ensuite, on nivelle la surface du moule et on le démoule immédiatement en le soulevant. Enfin, on mesure l'affaissement à partir du point le plus bas du béton.

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

- ✓ L'essai doit être réalisé sur une surface horizontale
- ✓ L'essai complet doit être exécuté sans interruption en moins de 2min :30sec
- ✓ Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes
- ✓ Mesurer l'affaissement du béton à 10 mm près.



Figure 2.10 Essai de cône d'Abrams

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

Consistence	**Affaissement (cm)**	**Tolerance**
Ferme (F)	0 à 4	±1cm
Plastique (P)	5 à 9	±2cm
Très Plastique (TP)	10 à 15	±3cm
Fluide (F)	≥ 16	

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 (Figure). La densité du béton frais D_{frais} est déterminée selon la formule (2) suivante :

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

Avec :

M_1: La masse du récipient.

M_2 : La masse du béton contenue dans le récipient + la masse du récipient.

V : Volume du récipient.



Figure 2.11 La densité à l'état 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 définie comme étant le rapport entre la masse de l'éprouvette sèche (M) et leur volume (V) (Figure 2.12) l'équation (II.3). La densité a été effectués en utilisant des éprouvettes cubiques (10 ×10 ×10 cm).

$$D_{sèch} = \frac{M}{V} \rho_{eau} \quad \text{..... (II.3)}$$



Figure 2.12 Densité à l'état durci.

2.3.3.2 Essai de porosité (NF P18-459)

La méthode consiste à mesurer le volume d'eau occupant les pores interconnectés d'un échantillon de béton de volume connu. L'essai a été effectué sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur.

- **Conduite de l'essai [102]**

- 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) :

$$P\% = 100 \times (M / V) \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (II.4)$$



Figure 2.13 Essai de porosité

2.3.3.3 Essai de perméabilité (ASTM D 5084)

La perméabilité des bétons étudiés est évaluée en utilisant un perméamètre à charge variable développé au laboratoire, conformément à la norme ASTM D 5084 [103] (voir Figure 2.14). 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 (mm/sec) est calculé à l'aide de l'équation (5) suivante :

$$k = \frac{aL}{At} \ln\frac{h0}{h1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textit{(II.5)}$$

Où

a : La surface de la colonne au-dessus de l'éprouvette (mm^2);

L : La longueur de l'échantillon (mm) ;

A : La section de l'éprouvette (mm^2) ;

h_0 = Le niveau d'eau initial (mm) ;

h_1= Le niveau d'eau final (mm) ;

t = temps pour que l'eau passe de h_0 à h_1 (sec);



Figure 2.14 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 effectuée sur des éprouvettes cubiques (10 x 10 x 10) à l'aide d'une presse, Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions (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 [104].



Figure 2.15 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 [105].

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon deux génératrices d'une éprouvette cylindrique de 10 x 20 cm. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.



Figure 2.16 Résistance à la traction par fendage.

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

Appelé communément "essai aux ultrasons", cet essai est utilisé pour déterminer la vitesse de propagation des ondes longitudinales (de compression) à travers une éprouvette cylindrique de 10 x 20 cm. Le principe de cette méthode repose sur la mesure du temps nécessaire à une onde pour parcourir une distance spécifiée [106].

L'essai ultrason passe par trois étapes primordiales :

- Préparation de l'éprouvette.
- Point de mesure.
- Disposition du transducteur.



Figure 2.17 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) [145], l'essai a été effectué sur des éprouvettes de dimensions similaires en termes de diamètre et de hauteur (D = H = 100 mm). Il est essentiel que ces échantillons possèdent deux surfaces opposées parfaitement planes, c'est pourquoi les échantillons cylindriques sont meulés, tout comme dans l'essai de résistance à la compression. La méthode implique l'insertion d'une sonde extrêmement fine entre deux échantillons, où la sonde génère de la chaleur à l'aide d'un fil chaud. La conductivité thermique est ensuite calculée en fonction du temps nécessaire à la chaleur pour atteindre le thermocouple, qui dépend à son tour de la résistance thermique du béton.



Figure 2.18 Essai de conductivité thermique

2.3.3.8 Essai de retrait et gonflement (NF P 18-427)

Des essais de gonflement et de retrait sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques de 7×7×28 cm conformément à la norme NF P 18-427 [146]. Les mesures sont effectuées par une méthode de comparaison linéaire. Les échantillons de retrait sont positionnés sur des plaques séchées à l'air, tandis que les échantillons de gonflement sont directement immergés dans l'eau.



Figure 2.19 Mesure de retrait et gonflement.

2.3.3.9 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].



(a)



(b)



(c)

Figure 2.20 Essai d'abrasion (a) le tambour de Los Angeles (b) échantillon avant essai ; (c) échantillon après l'essai

2.4 Confection des bétons étudiés

- Le béton drainant a été préparé dans un malaxeur vertical d'une capacité de 150 litres, en passant par les étapes suivantes :
- Les granulats et le ciment sont d'abord mélangés pendant une minute afin d'homogénéiser le mélange.
- Le mélange est malaxé pendant une minute en utilisant 70% de la quantité d'eau requise.
- Le malaxage est effectué pendant une minute avec le reste de l'eau, préalablement mélangée avec le super plastifiant.
- Une pause de 2 minutes est observée, pendant laquelle on procède au nettoyage du béton adhérant aux parois et au fond du malaxeur.
- Ensuite, reprendre le malaxage pendant 2 minutes supplémentaires.



Figure 2.21 Malaxeur à axe vertical

2.5 Formulation du béton drainant ACI 522

La formulation du béton drainant est exposée dans les rapports des comités 211 et 522 de l'ACI [150.151]. Cette méthode de formulation se base sur la masse volumique pilonnée des granulats utilisés, évaluée conformément à la norme ASTM C 29 [152].

Nous avons deux objectifs principaux. Premièrement, nous cherchons à atteindre un équilibre approprié où la taille de la pâte est adaptée à la cohésion des granulats. Deuxièmement, nous visons à obtenir une perméabilité adéquate en réservant un pourcentage satisfaisant du volume des vides, afin de garantir une maniabilité satisfaisante.

Le graphique présenté ci-dessous illustre la relation entre le volume de la pâte et le volume des vides. Dans notre étude, nous avons choisi un volume de pâte de 18%, ce qui correspond à un volume de vides d'environ 23% (avec une légère vibration appliquée). Ce point représente le point de compatibilité le plus favorable dans les deux cas. Une fois que le volume de pâte est déterminé, le rapport E/C est maintenu initialement à 0,28.

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.

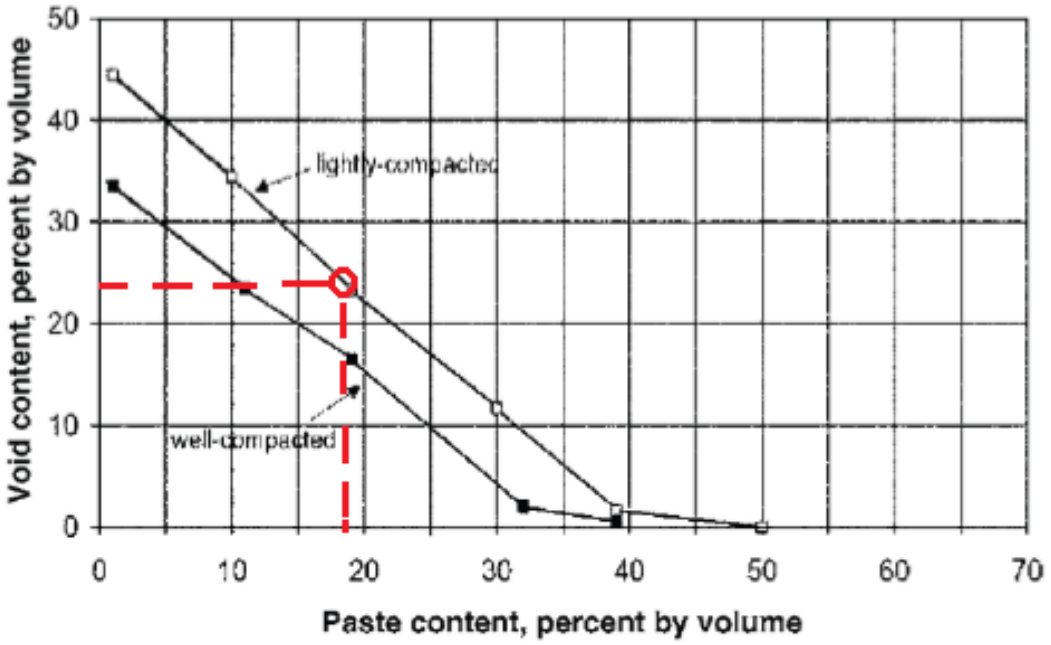


Figure 2.22 Relation entre le volume de pâte et le volume de vide [151]

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

$$C = \frac{v_p}{p_c + \frac{E}{c}} \quad \ldots\ldots\ldots \textit{(II.6)}$$

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 [152].

$$G = M_{vp} \times {}^{b}/_{b_0} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \textit{(II.7)}$$

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

Pourcentage des granulats fins	${}^{b}/_{b_0}$	
	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

Les granulats de béton recyclé (GBR) ont été employés pour substituer les granulats naturels à différents taux de substitution volumique, à savoir 0%, 25%, 50%, 75% et 100%.

Le tableau ci-dessous présente le calcul des proportions des granulats naturels et des granulats de béton recyclé utilisés dans notre étude.

Nous avons fixé le dosage en ciment et le rapport E/C dans notre étude.

- Le dosage en Sp est pris 1.2 % du poids de ciment pour le mélange témoin.

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

Mélange	Gravier naturel 3/8 (kg/m^3)	Gravier recyclé 3/8 (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	E/C	Sp (%)
BT	1500	0	300	0.28	1.2
BD25	1125	335			1.4
BD50	750	670			1.6
BD75	375	1005			1.7
BD100	0	1340			1.8

Nomenclature utilisée :

- BT : Béton témoin avec 100% de GN.
- B25 : Béton drainé avec 25 % de granulats recyclés de béton.
- B50 : Béton drainé avec 50 % de granulats recyclés de béton.
- B75 : Béton drainé avec 75 % de granulats recyclés de béton.
- B100 : Béton drainé avec 100 % de granulats recyclés de béton.

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 confectionnés à base de granulats de béton recyclé

3.2. béton drainant a base de déchets de béton

Cette d'étude consiste à utiliser les granulats de béton recyclés comme remplacement des granulats naturels. 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) ;
- Retrait et gonflement ;
- 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	1,76	1.2	8,52	12,18	16,32	1,26	2,15	3,05
BD25	20	1,70	1.4	7,33	11,03	14,27	0,94	1,85	2,11
BD50	19	1,64	1.6	7,20	10,65	12,82	0,86	1,83	1,98
BD75	20,5	1,58	1.7	6,94	8,75	10,25	0,76	1,52	1,67
BD100	19,5	1,55	1.8	6,58	7,94	9,68	0,69	1,10	1,39

Aff : Affaissement

Sp : superplastifiant

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	1,72	23,84	14,74	0,97	2127	30,26
BD25	1,66	25,24	12,61	0,84	2083	28,79
BD50	1,6	26,69	11,73	0,75	1964	27,55
BD75	1,54	27,54	11,18	0,63	1908	26,21
BD100	1,51	29,40	10,49	0,59	1876	24,34

K : Coefficient de perméabilité hydraulique

CT : Conductivité thermique

AD : Auscultation dynamique

3.2.1 Affaissement au cône d'Abrams

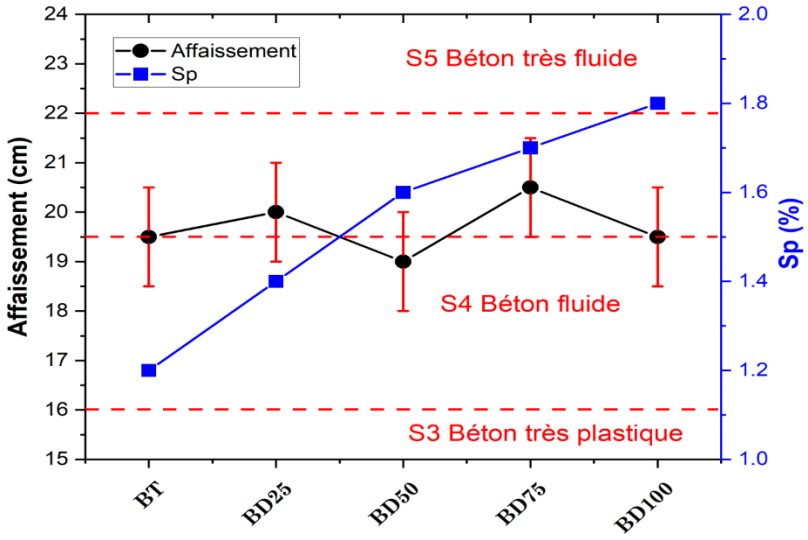


Figure 3. 1 Affaissement en fonction de la teneur en GBe

L'ouvrabilité des différents bétons étudiés a été appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN12350 [181].

D'après la Figure 3.1, il est évident que les mélanges contenant des proportions plus élevées de granulats recyclés nécessitent des quantités supplémentaires de superplastifiant pour obtenir un affaissement similaire au mélange de référence. Dans notre étude, nous avons utilisé un superplastifiant à des doses variables allant de 1,2% à 1,8% lors de la production du béton. Cela nous a permis d'obtenir une ouvrabilité dans la plage de 19 à 21 cm, conformément à la classe S4 (béton de consistance fluide).

Le remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés réduit la maniabilité. Cette perte d'ouvrabilité est attribuée à la forme angulaire des GBe ainsi que leur coefficient d'absorption élevée (6,66 %) [175]. Bravo, M et al, [163] et De Brito et al, [164] ont également trouvé des résultats similaires.

3.2.2 Densité a l'état frais et durci

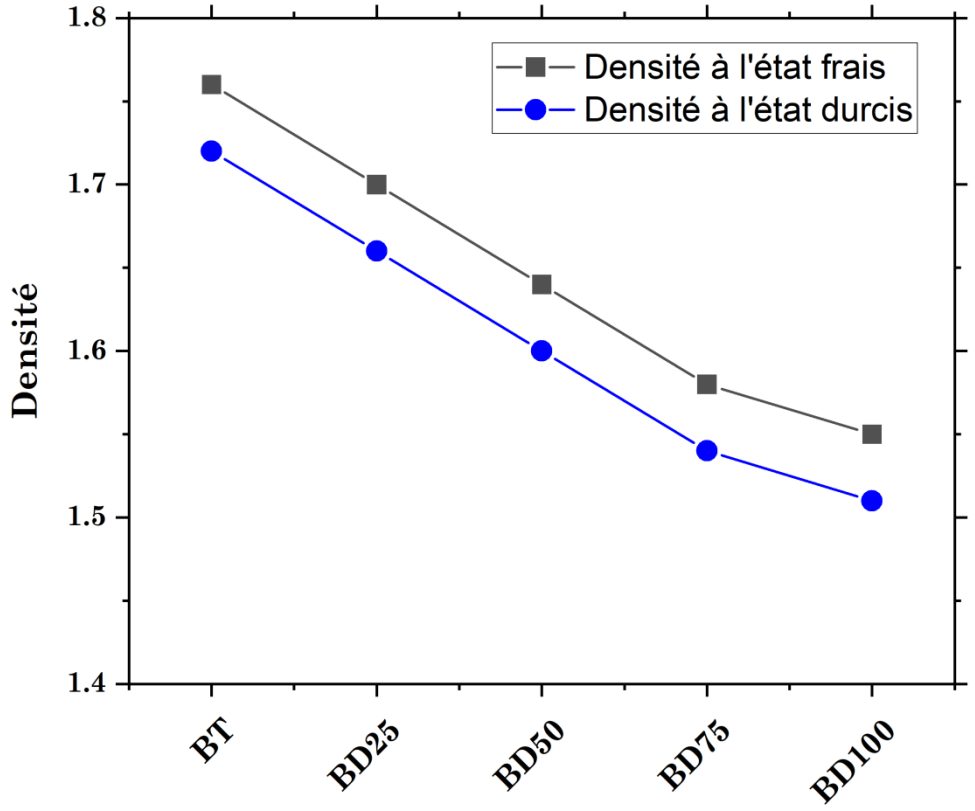


Figure 3.2 Évolutions de la densité en fonction de la teneur en GBe

D'après la figure 3.2 on observe une diminution de la densité à l'état frais et durci d'environ 14 % pour une substitution de 100% des GN par les GBe. Cette observation peut s'expliquer par le fait que les GBe présentent une porosité plus élevée et une densité plus faible par rapport aux GN, ce qui est généralement observé dans le cas du béton recyclé. Cela se manifeste par un coefficient d'absorption élevé des granulats recyclés (6,66 %), tandis que les granulats naturels présentent une absorption faible (1 %).

Selon les spécifications de la norme NF EN 206 [155], le béton étudié est donc considéré comme léger, avec une densité comprise entre 1,5 et 1,8. O. Kayali et al, [156] et Zaetang, Y et al [158] ont effectivement obtenu des résultats similaires.

3.2.3 Les résistances à la compression

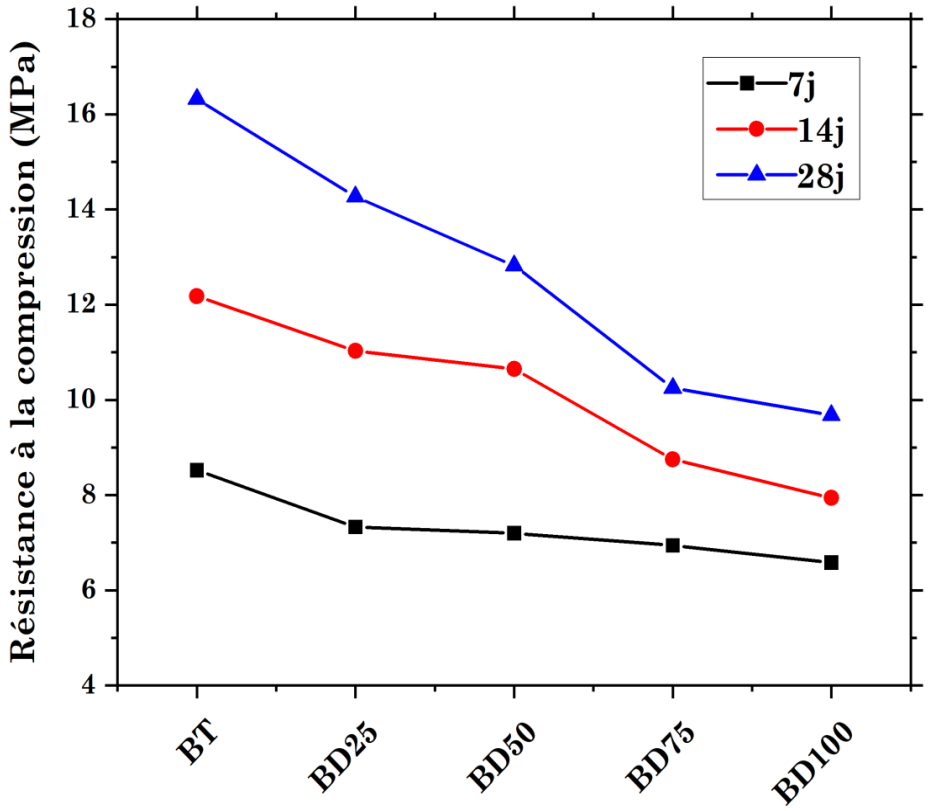


Figure 3.3 Évolutions de la résistance à la compression en fonction de la teneur en GBe

La figure 3.3 illustre l'évolution de la résistance à la compression et à la traction de tous les mélanges aux âges de 7, 14 et 28 jours. On observe une diminution de la résistance des bétons à base des GBe par rapport aux cellules contenant des GN avec un taux de diminution de l'ordre de 70 %. La diminution de la résistance à la compression est principalement attribuable à la présence du mortier provenant de l'ancien béton qui reste attaché aux granulats recyclés. Ce mortier perturbe le bon déroulement de l'hydratation du ciment, affaiblissant ainsi la zone de transition [183].

Cette diminution peut être attribuée aussi à la réduction de la liaison entre les granulats et la pâte de ciment lors de l'utilisation d'agrégats recyclés, ainsi qu'à l'augmentation du taux de vide. Généralement, on s'attend à ce que la résistance à la compression du béton poreux soit influencée par la résistance des granulats et le taux de vide total. Bhutta et all [153] ont observé que l'utilisation des granulats recyclés dans le béton préfabriqué entraîne une diminution de sa résistance à la compression par rapport à l'utilisation des granulats naturels, en raison du taux de vide élevé présent dans le béton contenant des granulats recyclés.

3.2.4 La résistance à la traction

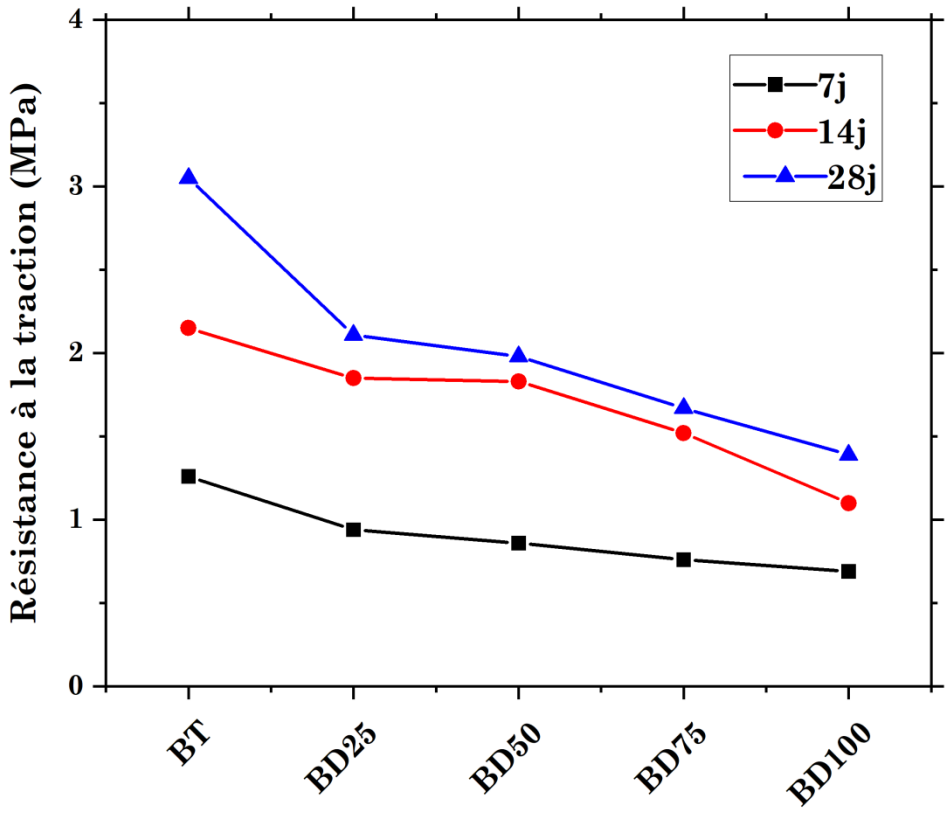


Figure 3.4 Évolutions de la résistance à la traction en fonction de la teneur en GBe

La figure 3.4 montre clairement une chute de la résistance à la traction en fonction de l'augmentation de la teneur en GBe. La résistance à la traction des bétons confectionnés diminue de 3,05 MPa à 1,39 MPa par rapport au béton témoin (BT).

La principale raison de cette diminution est l'augmentation de la porosité du béton dû à la teneur croissante en GBe. En Outre, l'adhérence entre les granulats de béton recyclé et la pâte de ciment est moins forte, ce qui entraîne une résistance à la traction plus faible. Zhu et all [154] ont trouvé que plus la proportion de granulats recyclés dans les bétons drainants est élevée, plus la résistance à la traction est faible. Ces conclusions concordent avec nos propres constatations.

3.2.5 Porosité connectée

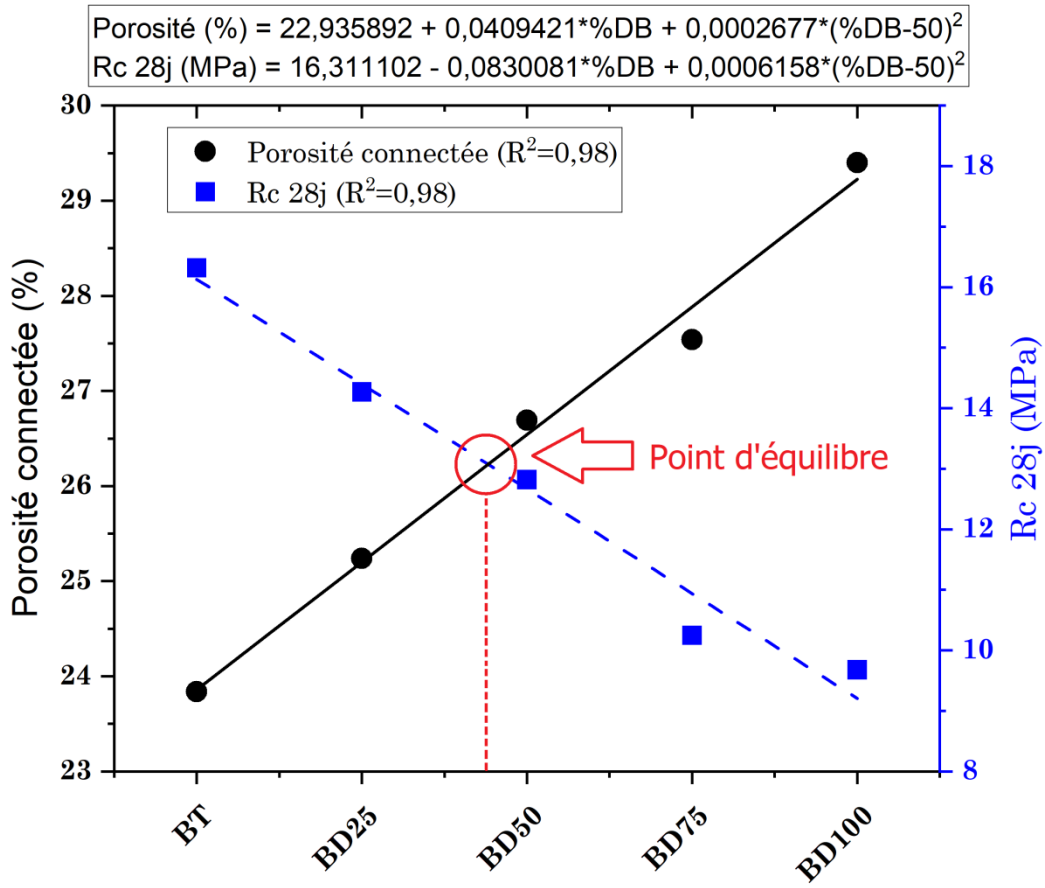


Figure 3.5 Évolutions de la porosité connectée et Rc 28j en fonction de la teneur en GBe

L'incidence de la substitution des granulats naturels par différents pourcentages de granulats de béton recyclé sur la porosité connectée et la résistance à 28 jours (Rc28j) est présentée dans la figure 3.5. On observe que les mélanges comportant des taux élevés de GBe se caractérisent par une porosité élevée et une faible résistance par rapport aux autres combinaisons.

En ce qui concerne les faibles taux de GBe, on ne constate pas une augmentation remarquable de la porosité. Les granulats de GBe dans ce cas commencent à occuper l'espace entre les GN. Les études précédentes ont révélé que le béton fabriqué à partir de granulats recyclés présente une porosité plus élevée par rapport au béton utilisant des granulats naturels. Cette observation a été attribuée à la présence d'une porosité élevée dans le mortier qui adhère à la surface des granulats recyclés [188-190].

Un point d'équilibre entre la porosité et la résistance est observé pour un taux de substitution de l'ordre de 50% des GN par les GBe. Une augmentation de l'ordre de 23% de la porosité ouverte est enregistrée aussi avec le remplacement total des GN par les GBe.

3.2.6 Perméabilité hydraulique

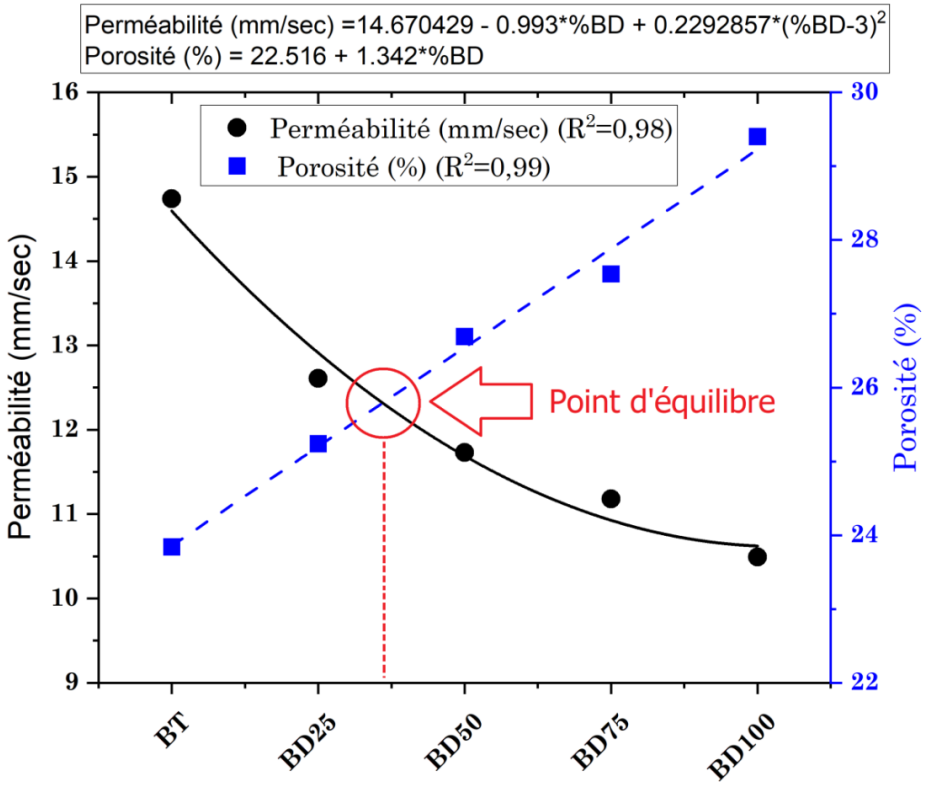


Figure 3.6 Perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de la teneur en GBe

La figure 3.6 présente la variation de la perméabilité hydraulique et de la porosité en fonction de l'augmentation des proportions de granulats de béton recyclé. On observe que l'augmentation des GBe entraîne une diminution des valeurs du coefficient de perméabilité, tandis que la porosité effective augmente. Certains chercheurs ont obtenu des résultats similaires [172].

Il est également constaté que le béton drainant confectionné avec un taux de substitution d'environ 40% des GN par les GBe permet d'obtenir à la fois 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 [191]. Certaines études ont effectivement suggéré que les granulats de béton recyclé peuvent présenter une tortuosité plus élevée que les granulats naturels, ce qui pourrait potentiellement réduire l'écoulement de l'eau dans le béton drainant [192 - 194].

Le taux de diminution de la perméabilité est d'environ 40% pour une substitution totale des GN par les GBe. La perméabilité des bétons étudiés se situe entre 10 et 15 mm/sec. Cette perméabilité est largement suffisante par rapport à la limite inférieure recommandée de l'ordre de 1 mm/sec [173].

3.2.7 Conductivité thermique

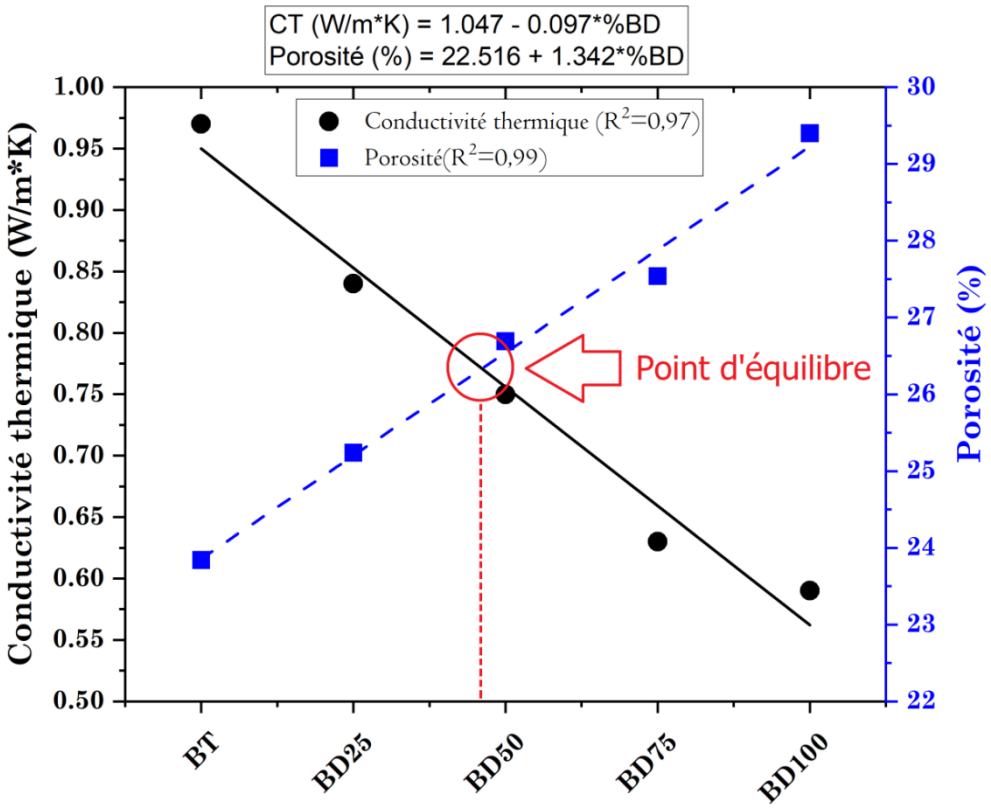


Figure 3.7 Evolution de la conductivité thermique et la porosité en fonction de GBe

La figure 3.7 présente la variation de la conductivité thermique et de la porosité effective en fonction de l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par les granulats de béton recyclé. L'augmentation des proportions de GBe entraîne une diminution de la conductivité thermique et une augmentation de la porosité des bétons drainants étudiés.

Il est bien connu qu'un taux élevé de remplacement des GN par GBe dans le béton entraîne une rétention accrue d'eau dans la matrice. Par conséquent, une plus grande quantité de pores se formera dans la matrice au fil du temps. De plus, la conductivité thermique de l'eau est de 0,576 W/m·K, tandis que celle de l'air est de 0,03 W/m·K. Ainsi, si l'eau est remplacée par de l'air, la conductivité thermique diminuera [176].

La conductivité thermique est réduite de plus de 64 % pour une substitution complète des GN par les GBe. Les résultats montrent également qu'il existe un point d'équilibre entre la conductivité thermique et la porosité effective pour une substitution de l’ordre de 50% des GN par les GBe. Les valeurs de conductivité thermique des bétons formulés se situent dans la plage de 0,59 à 0,97 W/m·K, ce qui témoigne d'une bonne performance d'isolation thermique.

La conductivité thermique des bétons drainants est principalement liée à leur densité apparente. Ainsi, 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 faible. En général, les bétons légers présentent des valeurs de conductivité thermique comprises entre 0.4 et 1 W/m.K à l'état sec [174].

3.2.8 Auscultation dynamique

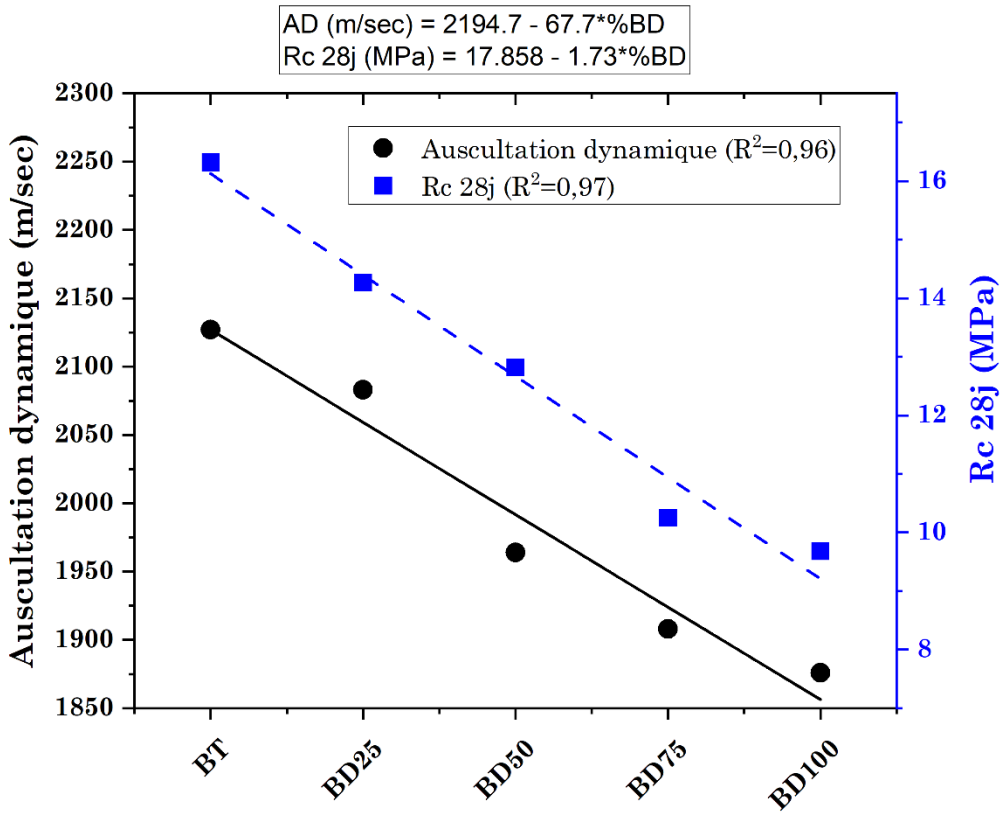


Figure 3.8 Auscultation dynamique et Rc28j en fonction de la teneur en GBe

L'évolution de l'auscultation dynamique et de la résistance à la compression à 28 jours est présentée dans la figure 3.8. Les résultats obtenus indiquent que l'introduction de GBe entraîne simultanément une diminution de la vitesse des ondes ultrasoniques et de la résistance à la compression. La vitesse des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression diminuent de l'ordre de 40%. Il est possible que des fissures se forment pendant le processus de concassage du béton recyclé, ce qui affecte directement la porosité globale du béton et réduit par conséquent la vitesse de propagation et la résistance mécanique [177].

3.2.9 Retrait et gonflement

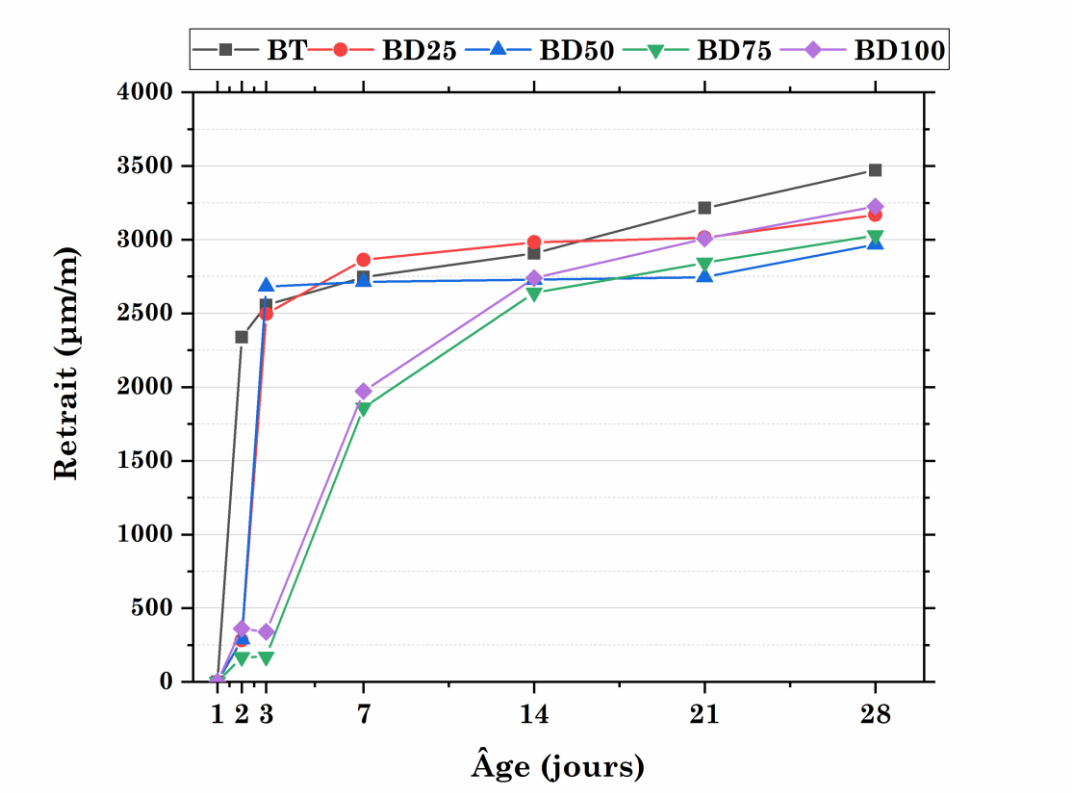


Figure 3.9 Évolutions du retrait en fonction de la teneur en GBe

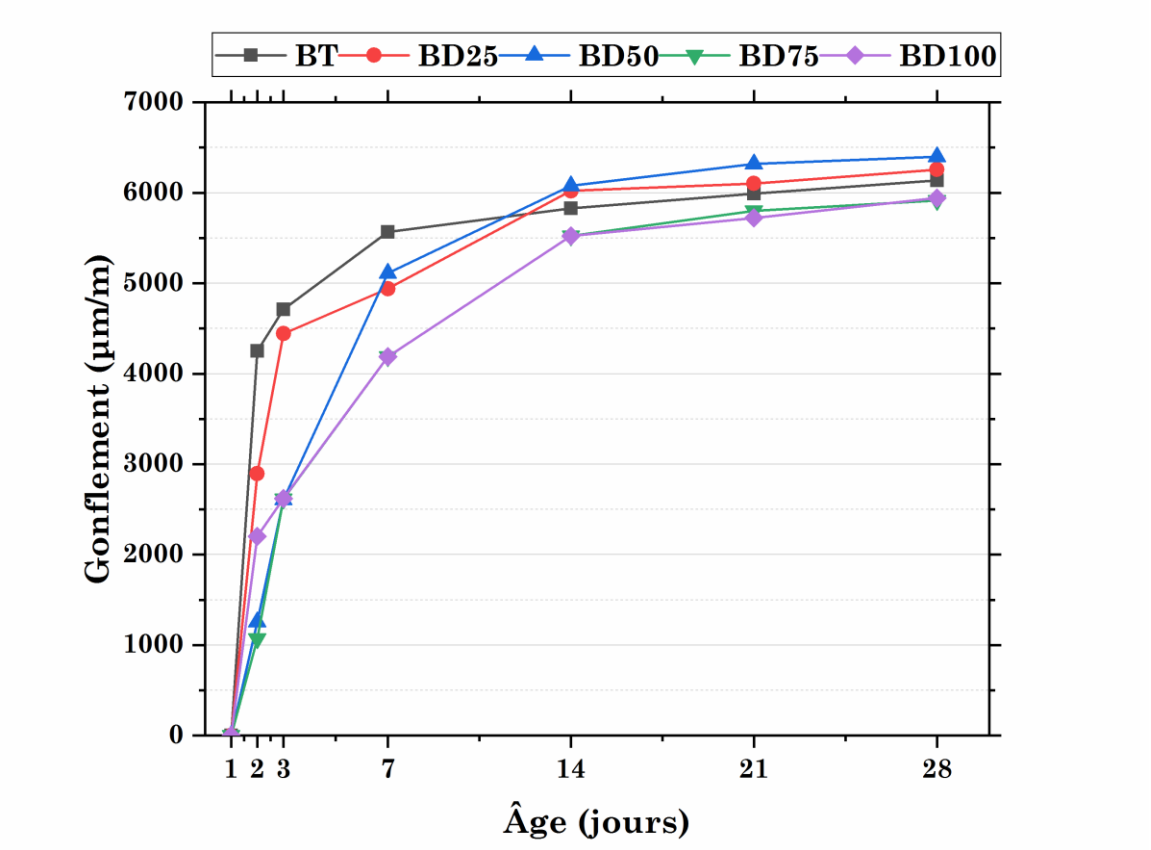


Figure 3.10 Évolutions du gonflement en fonction de la teneur en GBe

Les résultats du retrait et gonflement des bétons confectionnés sont présentés dans les figures 3.9 et 3.10. Le retrait de séchage des échantillons d'essai a augmenté au fil du temps et a commencé à se stabiliser vers 28 jours selon des tendances similaires rapportées par plusieurs chercheurs. Pour des teneurs élevées en GBe, on observe que le retrait se caractérise par des valeurs faibles par rapport aux autres mélanges. Cette observation peut s'expliquer par le fait que les granulats de GBe ont absorbé une certaine quantité d'eau en raison de leur grande capacité d'absorption. Ensuite, lors de la prise, ces granulats ont libéré cette quantité d'eau, ce qui a compensé l'évaporation de l'eau du béton. Par conséquent, le retrait du béton diminue [178]. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres auteurs [170] [171].

3.2.10 Résistance à l'abrasion

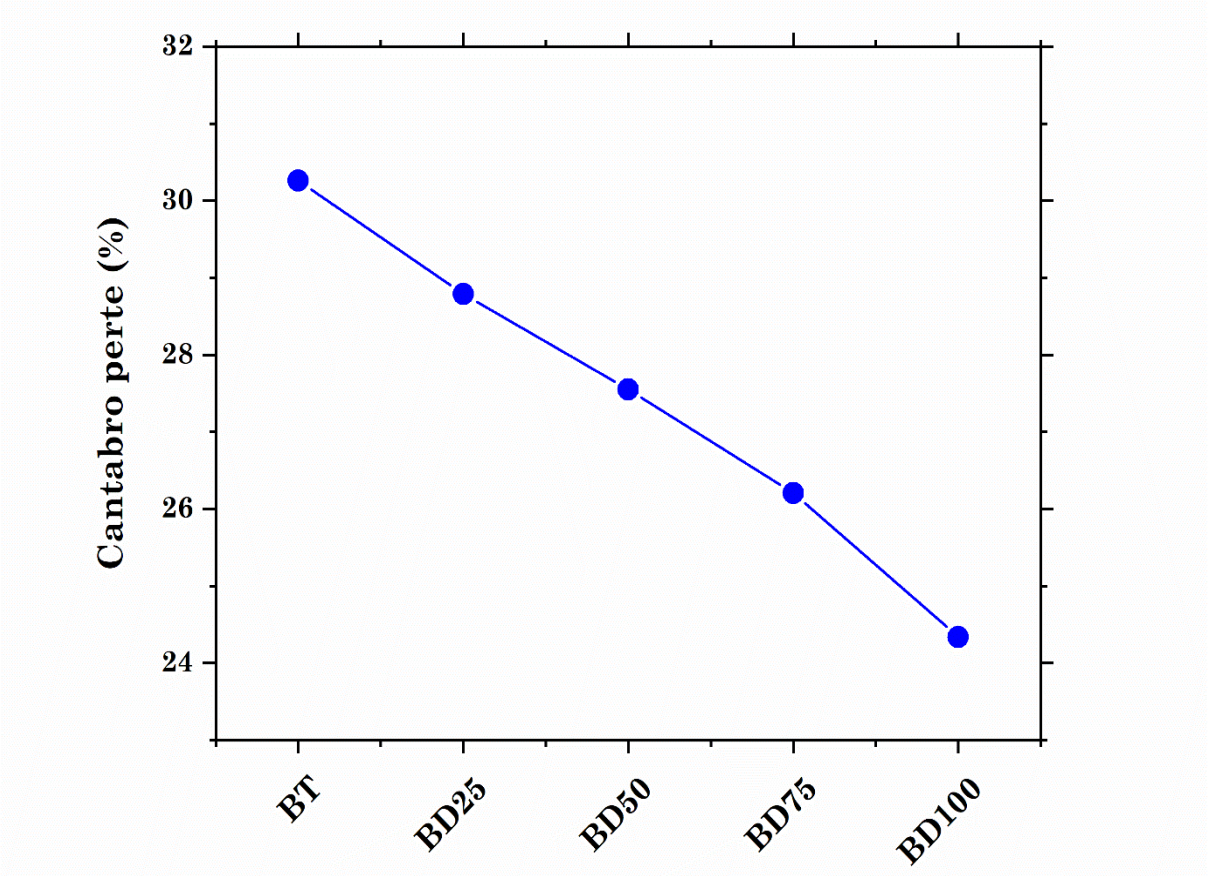


Figure 3.11 la résistance à l'abrasion en fonction de la teneur en GBe

La figure 3.10 présente la variation de la résistance à l'abrasion des différents bétons étudiés, évaluée par l'essai Cantabro. L'essai Cantabro a révélé une faible perte de matériau pour des teneurs plus élevées en granulats de béton recyclé. Cela peut être expliqué par la quantité plus élevée de mortier adhéré [179]. Des résultats similaires ont été rapportés par Smith, J et Movassaghi, R [180, 181].

Il est important de souligner aussi que la qualité de la pâte est le facteur prédominant pouvant affecter la résistance à l'abrasion [182]. 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.

3.2.11 Relation entre la porosité connectée et la résistance

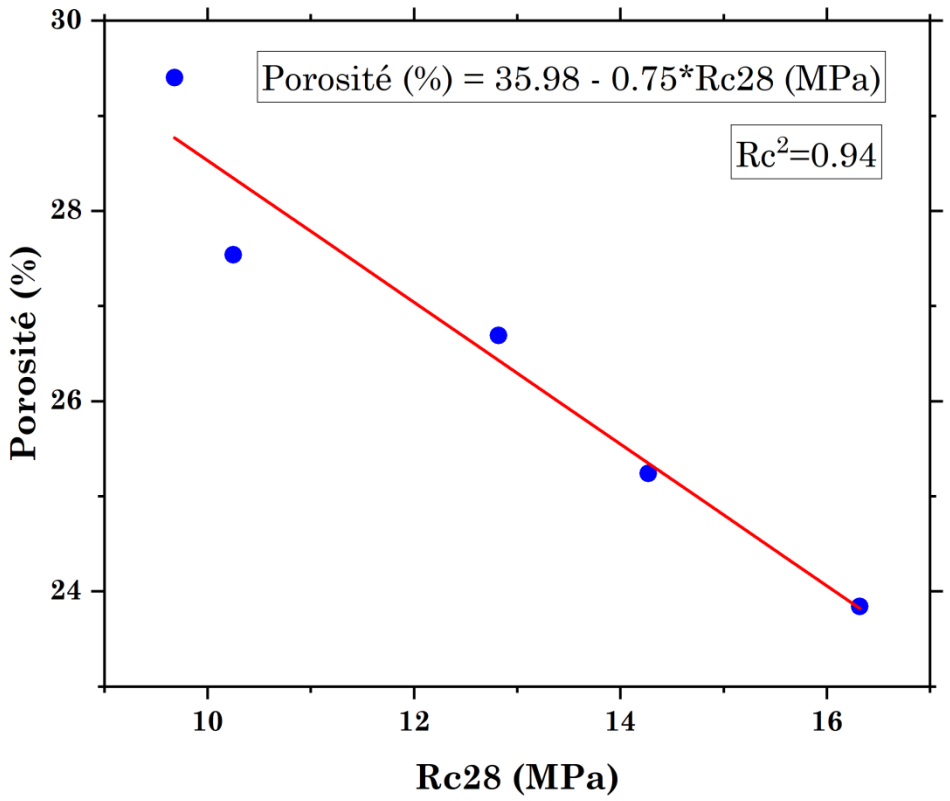


Figure 3.12 Corrélations entre la porosité connectée et Rc28

Une corrélation significative a été établie entre la porosité connectée et la résistance à la compression à 28 jours (R^2=0.94), comme illustré dans la figure 3.12. La porosité ouverte est directement liée à la résistance en compression, ce qui reflète les caractéristiques intrinsèques du béton résultant de sa composition [184].

D'autres études ont également obtenu des résultats similaires aux nôtres et ont confirmé l'existence d'une relation inverse entre la porosité et la résistance à la compression [159], [160].

3.2.12 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique

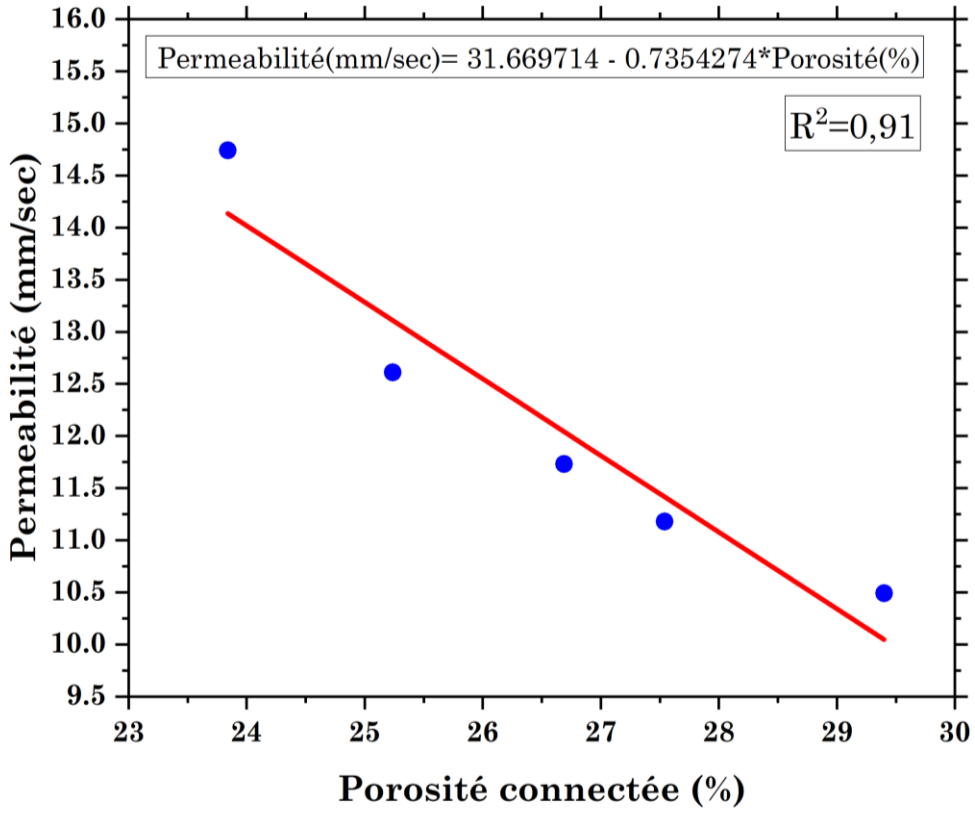


Figure 3.13 Corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique

Les résultats obtenus ont révélé une très bonne corrélation entre la perméabilité hydraulique et la porosité effective, avec un coefficient de détermination (R^2 = 0,88). Dans cette étude, une augmentation de la porosité a un impact négatif sur la perméabilité hydraulique. Cela peut s'expliquer par le fait que la porosité effective est une propriété volumétrique, tandis que la perméabilité intrinsèque est une propriété qui détermine la capacité d'écoulement, et qui dépend non seulement de la quantité des pores. Dans notre cas, l'analyse granulométrique a montré que la granulométrie des GBe est inférieure à celle des GN, ce qui peut influencer le diamètre des pores interconnectés. Il est également important de noter que l'angularité et la texture rugueuse des granulats de GBe peuvent influencer la perméabilité hydraulique.

3.2.13 Relation entre la densité et la résistance

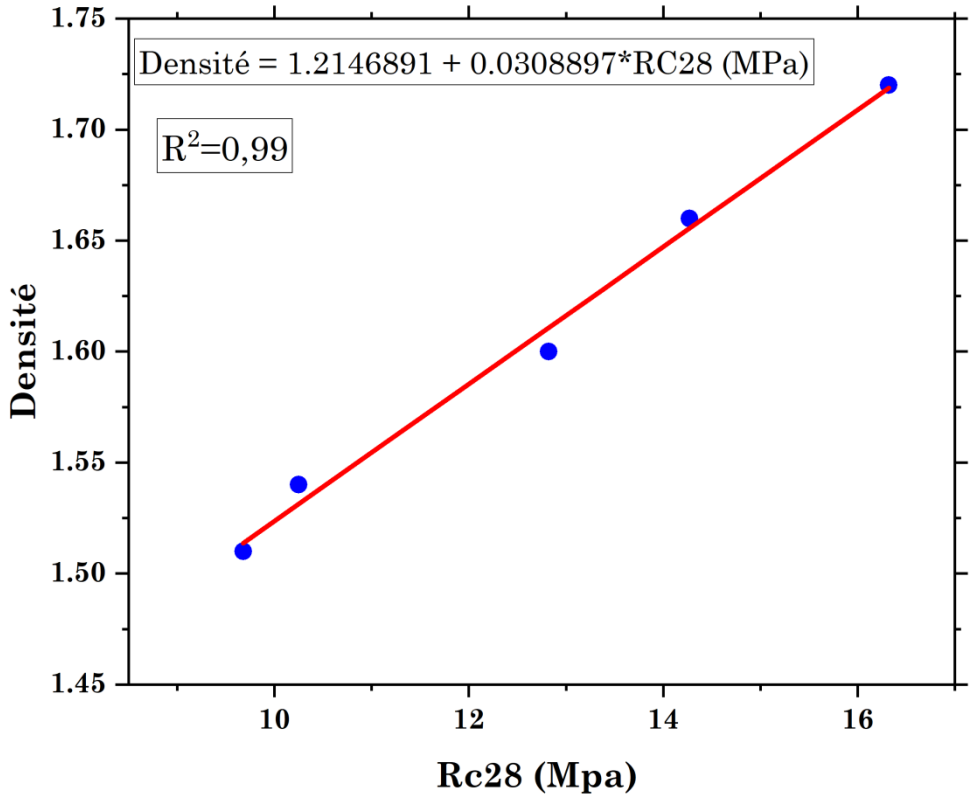


Figure 3.14 Corrélation entre la densité et la résistance à la compression

La figure 3.14 présente une corrélation linéaire très forte entre la densité et la résistance à la compression, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,99. Cette constatation peut s'expliquer par le fait que la résistance à la compression des granulats est généralement de 1,5 à 2 fois supérieure à celle du béton lui-même, tandis que la résistance des granulats légers est nettement inférieure à celle du béton.

Cette corrélation permet ainsi de prédire la résistance à la compression des bétons étudiés à partir de la densité à l'état durci. Ainsi, l'augmentation de la masse volumique diminue la porosité à l'intérieur du béton et donne une forte cohésion entre les granulats du béton, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la pression. Des recherches antérieures ont également démontré que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité des bétons [168, 169].

3.2.14 Relation entre la densité et la conductivité thermique

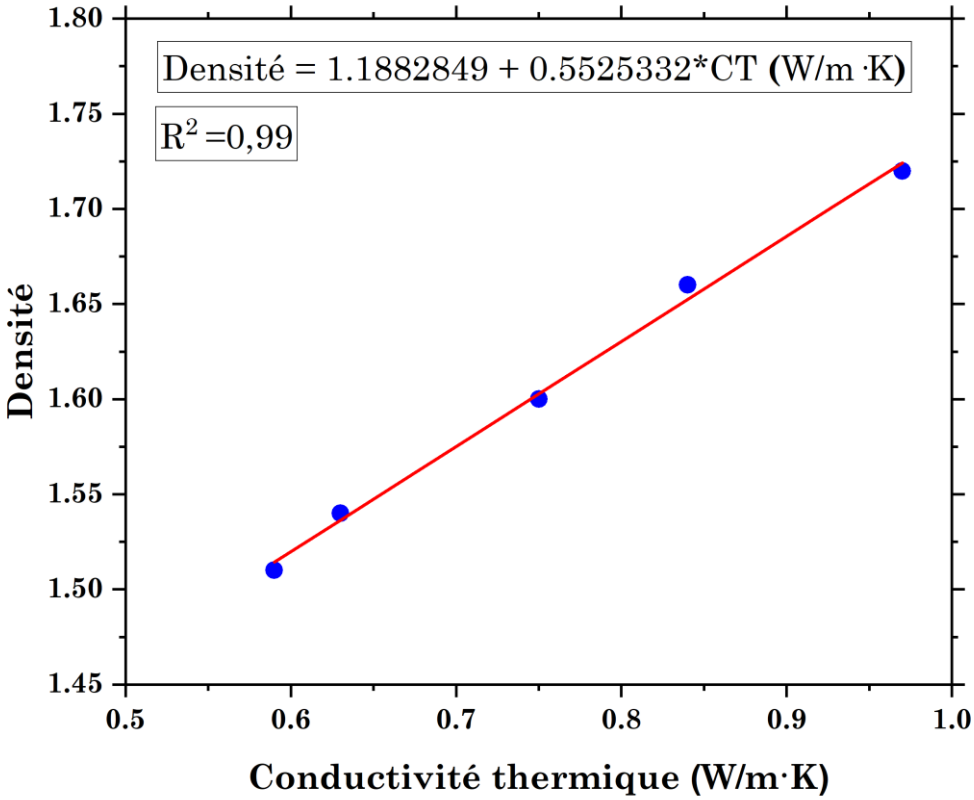


Figure 3.15 Relation entre la densité et la conductivité thermique

D'après la figure 3.15 on observe une très bonne corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la densité. Cela nous permet de prédire la densité du béton à partir de la mesure de la conductivité thermique. Généralement, les bétons légers ont une conductivité thermique située entre 0,4 et 1 W/m·K à l'état sec [165]. Les valeurs de conductivité thermique des bétons formulés se situent dans la plage de 0,59 à 0,84 W/m·K, ce qui témoigne d'une bonne performance en termes d'isolation thermique.

La faible conductivité thermique de l'air emprisonné dans la structure poreuse des granulats recyclés peut-être la raison de leur capacité d'isolation thermique plus élevée. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres études [166], [167].

3.2.15 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique

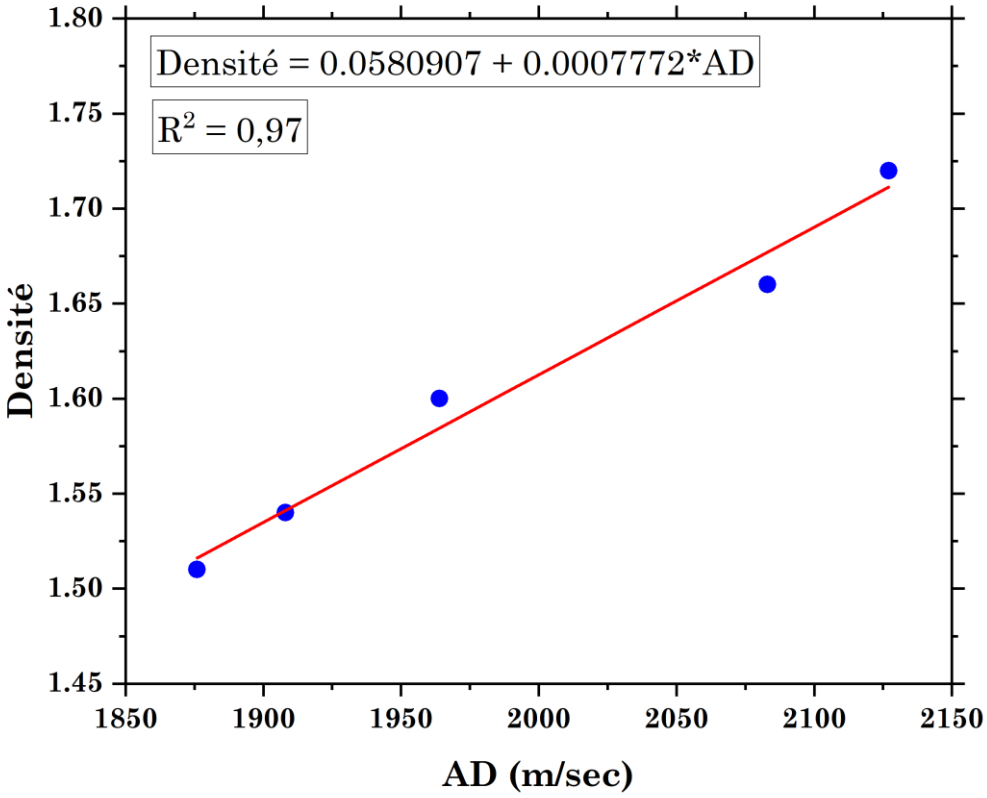


Figure 3.16 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique

La figure 3.16 révèle une corrélation très significative entre la densité et l'auscultation dynamique. Cette relation est similaire à celle observée entre la résistance à la compression et la densité. Cette relation permet donc de prédire la densité à partir de l'auscultation dynamique de manière fiable. Des résultats similaires ont été obtenus par [185] et [186].

Ces résultats confirment également que le volume des vides et la porosité jouent un rôle crucial dans la propagation des ondes ultrasoniques [187].

Conclusions générales et recommandations

Conclusions générales et recommandations

L'objectif de cette étude est de valoriser les granulats de béton recyclés dans la production de béton drainant, en utilisant des taux de substitution variant de 0 à 100% avec un pas de 25%

En se basant sur les résultats de cette étude, les conclusions suivantes peuvent être résumées :

- Une substitution complète des granulats naturels par les granulats de béton recyclés entraîne une diminution d'environ 14% de la densité du béton.
- Les mélanges avec des concentrations élevées de GBe présentent des niveaux de porosité supérieurs par rapport aux autres combinaisons.
- Une réduction de la maniabilité du béton est observée avec l'augmentation des GBe. Un dosage supplémentaire de superplastifiant est nécessaire pour obtenir une maniabilité adéquate.
- Une réduction d'environ 40% de la perméabilité hydraulique est observée lorsque les GN sont entièrement remplacés par GBe.
- La conductivité thermique est réduite d'environ deux fois lors d'un remplacement total des GN par GBe.
- Les mélanges avec des taux plus élevés GBe montrent une bonne résistance à l'abrasion.
- Une relation d'équilibre entre la porosité et la perméabilité hydraulique est observée lors d'une substitution de 50% des GN par GBe.
- Une substitution de 50% des GN par GBe offre un équilibre entre la porosité, la conductivité thermique et la résistance mécanique.
- Des corrélations significatives sont observées entre la perméabilité, la résistance à la compression et la porosité connectée des bétons étudiés.
- Une diminution d'environ 50% de la vitesse des ondes ultrasonores est observée lorsque les GN sont entièrement remplacés par GBe.
- Une augmentation du taux de substitution des GN par GBe entraîne une diminution significative des résistances mécaniques, à la fois en compression et en traction.
- Les résultats obtenus mettent en évidence de bonnes corrélations entre la résistance à la compression, la conductivité thermique, l'auscultation dynamique et la densité des bétons étudiés.

A la lumière des résultats obtenus, nous recommandant vivement la continuité des travaux de recherche et plus d'investigations dans ce domaine qui semble être promoteur pour le confort des usagers. Pour avoir plus de pouvoir absorbant du béton, il serait donc intéressant de travailler avec d'autres dechets et pourquoi pas d'utiliser une combinaison de déchets et voir le comportement du béton drainant. Utiliser des adjuvants de nouvelles générations et des ajouts ouvrira sans doute une autre portière pour booster les investigations pour ce type de béton.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] FISRWG. Stream Corridor Restoration: Principles, Process- es, and Practices. Federal Interagency Stream Res- toration Working Group (FISRWG), October 1998, ISBN-0-934213.

[2] The Pacific Southwest Concrete Alliance, 2009, Pervious concrete viewed 10 January 2009,

[3] 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.

[4] Le LERM, "Déchets de chantiers de bâtiment", enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME, (1999).

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

[6] N. BOURMATTE, "Granulats Recyclés de substitution pour Bétons Hydrauliques, Caractérisation, Performances, Durabilité", Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 159 p., (2005).

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

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

[9] 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.

[10] CHANVILLARD.G, 1999 : Connaissances générales sur le matériau béton, Ed. Aléas.

[11] Pacheco, L. (2017). Propiedades del concreto en estado fresco y endurecido (Tesis de Pregrado). Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua.

[12] NTP 334.001. (2001). Cementos. Definiciones y nomenclatura. 2da ed. Lima, 21 de marzo.

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

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

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

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

[17] 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.

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

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] ACI Commitee 211, 2002 Dixon, D. E., Prestrera, J. R., Burg, G. R., Chairman, S. A., Abdun-Nur, E. A., Barton, S. G., ... & Lee, S. H. (1991). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-91). Farmington Hills: ACI.

[25]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.

[26] 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.

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

[28] 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.

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

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

[31] 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.

[32]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.

[33] 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.

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

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

[36] "DIN EN 12697-17 - European Standards.".

[37] "Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l'entretien des chaussées | CRR.".

[38]. Ravindrarajah, R.S. Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method. NDT E Int. 1997, 4, 261.

[39] Nazarian, S.; Baker, M.; Crain, K. Assessing quality of concrete with wave propagation techniques. Mater. J. 1997, 94, 296–305.

[40]. Al-Nu'man, B.S.; Aziz, B.R.; Abdulla, S.A.; Khaleel, S.E. Compressive Strength Formula for Concrete using Ultrasonic Pulse Velocity. Int. J. Eng. Trends Technol. IJETT 2015, 26, 8–13.

[41] American Society for Testing and Materials. ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2009

[42] Al-Amawee, A.H.; Salman, M.M. The Ratio between Static and Dynamic Modulusof Elasticity in Normal and High. Strength Concrete. J. Eng. Sustain. Dev. 2006, 10, 163–174.

[43] I.E.A.E-T.C.S. No. 17. Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures; Int. Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2002.

[44] Jones, R.; F ˛ac ˛aoaru, I. Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. Matér. Constr. 1969, 2, 275–284. [CrossRef].

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

[46] Y. Zaetang, A. Wongsa, V. Sata, and P. Chindaprasirt, "Use of lightweight aggregates in pervious concrete," Constr. Build. Mater., vol. 48, pp. 585–591, 2013.

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

[48] Wong JM, Glasser FP, Imbabi MS. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction. Cem Concr Compos 2007;29(9):647–55.

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

[50] 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.

[51] 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.

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

[53] 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.

[54] 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

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

[56] 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.

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

[58] Fagerlund, G., Effect of Air Entraining and Other Admixtures on the SaltScaling Resistance of Concrete, Durability of Concrete, Aspects of Admixtures and Industrial By-products, Int. Seminar, Chalmers University of Technology, Göteborg, April 1986, Swedish Council for Building Research, Document D-1, pp. 223–266 (1988)

[59]tv_70085_einsatz_mineralischen_sekundaerbaustoffe_schutzbau_ar_immo_uns_060401_fr.pdf

[60] G. DREUX& J. FESTA, " Nouveau guide du bétonet ses constituants",Edition Eyrolles,8 eme édition, 409 p., (1998).

[61] S. HACHAICHI, "Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton",Thèse de Magister , 92 p., (2008).

[62] CHANDRA & L. BERNTSSON, " Lightweight Aggregate concrete", NoyesPublications, 406 p., (2002).

[63] K ATZ, " Propriétés du béton fabriqué avec des granulats recyclés à partir de béton ancien partiellement hydraté", Cement & Concrete Research, 33(5), pp:703 Ŕ 11,(2003).

[64] 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.

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

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

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

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

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

[70] 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.

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

[72] 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.

[73] 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

[74] 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

[75] 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

[76] 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.

[77] 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

[78] 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

[79] 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

[80] 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.

[81] 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.

[82] 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.

[83] 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.

[84] 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.

[85] Este método de ensayo permite conocer el parámetro característico del concreto permeable, que es el coeficiente de permeabilidad, se utiliza un permeámetro de carga variable recomendado por la ACI 522R (2010) para los ensayos.

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

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

[88] Matsuo, Y., K. Morino, and E. Iwatsuki, A study of porous concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregate, in Research report of Aichi Institute of Technology, 2005: p. 8.

[89] JCI, A collection of standards of JCI, 2004: 575-588.

[90] 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.

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

[92] 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.

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

[94] “Standard NF EN 197-1. De normalisation, C. E. Ciment Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. CEN, NF EN 197-1, Février 2001 pp. P 15-101-1.” .

[95] EN 12620, la norme a pour objet de définir analyse granulométrique

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

[97] 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.

[98] 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.

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

[100] "Standard NF EN 1097-2. EN, C. (2010). 1097-2 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation. CEN: Belgium, Brussels." .

[101] NORMES AFNOR. (1981), " Bétons – Essai d'affaissement "

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

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

[104] NORMES AFNOR. (1981), P18-406 " Bétons – Essai de compression".

[105] NORMES AFNOR. (1981) P18-408 " Bétons – Essai de fendage".

[106] NORMES AFNOR. (1989), P18-418 " Bétons – Auscultation sonique – Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton".

[107] Dr.Ir. Boeraeve : « Cours de béton armé », 17/10/2010

[108] 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.

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

[110] L. MIREN ETXEBERRIA, "Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete", Thèse de doctorat, Université polytechnique de Catalogne - Espagne, 242 p., (2004).

[111] 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.

[112] COQUILLAT. G. (1984) " Recyclage des matériaux des démolition dans la confection des bétons", Annales de L'ITBTP, n°428, France, pp.63-71.

[113] NEWMAN. A. J. (1995) "The utilisation of brick rubble from demolished shelters as aggregate for concrete", Department of scientifique and Industrial research, UK.

[114] HANSEN, T. C. (1986) " Recycling aggregates and recycling aggregate concrete ", second state-of- the –art report developments 1945-1985. Materials and structures, vol19, n° 111, pp. 201-246.

[115] 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

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

[117] 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.

[118] Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S., «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete», Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 829-836,2009

[119] 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.

[120] CSTC. (1981) "Recyclage du béton", CSTC, Rapport final de la banal, BRUXELLES. [25] De Juan M.S. and Gutiérrez P.A. «Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate» 2009,Construction and Building Materials, 23 (2), pp. 872-877. USA. ResourConseryRecycl 2004; 42(3):275-94

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

[122] DESSY. P, NIRONI. L, " The mechanical and physical performance of building componments made with recycled aggregates " Congress Proceding R,99 , Vol 3, Geneva Switzerland , pp.209-213.

[123] TAVAKOLI. M, SOROUSHIAN. P. (1996) "Strengths of recycled aggregate concrete made using fielct-demolished concrete as aggregate", ACI materials journal, March-April, pp. 182-193.

[124] 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.

[125] COQUILLAT. G. (1984) “ Recyclage des matériaux des démolition dans la confection des bétons”, Annales de L’ITBTP, n°428, France, pp.63-71.

[126] Ferreira, L., Barra, M. ET de Brito, J. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. Magazine of Concrete Research, volume 63.

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

[128]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

[129] Déchets-de-chantier-non-triés.htm.

[130] Gsm-granulats.fr/fr/de-vous-a-nous/actualites/recyclage-beton-cercles-vertueux-pour-le-secteur-de-la-construction

[131] Action-des-superplastifiants-Defloculation-des-grains-de-ciment-18_fig3_41009577.

[132] VERS UNE COMPOSITION OPTIMALE DES BÉTONS ROUTIERS.

[133] Ghafoori & Dutta, 1995.

[134] rabenandrasanaNorokantoM_ESPA_MAST_18.pdf.

[135] 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.

[136] 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.

[137] A. KATZ, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", Cement & Concrete Research, 33(5), pp:703Ŕ11, (2003).

[138] M. SANCHEZ de JUAN & P. A. GUTIERREZ, "Influence of recycled aggregate quality on concrete properties", laboratoire Central des Matériaux et Structures, Espagne.

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

[140] Applications+du+béton+drainant&rlz=1C1YTUH_frDZ1058DZ1058&source

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

[142] pose.com/beton-drainant/

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

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

[145]“Standard NF EN 993-15.” .

[146] “Norme NF P18-427.”.

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

[148] 168541177046835/photos/a.168558400378446/704761013424846/?type=3

[149] “Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 | Superplastifiants.”.

[150] ACI Commitee 211 (2002). Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrète. American Concrète Institute, Farminton Hills, MI, 1-26 p.

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

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

[153] 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.

[154] Zhu, X., Chen, X., Shen, N., Tian, H., Fan, X., & Lu, J. (2018). Mechanical properties of pervious concrete with recycled aggregate. Computers and Concrete, 21(6), 623-635.

[155] “Standard NF EN 206/CN.”.

[156] 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.

[157] Omar Kouider Djelloul PERFORMANCE STRUCTURALE D’UN BÉTON AUTOPLAÇANT A BASE DE GRANULATS RECYCLÉS ET LAITIER , 2018

[158] 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.

[159] 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.

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

[161] Kaplan, G., Gulcan, A., Cagdas, B., & Bayraktar, O. Y. (2021). The impact of recycled coarse aggregates obtained from waste concretes on lightweight pervious concrete properties. Environmental Science and Pollution Research, 28, 17369-17394.

[162] 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.

[163] Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of cleaner production*, *99*, 59-74.

[164] De Brito, J., Robles, R., 2010. Recycled aggregate concrete e methodology for estimating its long-term properties. Indian J. Eng. Mater. Sci. 17 (6), 449e462

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

[166] 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.

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

[168] 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.

[169] 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.

[170] Hasaba, S., Kawamura, M., Toriik, K., & Takemoto, K. (1981). Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate. Transactions of the Japan Concrete Institute, 3, 55-60.

[171] K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Research 31 (2001) 707–712.

[172] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, E. Wirquin, Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Composite 25 (2003) 223–232.

[173] N. Jin, “Fly ash applicability in pervious concrete.” The Ohio State University, 2010.

[174] 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.

[175] KOUIDER DJELLOUL, O. Performance structurale d’un BAP à base de granulats recyclés et laitier (Doctoral dissertation, Université Blida1-Saad Dahlab).

[176] Zhu, L., Dai, J., Bai, G., & Zhang, F. (2015). Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks. Construction and Building Materials, 94, 620-628.

[177] A. A. Aliabdo, A.-E. M. Abd-Elmoaty, and H. H. Hassan, “Utilization of crushed clay brick in concrete industry,” Alexandria Eng. J., vol. 53, no. 1, pp. 151–168, 2014.

[178] B. Rath, “Effect of natural rubber latex on the shrinkage behavior and porosity of geopolymer concrete,” Struct. Concr., 2021.

[179] Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. Cement and concrete research, 41(10), 1037-1049.

[180] Smith, J. T. (2010). Recycled concrete aggregate–a viable aggregate source for concrete pavements.

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

[182] D. Tavakoli, R. S. Dehkordi, H. Divandari, and J. de Brito, “Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO2,” Constr. Build. Mater., vol. 249, p. 118747, 2020.

[183] KOUIDER DJELLOUL, O. Performance structurale d’un BAP à base de granulats recyclés et laitier (Doctoral dissertation, Université Blida1-Saad Dahlab).

[184] 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.

[185] 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.

[186] 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.

[187] 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.

[188] Bentegri, I., & Kadri, E. H. (2021). L’effet des fibres organiques sur un béton fluide à base de granulats recyclés (Doctoral dissertation).

[189] J. M. V. Gómez-Soberón, « Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study », Cement and Concrete Research, vol. 32, no 8, p. 1301-1311, août 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00795-0.

[190] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, et M. Barra, « Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete », Cement and Concrete Research, vol. 37, no 5, p. 735-742, mai 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.

[191] 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.

[192] Vieira, G. L., Schiavon, J. Z., Borges, P. M., da Silva, S. R., & de Oliveira Andrade, J. J. (2020). Influence of recycled aggregate replacement and fly ash content in performance of pervious concrete mixtures. Journal of Cleaner Production, 271, 122665.

[193] Sandoval, G. F., Galobardes, I., De Moura, A. C., & Toralles, B. M. (2020). Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. Case Studies in Construction Materials, 13, e00354.

[194] Yavuz, D., Yazıcı, Ş., Avcı, M. S., & Özmen, D. (2023). A novel approach to estimate the tortuosity of pervious concretes using computed tomography. Materials and Structures, 56(4), 74.

Annexe

Annexe A : fichés technique de martiaux utilisé

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



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)

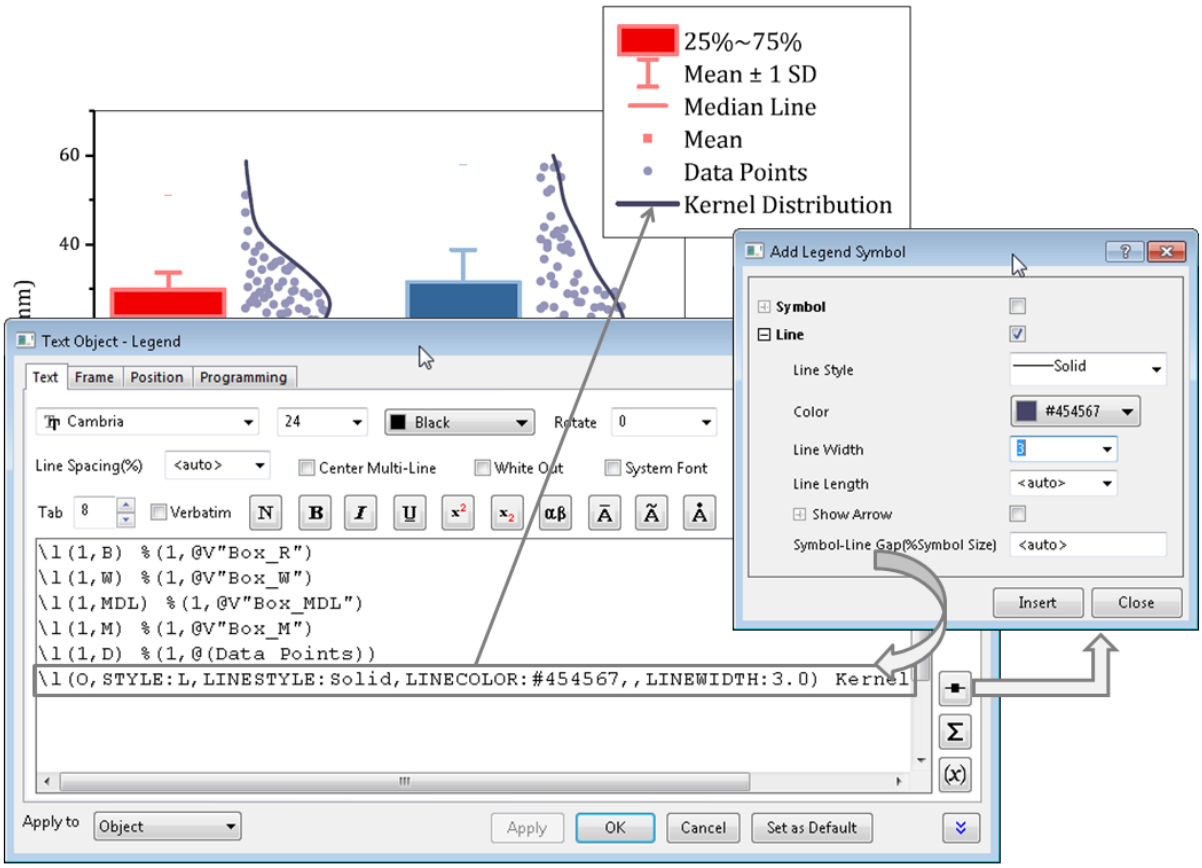
AVANTAGES PRODUIT

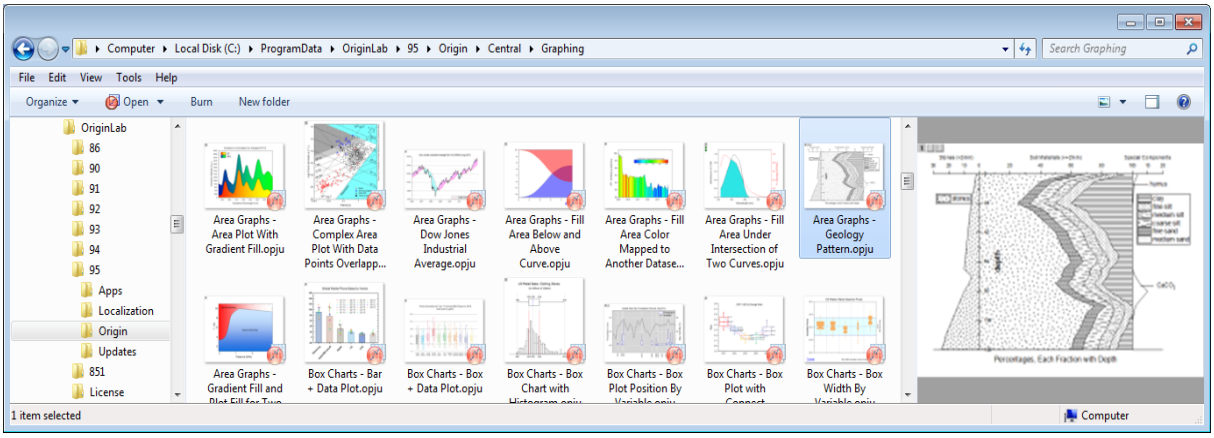
- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitants un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

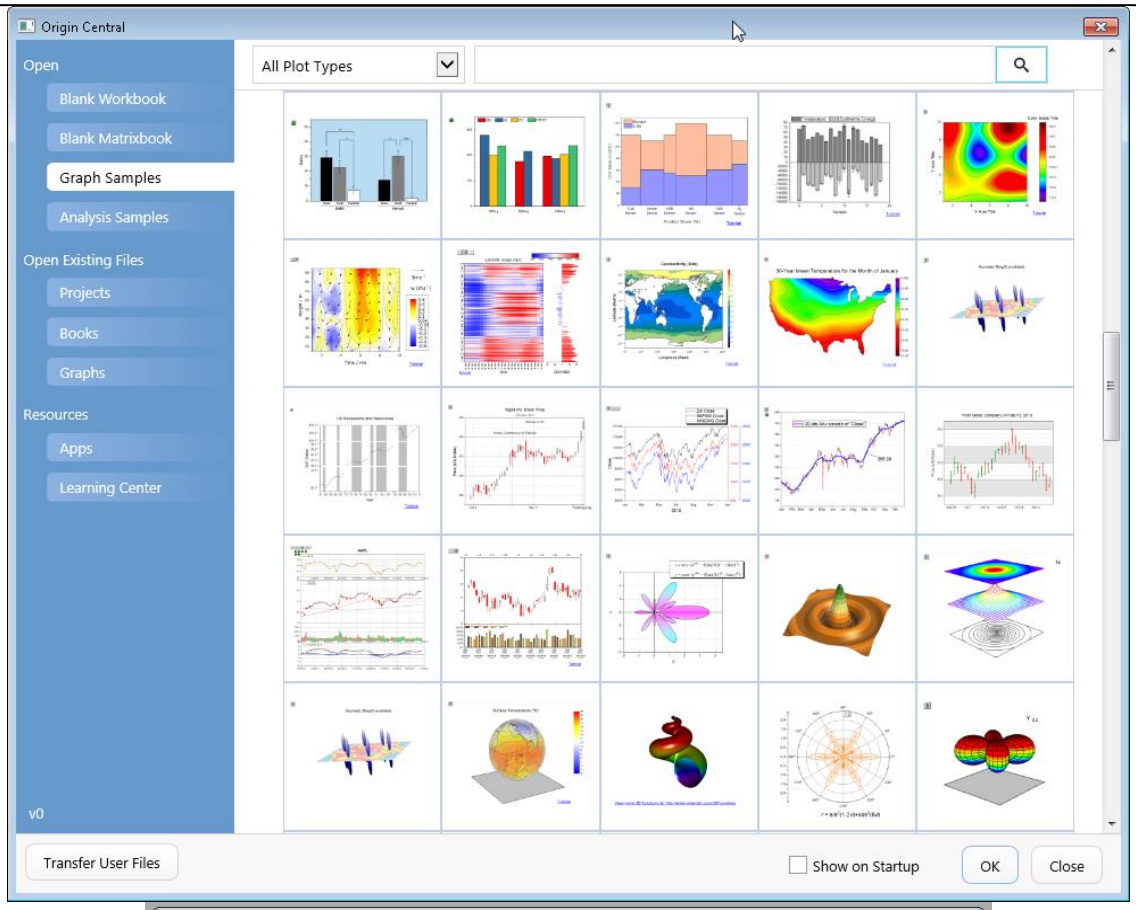
A member of LafargeHolcim

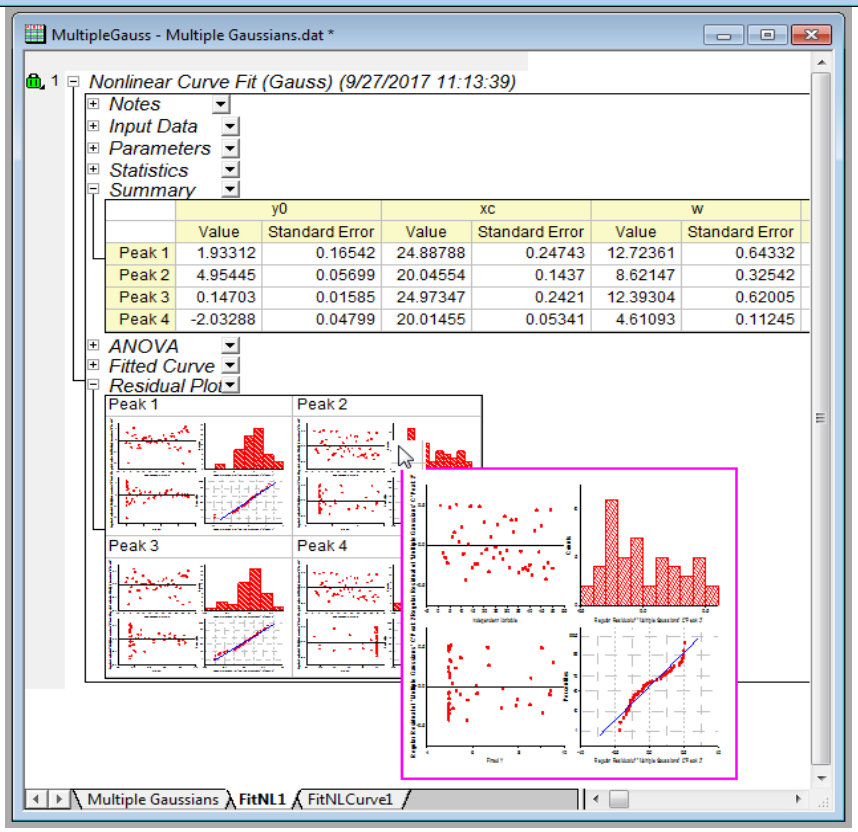
Annexe B : Logiciel Origin 2018

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 ci-dessus représentent 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)

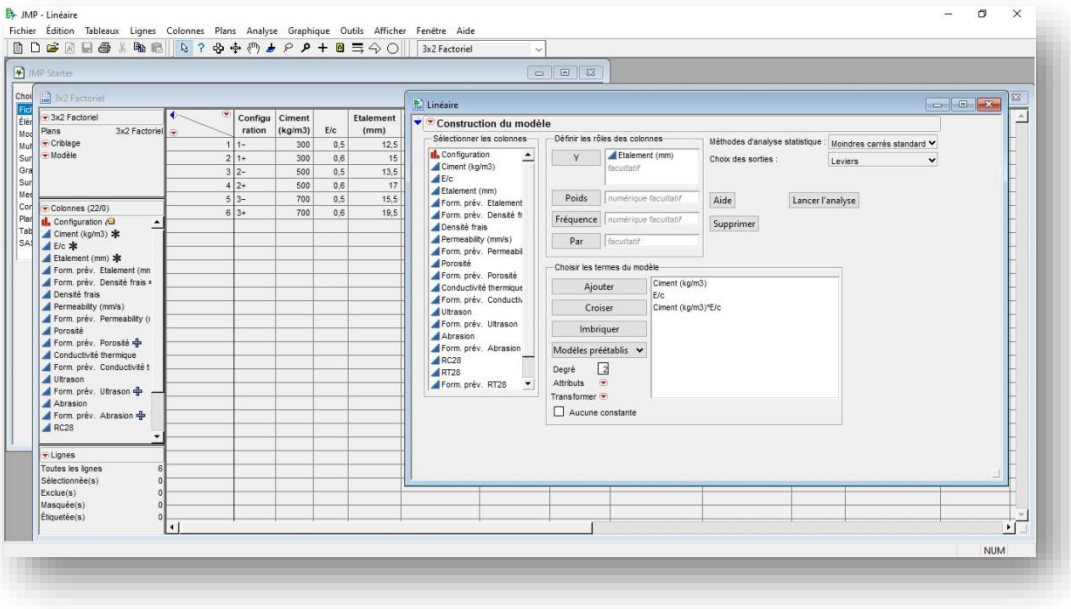


Figure B. 2 La régression par la méthode des moindres carrés standards

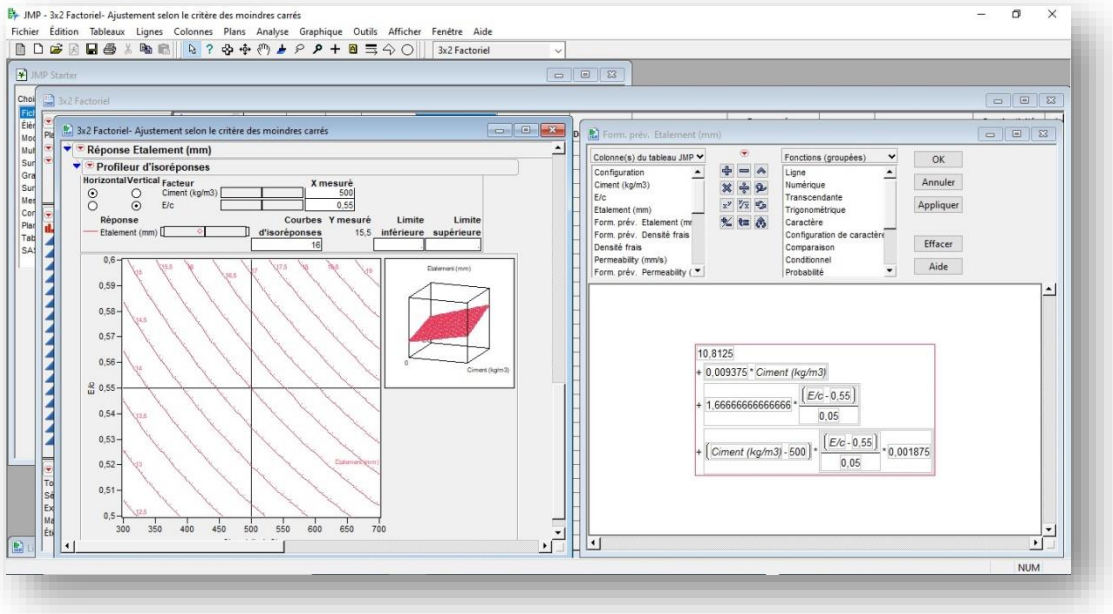


Figure B. 3 La génération des modèles postulés et le traçage des courbes isoréponses






Préparation de déchets d’ancien béton



Analyse granulométrique par tamisage



Echantillons de béton drainant confectionnés