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
Contribution à l'élaboration d'un béton léger drainant

Présenté par

BENALIA Abderrahim Adel

BOUKRIA Abderrahim

Proposé et Dirigé par

Encadreur : Pr DEBIEB Farid

Co-Encadreur : Dr SAHRAOUI Mohamed

Promotion Juin 2022

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 **Pr DEBIEB F.** 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.

A notre co-encadreur **Dr SAHRAOUI M.** d'avoir accepté de diriger ce travail de thèse. Merci pour votre disponibilité, votre patience et vos encouragements, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer. Trouve dans ce travail l'expression de notre respect et de notre gratitude. Vous nous faites l'honneur de juger ce travail

Nous tiendrons à remercier chaleureusement les Membres du jury qui nous a fait l'honneur de présider ce jury.

Nos appréciations et gratitudes particulières à **Mr MERZOUK Abdelkader** et la société **AMENHYD** pour leur contribution directe à la réalisation de ce projet.

Et enfin, nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

A mes très ***CHERS PARENTS***, Aucune phrase, aucun mot ne saurait exprimer à sa juste valeur le respect et l'amour que je vous porte.
Vous m'avez entouré d'une grande affection, et vous 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.

A mon adorable sœur **AMINA** et mes chers frères **YOUNES** et **ABDERAHMENE** pour leur appui et leur encouragement.

A mes chères tantes **FADHILA**, **NANA** et **RABEA**, merci pour être là pour moi.

A mon cousin **MOHAMED BETIL**, Merci pour ta présence et ton aide au quotidien. Tu es vraiment mon grand frère.

A mon cousin **ABDELKADER MERZOUK**, ce travail n'aurait pas été possible sans toi. Merci pour ton support et tes efforts.

A mon cher cousin **FOUAD** et amis **KAMEL**, **ZINOU**, **AYMEN**, **ADEL**, **SOFIANE**, **FODHIL**, **SADDEK**, **RIDHA** et **SIDALI**.

A mes chères collègues **MARIEM**, **OUMAIMA** et **YASMINE**.

A toute la famille **MERZOUK** et **BENALIA**.

Abderrahim Adel

Dédicaces

A mes très ***CHERS PARENTS***, Aucune phrase, aucun mot ne saurait exprimer à sa juste valeur le respect et l'amour que je vous porte.
Vous m'avez entouré d'une grande affection, et vous 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.

A mes chers frères **MOH** et **NASRO** pour leur appui et leur encouragement.

A mes sœurs

A mes chères collègues **KARIM**, **MESSAUD**, **MARWAN**, **NASRO**, **MOHAMMED**, **SAMIR**, **SOUFIANE, CHERIF , AMRO**.

A ma grande famille.

Abderrahim

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل يتمثل في محاولة تطوير خرسانة صرف خفيفة الوزن. لهذا الغرض نرتكز حول محورين رئيسيين. يتمثل المحور الأول في دراسة تأثير استعمال حصى مخلفات الآجر على سلوك خرسانة الصرف في الحالة السائلة والصلبة. المحور الثاني يتمثل في محاول تطوير خرسانة صرف رغوية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن استخدام حصى مخلفات الآجر يؤدي إلى انخفاض في قابلية الجريان، الكثافة، النفاذية الهيدروليكية والقوة الميكانيكية. من ناحية أخرى، تم تسجيل تحسن في الموصلية الحرارية والتسمع الديناميكي ومقاومة التآكل.

كما أظهرت نتائج الاختبارات المتعلقة بخرسانة الصرف الرغوية التي تم تطويرها أن زيادة جرعة الإسمنت و نسبة الماء إلى الإسمنت (E/C) يؤدي إلى تحسين قابلية الجريان والمقاومة الميكانيكية ومقاومة التآكل ، في حين أن زيادة حجم الرغوة له تأثير مفيد على النفاذية الهيدروليكية و الموصلية الحرارية والتسمع الديناميكي.

كلمات مفتاحية: خرسانة الصرف، مخلفات الآجر، خرسانة رغوية، جرعة الإسمنت، نسبة الماء إلى الإسمنت.

Résumé

L'objectif principale de ce travail consiste a élaboré un béton léger drainant. Pour ce faire on s'articule autour de deux axes principaux. Le premier axe consiste à étudier l'influence de l'incorporation des granulats de déchets de brique cuite (GBr) sur le comportement du BD à l'état frais et durci. Le deuxième axe consiste à élaborer un béton de mousse drainant (BMD).

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation des GBr dans le béton drainant conduit à une diminution de son ouvrabilité, sa densité, sa perméabilité hydraulique et sa résistance mécanique. En revanche, une amélioration de la conductivité thermique, de l'auscultation dynamique et de la résistance à l'abrasion de ce type de béton a été enregistrée.

Les résultats d'essais concernant les BMDs développés montrent que l'augmentation de dosage en ciment et du rapport E/C entraîne une amélioration de l'ouvrabilité, la résistance mécanique et à l'abrasion de ce type de béton. L'augmentation du volume de mousse apporte un effet bénéfique sur la perméabilité hydraulique, la conductivité thermique et l'auscultation dynamique du BMD.

Mots clés : béton drainant, déchets de brique, béton de mousse, béton de mousse drainant, durabilité, conductivité thermique.

Abstract

The main objective of this work is to elaborate a lightweight pervious concrete. To do this we articulate around two main axes. The first axis consists in studying the influence of the incorporation of brick waste aggregates on the behavior of pervious concrete in the fresh and hardened state. The second axis consists in the elaboration of a pervious foam concrete.

The results obtained show that the use of waste brick aggregates leads to a decrease in workability, density, hydraulic permeability and mechanical strength. On the other hand, an improvement in thermal conductivity, dynamic auscultation and abrasion resistance was recorded.

The test results for the developed foam concretes show that increasing the cement dosage and W/C ratio leads to an improvement in workability, mechanical and abrasion resistance, while increasing the foam volume brings a beneficial effect on hydraulic permeability, thermal conductivity and dynamic auscultation.

Key words: pervious concrete, brick waste, foam concrete, cement dosage, W/C

Table des matières

Remerciement ……..…I

Dédicaces ……II

Résume ……..……IV

Table des matières……..…….VII

Liste des tableaux ……..……XII

Liste des figures ……XIII

Liste des symboles ……..…..XVI

Introduction générale……..…1

Chapitre 1. Recherche bibliographique

1.BETON DRAINANT ……..……..2

1.1 Introduction ……...……..2

1.2 Les composition du BD……..……..2

1.2.1 ciment ……3

1.2.2 Eau de gâchage ……..6

1.2.3 Granulats ……...….6

1.2.4 Adjuvants ……..……12

1.3 Propriétés du béton drainant …….....12

1.3.1 Propriétés à l'état frais ……..13

1.3.2 Propriétés à l'état durci ……15

1.3.2.1 Densité ……...15

1.3.2.2 Porosité et perméabilité ……..…16

1.3.2.3 Résistances à la compression …….....18

1.3.2.4 Résistance à la traction par fendage ……..19

1.3.2.5 Résistance à l'abrasion ……..20

1.3.2.6 Auscultation dynamique ……....21

1.3.2.7 Conductivité thermique ……22

1.3.2.8 Retraits et gonflements ……23

1.4 Facteurs influençant les bétons drainants ……25

1.4.1 Influence du rapport E/C ……..26

1.4.2 Influence de la porosité ……27

1.4.3 Influence des ajouts ……..….28

1.4.4 Influence des granulats ……..…..29
1.4.4.1 Effet des diamètres des granulats ……....29
1.4.4.2 Effet des granulats roulés et concassés ……29
1.5 Avantages et les inconvénients ……30
1.5.1 Avantages ……30
1.5.2 Inconvénients …….....31
1.6 Domaine d'application …….....31
1.7 Mise en place ……32
2. BETON MOUSSE ……..34
2.1 Définition ……34
2.2 Constituent ……..35
2.2.1 Liants ……..35
2.2.2 Granulats ……35
2.2.3 Eau ……36
2.2.4 Agents moussants ……..36
2.2.4.1 Agents moussants protéique ……..37
2.2.4.2 Agents moussants synthétique ……...37
2.3 Techniques de fabrication ……..38
2.3.1 Moussage mécanique ……38
2.3.2 Moussage chimique ……...39
2.4 Propriétés de béton mousse ……..40
2.4.1 La densité à l'état frais ……...40
2.4.2 Porosité ……...40
2.4.3 Auscultation dynamique ……41
2.4.4 Propriétés mécanique ……42
2.4.5 Propriétés thermiques ……44
2.5 Avantages …….....45
2.6 Inconvenants ……45
2.7 Domaines d'application ……46
3. **MODELISATION PAR PLAN D'EXPERIENCES** ……..46
3.1 Méthodologie des plans ……..46
3.2 Modélisation de la réponse ……47
4. **CONCLUSION** ……..47

Chapitre 2 : Matériaux, méthodes et formulation

1. INTRODUCTION ……..49

2. MATERIAUX UTILISES ……49

2.1 Ciment …….....49

2.2 Granulats ……...50

2.2.1 Gravier ……...50

2.2.2 Sable ……..51

2.3 Superplastifiants ……...53

2.4 Agent moussant ……....53

3. ESSAIS ……54

3.1 Essai de caractérisation des matériaux ……..54

3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage ……54

3.1.2 Masse volumique pilonnés …...……54

3.1.3 Masse volumique apparente ……..55

3.1.4 Masse volumique absolue ……55

3.1.5 Coefficients de Los Angeles ……56

3.1.6 Essai d'équivalents de sable …….....56

3.2 Essais à l'état frais ……57

3.2.1 Essai au cône d'Abrams ……..57

3.2.2 Essai d'étalement au mini cône …….. 57

3.2.3 Densité à l'état frais ……58

3.3 Essai sure le béton à l'état durci …….....59

3.3.1 Densité à l'état durci ……...59

3.3.2 Résistance à la compression ……59

3.3.3 Résistance à la traction ……60

3.3.4 Auscultation dynamique ……60

3.3.5 Essai de perméabilité ……..61

3.3.6 Essai de la conductivité thermique ……62

3.3.7 Essai d'abrasion ……..63

3.3.8 Mesure de retrais et gonflements ……63

4. **METHODES DE FORMULATION** ……..65

4.1 Formulation de béton drainant à base de déchets de brique ……65

4.2 Formulation de béton de mousse ……67

5. **PROCEDURE DE MALAXAGE** ……..69

6. **CONCLUSION** ……...70

Chapitre 3 : Résultats et interprétation

1. **INTRODUCTION** ……72

2. **BETON DRAINANT A BASE DE DECHETS DE BRIQUE** ……72

2.1 Affaissements au cône d'Abrams ……..74

2.2 Densité a l'état frais et durci ……....75

2.3 Résistance à la compression et à la traction ……..76

2.4 Porosité connectée ……..78

2.5 Conductivité hydraulique ……..79

2.6 Conductivité thermiques ……80

2.7 Auscultation dynamique ……81

2.8 Retrais et gonflements ……....82

2.9 Résistance à l'abrasion ……...84

2.10 Relation entre la porosité connectée et la résistance ……85

2.11 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique ……86

2.12 Relation entre la densité et la résistance ……...87

2.13 Relation entre la densité et la conductivité thermique ……..88

2.14 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique ……..89

3. **BETON DE MOUSSE DRAINANT** ……..90

3.1 Essai au mini cône ……...94

3.2 Densité ……95

3.3 Résistances à la compression et la traction ……96

3.4 Essai de la porosité ouvert ……...97

3.5 Conductivité hydraulique ……98

3.6 Conductivité thermiques ……..99

3.7 Auscultation dynamique ……100

3.8 Résistance à l'abrasion ……..101

3.9 Corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique ……102

3.10 Relation entre la résistance et la porosité connectée ……...103

3.11 Corrélation entre la densité et la résistance ……104

3.12 Relation entre la conductivité thermique et la densité ……105

3.13 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique ……106

Conclusion générale ……...107

Références bibliographiques

Annexe

Liste des tableaux

Tableau1. 1 Désignation des différents types de ciment selon la norme NF EN 197-1.....5
Tableau1. 2 Énergie emmagasinée dans un système mixte[81] 23

Tableau 2. 1 Caractéristiques du ciment 50
Tableau 2. 2 Caractéristiques des sables utilisés.....52
Tableau 2. 3 Caractéristiques du TEMPO-10 53
Tableau 2. 4 Caractéristiques du FOAMTEK.....54
Tableau 2. 5 Classes d'affaissement selon la norme NF EN 206-1 [174].....57
Tableau 2. 6 Composition des différents BDs étudiés dans un 1 m^3.....66
Tableau 2. 7 Facteurs choisis et les niveaux correspondants 67
Tableau 2. 8 Compositions du plan d'expérience choisi.....68

Liste des figures

Figure 1. 1 Béton drainant [2] 2
Figure 1. 2 Schémas de fabrication du ciment [9]....4
Figure 1. 3 Échantillons de béton perméable avec différentes teneurs en eau : (a) trop peu d'eau, (b) quantité d'eau appropriée (c) trop d'eau [11]....6
Figure 1. 4 Tableau des familles de roches [15]....7
Figure 1. 5 Laitier cristallisé [23]....8
Figure 1. 6 Granulats issus du recyclage [25] 9
Figure 1. 7 Les différentes catégories de déchets de chantiers [28]**.** 10
Figure 1. 8 Schéma d'installation de production de granulats recyclés.[24] 11
Figure 1. 9 Le mode d'action de superplastifiant [35] 12
Figure 1. 10 L'essai d'affaissement au cône d'Abrams [38]....13
Figure 1. 11,Évolution de l'affaissement (mm) en fonction du taux de GBrs [44]....14
Figure 1. 12 Évolution de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés [51] .15
Figure 1. 13 Variation de la densité en fonction du taux de substitution en GBr concassée [56] 16
Figure 1. 14 Point d'équilibre de la variation de la résistance à la compression et de la perméabilité avec la porosité effective du BD [58]....16
Figure 1. 15 Perméamètre à charge variable [60]....17
Figure 1. 16 Relation entre la porosité et la perméabilité [63] 17
Figure 1. 17 Relation entre la perméabilité et le volume de vides [64]....18
Figure 1. 18 Relation entre la résistance à la compression, la perméabilité et la porosité [65]....19
Figure 1.19 Essai par fendage sur une éprouvette de béton [69]....19
Figure 1. 20 L'essai Cantabro : (a) le tambour Los Angeles ; (b) illustration de l'essai 20
Figure 1. 21 Mesure de la vitesse de propagation d'ondes [77] 22
Figure 1. 22 Relation entre la conductivité thermique et la densité [80]....23
Figure 1. 23 Évolution du retrait de séchage en fonction du temps [4]....25
Figure 1. 24 Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours [90]....26
Figure 1. 25 Relation entre le rapport E/C et la porosité effective [92] 27
Figure 1. 26 Représentation schématique de la micro structure du béton [95] 28
Figure 1. 27 Images de la surface du béton : (a) granulats naturels et briques, (b) granulats naturels et (c) granulats de briques [98]....30
Figure 1. 28 Rouleau à joint, communément appelé « coupe-pizza » [101] 33
Figure 1. 29 Béton de mousse [106]....34
Figure 1. 30 Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport Sable/Ciment avec différents types de ciment [120]....36
Figure 1. 31 L'adsorption des agents moussants synthétiques aux interfaces liquide/air. 38
Figure 1. 32 Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité à 7,14 et 28 jours [143] 42
Figure 1. 33 Relation entre résistance mécanique et masse volumique des bétons légers. Légende : Granulats légers = GL ; Moussage chimique = MC ; Malaxage rapide = MR ; Mousse préformée = MP [121] 42
Figure 1. 34 Évolution de la conductivité thermique en fonction du rapport E/L pour différentes dosages en agent moussant [157] 45
Figure 1. 35 Disposition des points expérimentaux dans un plan de....47

Figure 2. 1 Le ciment utilisé [166] 49
Figure 2. 2Graviers utilisés : (a) gravier naturel (b) déchet de brique 51
Figure 2. 3 Analyse granulométrique par tamisage des graviers utilisés 51
Figure 2. 4 Le sable utilisé 52
Figure 2. 5 Analyse granulométrique du sable utilisé .... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 2. 6 superplastifiant Sika TEMPO-10 [167] 53
Figure 2. 7 L'agent moussant utilisé 54
Figure 2. 8 Appareillage utilisé pour déterminer la masse volumique pilonnée 55
Figure 2. 9 L'essai de cône d'Abrams 57
Figure 2. 10 Essai de Mini cône 58
Figure 2. 11 La densité a l'état frais 58
Figure 2. 12 Densité à l'état durci 59
Figure 2. 13 Essais de résistance à la compression 59
Figure 2. 14 Résistance à la traction par fendage 60
Figure 2. 15 Essai d'auscultation dynamique. 61
Figure 2. 16 L'essai de perméabilité à charge variable 62
Figure 2. 17 Essai de conductivité thermique 62
Figure 2. 18 Mesure de la résistance à l'abrasion 63
Figure 2. 19 Mesure du retrait et gonflement. 64
Figure 2. 20 Relation entre le volume de pâte et le volume de vide 65
Figure 2. 21 Logiciel de modélisation statistique JMP [184] 68
Figure 2. 22 Malaxeur à axe vertical 69
Figure 2. 23 Procédure de malaxage du béton de mousse 70
Figure 2. 24 Affaissement en fonction de la teneur en GBr 74

Figure 3. 1 Affaissement en fonction de la teneur en GBr 74
Figure 3. 2 Évolutions de la densité en fonction de la teneur en GBr 75
Figure 3. 3 Évolutions de la résistance à la compression en fonction de la teneur en GBr 76
Figure 3. 4 Évolutions de la résistance à la traction en fonction de la teneur en GBr 77
Figure 3. 5 Évolutions de la porosité connectée et Rc 28j en fonction de la teneur en GBr 78
Figure 3. 6 La perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de la teneur en GBr 79
Figure 3. 7 Evolution de la conductivité thermique et la porosité en fonction de la teneur en GBr 80
Figure 3. 8 Auscultation dynamique et Rc28j en fonction de la teneur en GBr 81
Figure 3. 9 Évolutions du retrait en fonction de la teneur en GBr 82
Figure 3. 10 Évolutions du gonflement en fonction de la teneur en GBr 83
Figure 3. 11 la résistance à l'abrasion en fonction de la teneur en GBr 84
Figure 3. 12 Corrélations entre la porosité connectée et Rc28 85
Figure 3. 13 Corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique 86
Figure 3. 14 Corrélation entre la densité et la résistance à la compression 87
Figure 3. 15 Relation entre la densité et la conductivité thermique 88
Figure 3. 16 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique 89
Figure 3. 17. Béton de mousse avec S/C=0.5 90
Figure 3. 18 La compatibilité entre le SP et l'agent moussant utilisé 91
Figure 3. 19 Courbes isoréponses de l'étalement (cm) en fonction de dosage en ciment et du rapport E/C 94
Figure 3. 20 l'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur 95
Figure 3. 21 L'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur 96
Figure 3. 22 L'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur 96
Figure 3. 23 Courbes isoréponses de la porosité connectée (%) en fonction de 97

Figure 3. 24 Courbes isoréponses de la perméabilité hydraulique (mm/sec).....98
Figure 3. 25 Courbes isoréponses de la conductivité thermique (W/m·K) 99
Figure 3. 26 l'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur l'auscultation dynamique (m/sec) en courbes isoréponses.....100
Figure 3. 27 Courbes isoréponses de l'essai Cantabro en fonction.....101
Figure 3. 28 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique.....102
Figure 3. 29 Corrélation entre la résistance à 28j et la porosité connectée 103
Figure 3. 30 Relation entre la résistance à la compression et la densité.....104
Figure 3. 31 Corrélation entre la densité et la conductivité thermique.....105
Figure 3. 32 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique.....106

Liste des symboles

ACI : American Concrète Institute
AD : Auscultation dynamique
ASTM: American Society of Testing Materials
BD : Béton drainant
GBr : Granulat de dechet de brique cuite
BMD : Béton de mousse drainant
BPCP : Béton poreux à base de ciment portland
CT : Conductivité thermique
E/C : Rapport Eau/Ciment en masse
E/L : Rapport Eau/Liant en masse
EN : Norme Européenne
G/C : Rapport granulat/ ciment
GN :Granulats naturels
k : Coefficient de perméabilité hydraulique
K : kelven
Kg : Kilogramme
kg/m^3 : Kilogramme sur mètre cube
kWh : kilowatt heur
L : Litre
LFA : Laitier de four à arc électrique
LFB : Laitier de four à oxygène de base
m : Mètre
m^3 : Mètre cube
mg : Milligramme
mm : Millimètre
MPa : Méga pascal
NA : Norme Algérienne
NF : Norme française
Rc : Résistance à la compression
S : Seconde
S/C : Rapport sable/ciment en masse
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 (BD), également appelé béton caverneux, perméable ou poreux, est un béton de ciment doté d'une porosité importante qui occupe de 15 à 35 % du volume. Cette capacité poreuse lui confère une faculté à absorber et drainer les eaux de pluie et de ruissèlement.

En plus de sa grande perméabilité, ce type de béton contribue à réduire le bruit et les îlots de chaleurs urbains, ainsi que et la prévention contre le risque d'aquaplanage. Ce type de béton est considéré aussi comme un béton léger en raison de sa faible densité.

La formulation d'un BD est gouvernée essentiellement par le couple porosité/résistance mécanique. La maîtrise de la granulométrie et la compacité granulaire constitue une étape importante afin d'assurer une meilleure description des propriétés drainantes et mécaniques souhaitées.

L'utilisation des granulats légers peut constituer une solution innovante pour améliorer les propriétés thermiques et acoustiques des BDs tout en gardant une résistance et une perméabilité acceptable. D'autre part, les granulats recyclés apparaissent aujourd'hui comme une solution d'avenir du point de vue technique, économique et environnemental.

Un procédé d'incorporation d'une mousse lors de la fabrication du béton est considéré aussi comme une solution technique afin d'obtenir les caractéristiques thermiques et acoustiques souhaitées. La porosité doit être connectée dans ce type de béton pour avoir une capacité drainante.

Dans ce contexte, le travail que nous présentons s'articule autour de deux parties :

La première partie concerne l'élaboration d'un BD à base de granulats de déchet de brique (DB) tout en variant le taux de substitution des granulats naturels par les granulats de déchet de brique.

La deuxième partie de cette étude portait sur la possibilité de formuler un béton de mousse drainant (BMD) le dosage en ciment et le rapport E/C ont prises comme paramètres d'étude dans cette phase d'étude.

L'utilisation des techniques des plans d'expérience, basée sur des approches statistiques, nous a fourni des modèles mathématiques permettent de tracer des courbes isoréponses donnant l'effet de chaque paramètre étudié sur le comportement du béton tout en minimisant le nombre d'essais à réaliser.

Notre présente mémoire est organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les résultats des travaux et études précédentes sur les mêmes axes de recherches.

Le deuxième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux utilisés, les techniques expérimentales et les méthodes de formulation adoptée pour les deux types du béton étudiés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux suivis par des analyses et des interprétations.

Enfin, nous clôturons cette thèse par une conclusion générale qui mettra en évidence les principaux résultats trouvés et synthétise le travail réalisé ainsi que d'éventuelles perspectives et recommandations.

Chapitre 1. Recherche bibliographique

1. BETON DRAINANT

1.1 Introduction

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



Figure 1. 1 Béton drainant [2]

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

Le BD permet d'évacuer en une minute de 85 à 730 litres d'eau par mètre carré selon la taille des gros granulats et la densité du mélange [3] .

Ce type de béton contribue également à la diminution de l'effet des ilôts de chaleurs dans les milieux urbains. À cause de sa texture, il améliore l'adhérence des pneus sur la chaussée [4]

1.2 Compositions du BD

Le BD est généralement un mélange de gros granulats, du ciment et de l'eau. Suite aux récents progrès technologiques, des adjuvants et des ajouts cimentaires, tels que la fumée de silice et les cendres volantes, sont également utilisés. Les adjuvants comme les agents réducteurs d'eau, les superplastifiants et les agents de viscosité sont également employés. De petites quantités de sable sont également utilisées pour améliorer les performances mécaniques du BD.

Le comité 211 de l'ACI [5] classe le BD dans la catégorie des bétons secs ayant un affaissement inférieur à 25 mm. Cette propriété est due à l'utilisation de faibles rapports E/C et un volume de pâte minimale. L'utilisation d'une granulométrie serrée est requise pour assurer l'obtention d'un matériau drainant possédant un bon réseau de pores interconnecté [6].

1.2.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il se forme alors une pâte, faisant prise, puis durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. On peut affirmer que le ciment est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [7]**.**

Ce dernier est obtenu par le broyage du clinker et de sulfate de calcium. Le clinker est issu de la cuisson à haute température (1450°C) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire. À l'issue de cette cuisson, le clinker est broyé avec environ 5% de sulfate de calcium (cf. Figure 1.2). Ce sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Ces différents minéraux sont des sources de chaux CaO, de silice SiO2, d'alumine Al2O3 et de ferrite Fe2O3. Ce qui explique que les principaux constituants du ciment Portland soient [8] :

- Le silicate tricalcique $3CaO.SiO_2$,

- Le silicate bicalcique $2CaO.SiO_2$,

- L'aluminate tricalcique $3CaO.Al_2O_3$,

- Le ferroaluminate tétracalcique $4CaO.Al2O3.Fe_2O_3$.

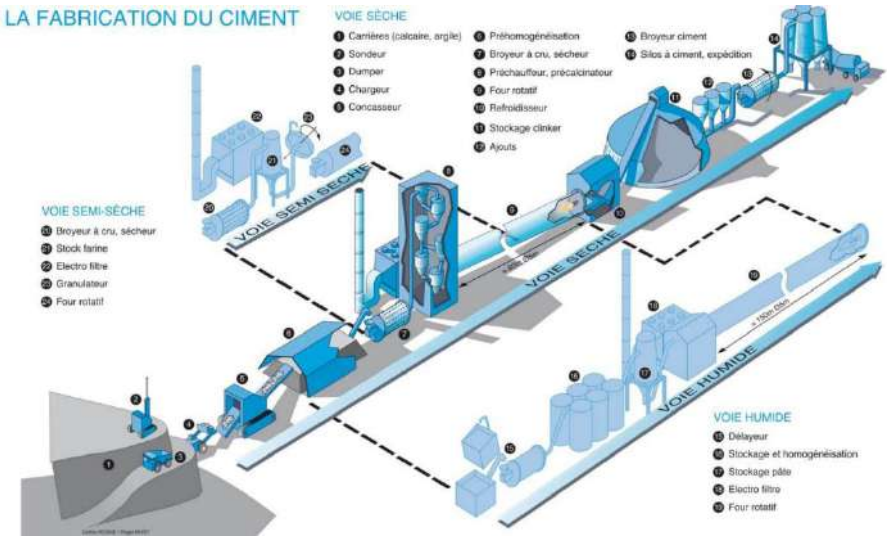


Figure 1. 2 Schémas de fabrication du ciment [9]

La norme NF EN 197-1 [10] retient cinq catégories de ciment courant selon la proportion du clinker et les constituants utilisés :

Le ciment Portland (CEM I);

Le ciment Portland composé (CEM II/A ou B) ;

Le ciment de haut fourneau (CEM III/A, B ou C) ;

Les ciments pouzzolaniques (CEM IV/A ou B) ;

Le ciment de laitier aux cendres (CEMV/A ou B).

En général, le ciment Portland satisfaisant les exigences de la norme ASTM C150 est employé pour la fabrication du BD [5], [6].

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 utilisées sont de l'ordre de 250 à 400 kg/m^3 [6].

Le tableau 1.1 résume les ciments de la norme NF EN 197-1 sur leurs notations et leurs compositions :

Tableau1. 1 Désignation des différents types de ciment selon la norme NF EN 197-1

	Notation		Composition (en % en masse) (1)		
	Dénomination	Symbole (2)	Clinker	Constituants principaux	Constituants secondaires
CEMI	Ciment Portland	CEM I	95-100	0	0-5
CEMII	Ciment Portland Au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice (3)	CEM II/A-D	90-94	6-10	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-P	65-79	21-35	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-V	65-79	21-35	0-5
		CEM II/A-W	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-W	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland au Schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-T	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	21-35	0-5
	Ciment Portland Composé (4) (5)	CEM II/A-M	80-94	6-20	0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35	0-5
CEMIII	Ciment de haut fourneau (6)	CEM III/A	35-64	36-65	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	0-5
CEMIV	Ciment pouzzolanique (5) (7)	CEM IV/A	65-90	11-35	0-5
		CEM IV/B	45-64	36-55	0-5
CEMV	Ciment composé (5)	CEM V/A	40-64	36-60	0-5
		CEM V/B	20-39	61-80	0-5

1.2.2 Eau de gâchage

La quantité d'eau est un facteur critique pour l'obtention d'un BD de qualité acceptable. Une grande quantité d'eau conduirait à une pâte de ciment très liquide. Ceci se traduit par une grande mobilité de la pâte de ciment, ce qui causera l'obstruction des vides. Par contre, une faible quantité d'eau aboutira à un matériau difficilement maniable et à de faibles développements des résistances mécaniques.

La quantité d'eau adéquate correspond à une consistance du BD de façon à former une boule cohésive (stable) après l'avoir pressée à l'aide des deux mains et les résidus solides restant collés sur la main couvrent approximativement 50% de celle-ci (cf. Figure 1.3).



Figure 1. 3 Échantillons de béton perméable avec différentes teneurs en eau : (a) insuffisance d'eau, (b) quantité d'eau appropriée (c) excès d'eau [11]

1.2.3 Granulats

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XP P 18-540 [12] . Un granulat est constitué d'un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, destiné notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais[13].

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée [14] :

- Granulats naturels : lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- Granulats artificiels : lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;

- Granulats recyclés : lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés.

1.2.3.1 Granulats naturels

Les granulats naturels proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches (cf. Figure 1.4) :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres ;
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites ;
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites.

Les compositions minéralogiques font apparaitre trois familles [14]:

- Les roches calcaires ;
- Les roches siliceuses ;
- Les silico-calcaires.



Figure 1. 4 Tableau des familles de roches [15]

1.2.3.1.1 Granulats de Carrières :

Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, suivi des opérations de criblage ou tamisage pour sélectionner des grains à une dimension précise. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres : origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage…etc. [16].

Les Granulats de Carrières prouvent une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est dû à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [17].

1.2.3.1.2 Granulats alluvionnaires :

Dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière (et en mer éventuellement) [18]. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, et criblés pour obtenir différentes classes de granulats[19].

1.2.3.2 Granulats artificiels

Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés.

1.2.3.2.1 Laitier des hauts fourneaux :

Le laitier de haut fourneau est le principal sous-produit de l'industrie sidérurgique, il est constitué de toutes les parties minérales contenues dans la charge du haut fourneau (minerai et ajouts) qui subsistent après l'extraction du fer [20].

1.2.3.2.2 Laitier cristallisé concassé :

Il est obtenu par refroidissement lent à l'air libre, en fosse, il a l'aspect et les propriétés d'une roche magmatique (cf. Figure1.5). Il peut être plus ou moins poreux, plus le refroidissement est lent et en couches minces, plus le laitier est cristallisé et compact [21]. Il possède une masse volumique apparente >1250 kg/cm^3, de composition chimique constituée essentiellement de chaux, magnésie, silice et alumine [22].



Figure 1. 5 Laitier cristallisé [23]

1.2.3.2.3 Schistes houillers :

L'industrie minière en général et les houillères en particulier produisent des quantités considérables de matériaux stériles. Ces déchets trouvent des applications importantes dans des terrassements routiers comme granulats [21].

1.2.3.2.4 Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum…) ou granulats réfractaires[21].

1.2.3.3 Granulats recyclés

Les granulats recyclés sont des granulats résultant de la transformation des matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction. Dans cette catégorie se rangent des granulats, comme le béton concassé, le fraisât d'enrobés bitumineux (cf. Figure 1.6) [24]



Figure 1. 6 Granulats issus du recyclage [25]

1.2.3.3.1 Déchets de chantier :

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brulent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entrainer une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [26].

Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les GBr, 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 [27].

1.2.3.3.2 Déchets de démolition :

Les déchets de démolition sont une sous-catégorie des déchets du bâtiment qui regroupe tous les matériaux de déconstruction ou de réhabilitation (cf. Figure 1.7). 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[28].

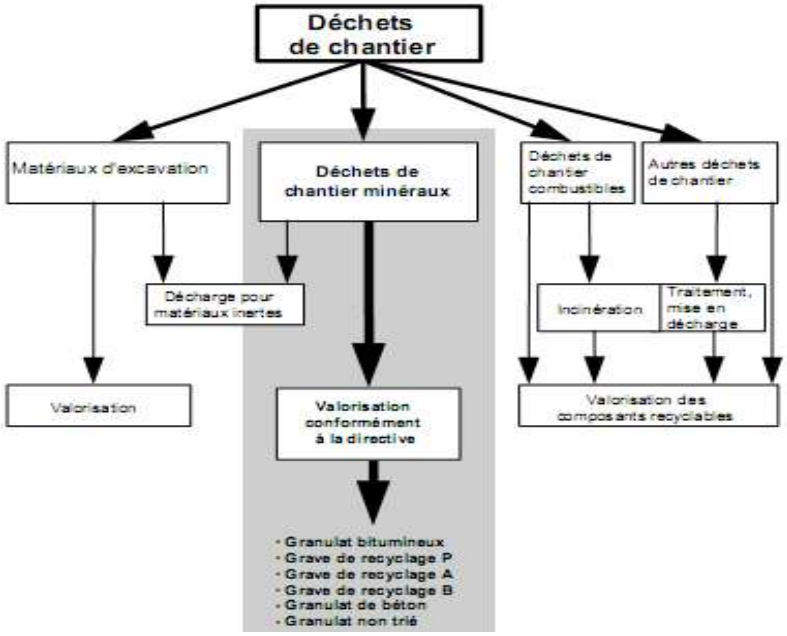


Figure 1. 7 Les différentes catégories de déchets de chantiers [28]**.**

1.2.3.3.3 Élaboration des granulats recyclés [29]

Les installations de production de granulats recyclés ne sont pas tellement différentes des installations de concassage des granulats naturels, ce qui les différencie c'est la présence des impuretés dans les matériaux. Pour enlever ces impuretés, à différents moments au cours du processus de concassage des opérations de triage manuel ou mécanique sont effectuées. La figure 1.8 présente un schéma d'installation de production de granulats recyclés.

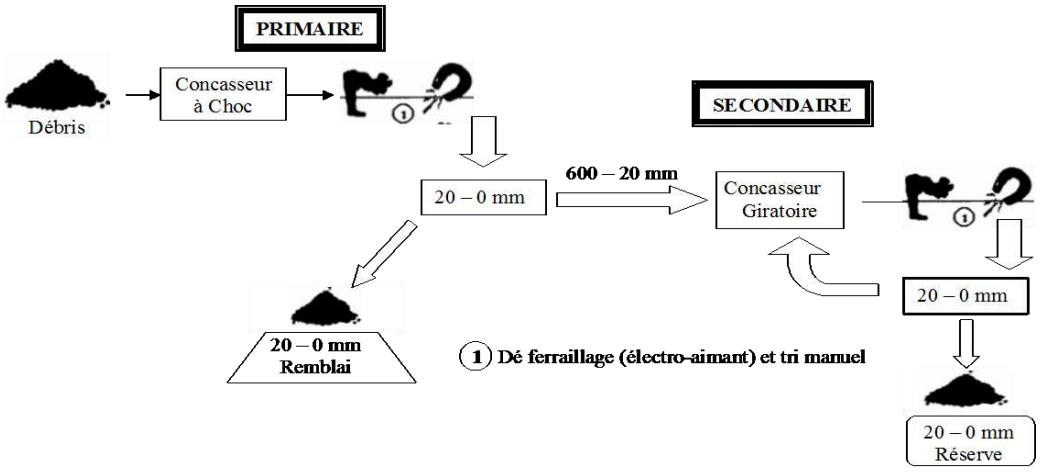


Figure 1. 8 Schéma d'installation de production de granulats recyclés.[24]

À l'exception de la distribution granulométrique, les autres propriétés comme la densité, la masse volumique, l'absorption, et la dégradation à l'impact ne sont pas affectées par le type de concasseur ou le circuit de concassage proprement dit, et tous les concasseurs produisent à peu près la même quantité de particules cubiques si, évidemment, le granulat original du béton de ciment n'a pas de tendance particulière à développer des particules plates et allongées.

Les concasseurs à mâchoires donnent une granulométrie plus grossière, rendant ainsi la réduction de la granulométrie insuffisante, ce qui nécessitera un deuxième concassage. Par contre, le RILEM [26] affirme que ce sont ces concasseurs qui assurent la meilleure distribution granulométrique pour la production de granulats recyclés fabriqués à partir de béton de ciment .

Le type de matériau à concasser aura aussi une incidence sur le choix des concasseurs. Si on concasse du béton de ciment, la quantité de pâte de ciment entourant les granulats naturels sera plus ou moins importante dépendamment du type de concasseur utilisé.

1.2.3.3.4 Stockage des granulats recyclés

La conservation des granulats recyclés après traitement se fait dans des aires de stockage, soit sous forme de tas individualisés, soit en trémies ou silos [30] , selon des critères bien précis et qui sont fonction de la provenance des granulats, de la forme des grains, de la nature des opérations de traitement et de la granulométrie.

HANSEN [31], conseille de stocker les différents types de granulats séparément l'un de l'autre, et de ne pas conserver les sables recyclés pendant longtemps [32].

1.2.4 Adjuvants

Les adjuvants utilisés doivent satisfaire aux exigences de la norme ASTM C 494 [33]. Lorsque de faibles rapports E/C sont utilisés (< 0,30), il est nécessaire d'employer un agent réducteur d'eau ou un superplastifiant pour avoir une meilleure maniabilité et des caractéristiques mécaniques améliorées (cf. Figure 1.9). D'autres adjuvants sont également utilisés, notamment les retardateurs de prise, les agents de viscosité et les agents entraîneurs d'airs [34] .

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

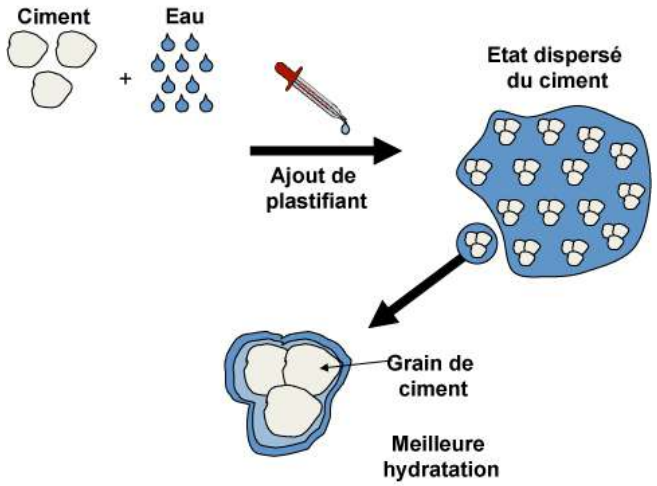


Figure 1. 9 Le mode d'action de superplastifiant [35]

1.3 Propriétés du béton drainant

Les propriétés les plus importantes du BD sont la conductivité hydraulique et la résistance à la compression. Ces propriétés sont affectées par le volume de pâte, le rapport E/C ou E/L et le volume, le type et la taille des granulats. Pour assurer un bon fonctionnement du BD , il est nécessaire d'établir un compromis entre ces différentes propriétés. Ces propriétés sont importantes dans le sens ou toutes les trois réunies sont nécessaires à un fonctionnement durable d'un système en BD [36].

1.3.1 Propriétés à l'état frais

1.3.1.1 Maniabilité

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.

La maniabilité est une caractéristique d'aptitude à la mise en œuvre d'un béton [37]. Sa mesure est appréciée à l'aide de différents appareillages dont le plus répandu est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (cf. Figure 1.10).

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.



Figure 1. 10 L'essai d'affaissement au cône d'Abrams [38]

Pour un béton classique, cette caractéristique est souvent difficile à quantifier à cause de la conjugaison de plusieurs paramètres intrinsèques de la composition d'un béton (le dosage en eau, le dosage et la nature du liant, la forme et la texture des granulats, la granulométrie et la dimension maximale du granulat) [39]. D'autres paramètres, s'ils ne sont pas contrôlés, peuvent affecter davantage la maniabilité telle que : le malaxage, le transport du béton, la température, l'hygrométrie, les fines des sables et l'influence des adjuvants [37].

La quantité d'eau, nécessaire pour une maniabilité donnée, augmente avec l'augmentation de l'indice de la forme et la texture des gros granulats [40]. Il est préconisé de réduire le diamètre et la quantité des plus gros granulats afin d'éviter la ségrégation [41], [42].

Les granulats anguleux avec une texture de surface rugueuse (tels que les granulats concassés et recyclés) nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée que les granulats arrondis à texture lisse [17], [43] de plus, leur coefficient de frottement relativement important, les rendent défavorables pour la maniabilité [41], [42].

Olofinnade et Ogara [44] ont étudié l'ouvrabilité, la résistance et la microstructure d'un béton à haute résistance à base des GBrs. Les résultats montrent que l'ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du taux GBrs (cf. Figure 1.11).

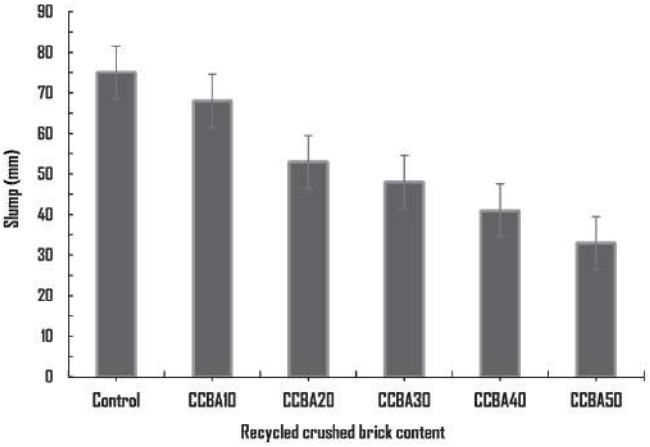


Figure 1. 11,Évolution de l'affaissement (mm) en fonction du taux de GBrs [44]

La présence de fillers favorise aussi la maniabilité du béton, en facilitant le mouvement des granulats. L'influence des propriétés des granulats sur la maniabilité diminue à mesure que le mélange devient plus riche en ciment [42], [45] et peut même disparaitre lorsque le rapport G/C est de l'ordre 2,5 ou de 2 [17], [40].

L'ouvrabilité des bétons recyclés est généralement affectée par la capacité d'absorption d'eau des granulats [46], [47]. 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 [46].

La forte absorption d'eau est attribuée à la présence de l'ancien mortier attaché aux granulats recyclés et plus celui-ci est important plus la maniabilité se réduit davantage[48]. D'après certaines expériences, les bétons recyclés à base de granulats recyclés et sable naturel nécessitent 5 % d'eau que le béton conventionnel avec la même ouvrabilité [49] (cf. Figure 1.12). Certains chercheurs conseillent l'utilisation des granulats recyclés saturés en eau ou très humides [50].

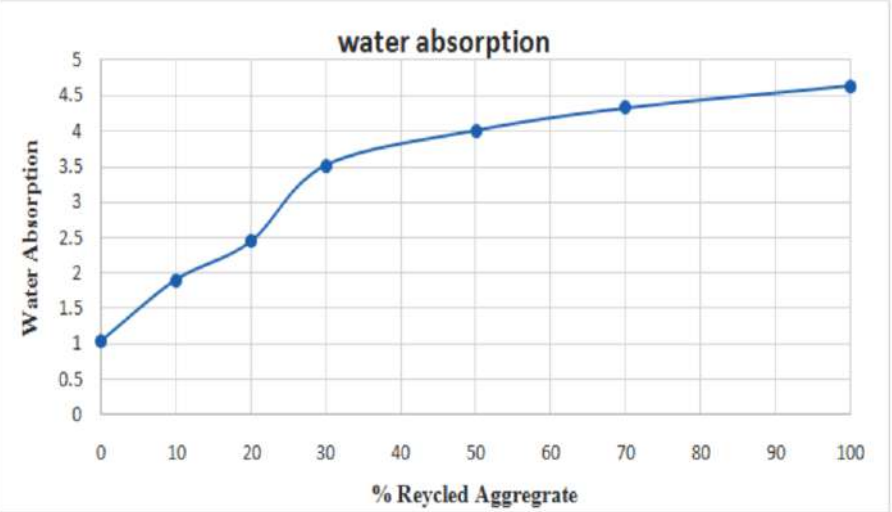


Figure 1. 12 Évolution de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage des granulats recyclés [51]

D'après une étude menée par M. BARRA et al [52], lorsque les granulats recyclés sont saturés, la zone interfaciale n'est pas efficace, et pour l'améliorer une humidification des granulats à 80-90 % (plus proche de saturation).

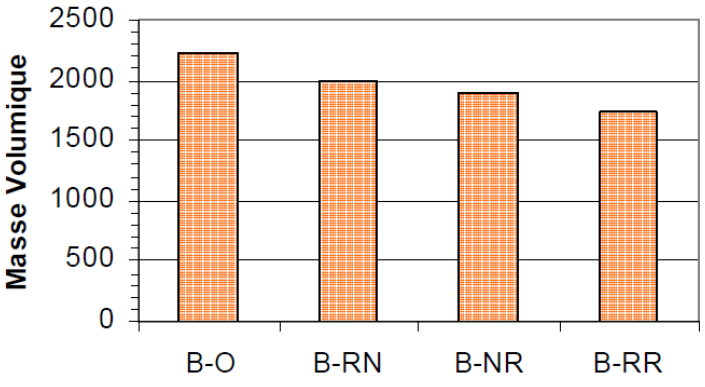
1.3.2 Propriétés à l'état durci

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 [43].

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[53], [54] et d'autre part, du processus de concassage adopté [55].

Barkat [56] montre que la densité des bétons à base de GBrs est très inférieure à celle du béton ordinaire. Cette diminution est attribuée à la faible densité des GBrs (cf. Figure 1.13). Pour un dosage constant en granulat, la masse volumique du béton augmente avec la masse volumique du granulat [17].



B-O : Béton ordinaire usuel « béton –témoin »
B-RN : Béton ordinaire avec sable recyclé de brique concassée
B-NR : Béton de brique concassée avec sable naturel
B-RR : Béton entièrement en brique concassée

Figure 1. 13 Variation de la densité en fonction du taux de substitution en GBr concassée [56]

1.3.2.2 Porosité et perméabilité

La perméabilité ou le taux de percolation du BD est la vitesse à laquelle l'eau peut s'écouler à travers le revêtement en place et est fonction des vides interconnectés du béton. La porosité minimale pour obtenir un taux de percolation acceptable est de 15 % (cf. Figure 1.14). La perméabilité augmente de façon très importante avec la teneur en vide. Le principal défi réside à trouver l'équilibre entre une résistance à la compression suffisante et un taux de percolation acceptable [57].

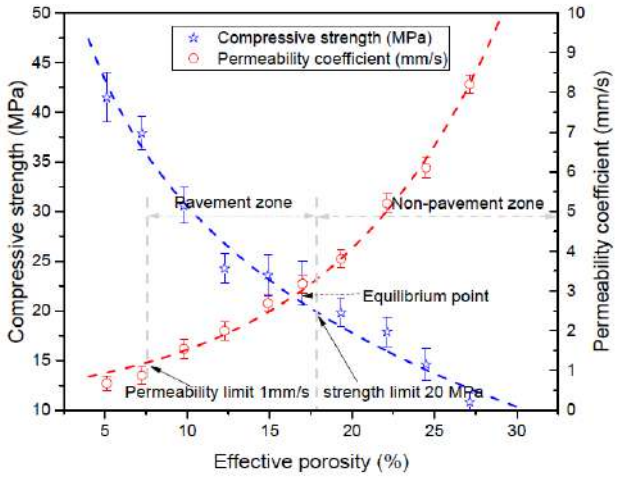


Figure 1. 14 Point d'équilibre de la variation de la résistance à la compression et de la perméabilité avec la porosité effective du BD [58]

La valeur minimale de perméabilité pour qu'un béton puisse être considéré comme drainant est de 1 mm/sec[59] . Le perméamètre à charge variable est utilisé pour évaluer la conductivité hydraulique des BDs [60], [61], [62]. C'est un dispositif similaire à celui utilisé en mécanique

des sols et des roches. Neithalath et al [60] de l'Université de Perdue ont utilisé une méthode non destructive pour la prédiction de la conductivité hydraulique (cf. Figure 1.15).

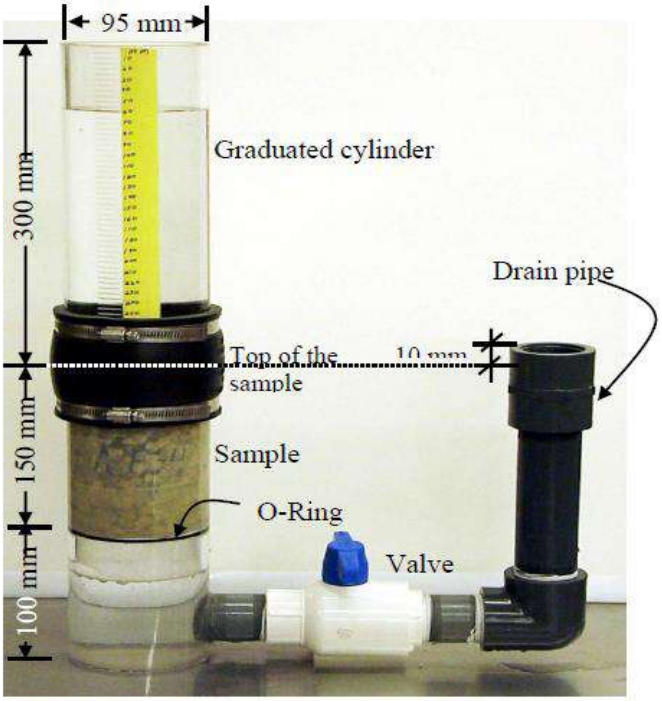


Figure 1. 15 Perméamètre à charge variable [60]

Neithalath et al [60] ont montré une dispersion des résultats et une faible corrélation entre la porosité effective et la perméabilité intrinsèque (figure 1.16). Ceci serait dû au fait que la porosité effective est une propriété volumétrique tandis que la perméabilité intrinsèque est une propriété qui définit la capacité d'écoulement, qui ne dépend pas seulement de la quantité des pores, mais également de leur distribution et leur connectivité.

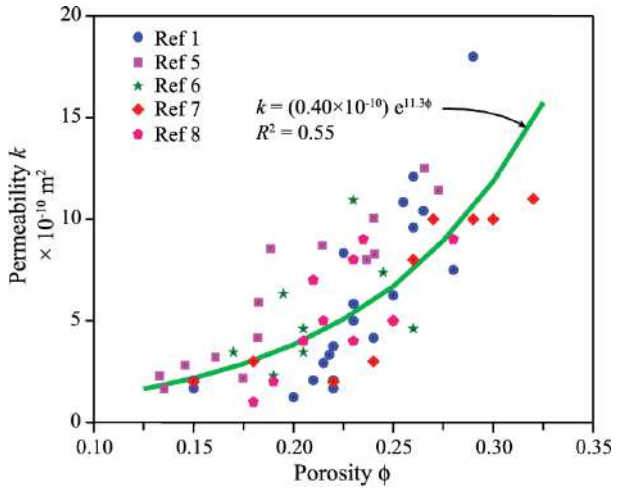


Figure 1. 16 Relation entre la porosité et la perméabilité [63]

D'autres études ont montré une relation exponentielle entre la conductivité hydraulique et la porosité effective des BDs (cf. Figure 1.17). La pente est d'autant plus accentuée pour les porosités supérieures à 25 % [64].

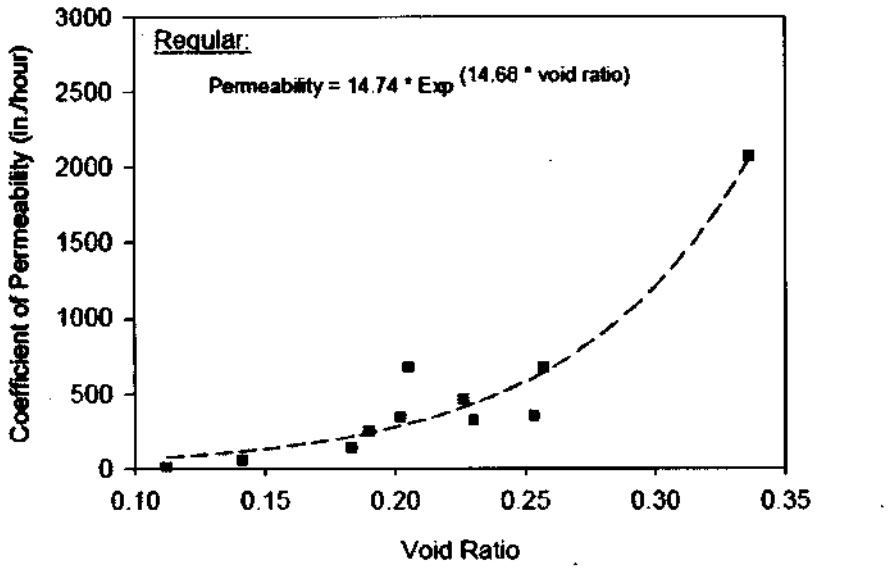


Figure 1. 17 Relation entre la perméabilité et le volume de vides [64]

1.3.2.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression du BD est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importantes sont le volume de granulat, la porosité effective et la quantité et la qualité de pâte. Elle démontre la capacité d'un béton à résister aux sollicitations mécaniques et dans certains cas sa durabilité. La résistance à la compression du BD peut varier de 3 à 20 MPa. Ces faibles valeurs de résistance par rapport au béton ordinaire font que son utilisation est limitée pour les applications ne requérant pas de grandes sollicitations comme les chaussées à faible trafic et les aires de stationnement [4].

La résistance à la compression dépend aussi du compactage obtenu au moyen des équipements utilisés pour la mise en place. Cette dernière augmente avec le compactage, mais un meilleur compactage diminue aussi la teneur en air (cf. Figure 1.18). L'ajout d'une petite quantité de sable augmente la résistance à la flexion. Les résistances à la compression et à la flexion sont étroitement reliées à la teneur en vides [65], [66] .

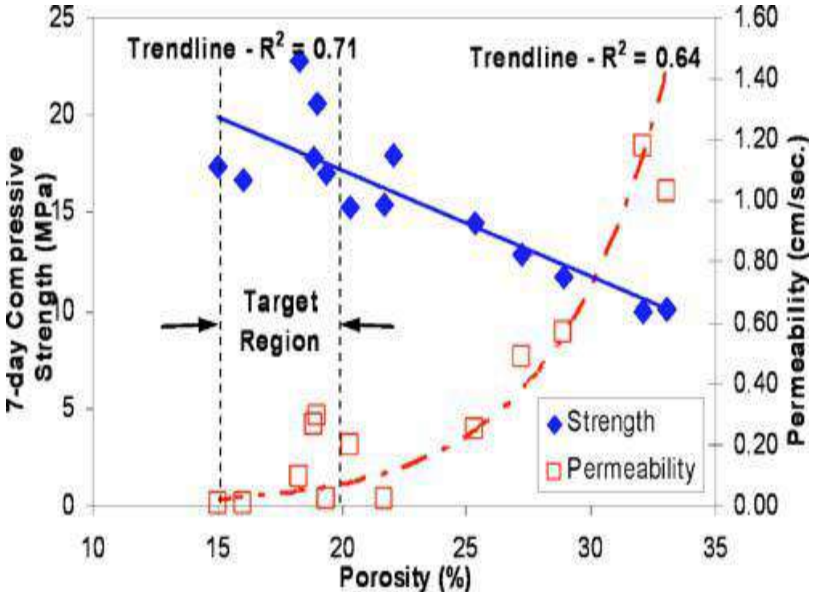


Figure 1. 18 Relation entre la résistance à la compression, la perméabilité et la porosité [65]

1.3.2.4 Résistance à la traction par fendage

Ce l'essai est utilisé sur les matériaux fragiles pour caractériser la limite de rupture en traction. Il consiste à comprimer un disque en deux points opposés, cet effort induit un effort en traction perpendiculairement au chargement (cf. Figure 1.19). Le matériau étant fragile, la rupture se fait en traction. Pour cela on utilise des éprouvettes cylindriques, il est à noter que l'élancement (rapport entre la hauteur et le diamètre) peut descendre jusqu'à une valeur de 1. Afin d'avoir un contact de bonne qualité entre l'éprouvette et les plateaux [67]. La norme NF EN 12390-6 [68] décrit cet essai.

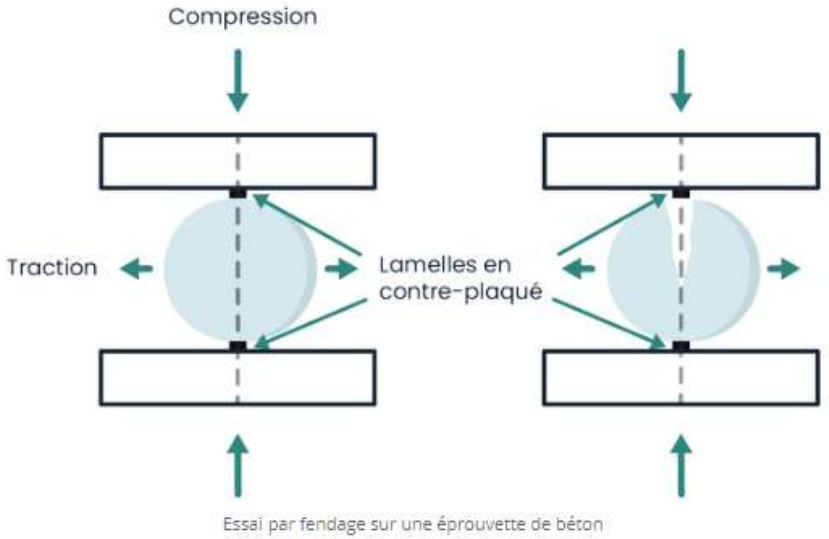


Figure 1.19 Essai par fendage sur une éprouvette de béton [69]

1.3.2.5 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 BD 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 [4].

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 [4], [59].

Trois méthodes d'essai d'abrasion en laboratoire ont été étudiées par Dong et al [70] 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 [71] et basées sur la norme ASTM C 131 [72], 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 (cf. Figure 1.20). 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 [73], [74]

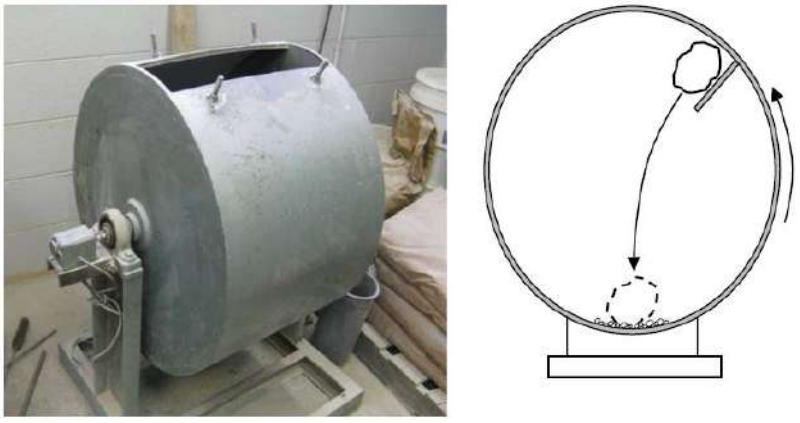


Figure 1. 20 L'essai Cantabro : (a) le tambour Los Angeles ; (b) illustration de l'essai

1.3.2.6 Auscultation dynamique

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de fréquence supérieure à la fréquence de coupure de l'oreille humaine (environ 15 kHz). La vitesse de propagation d'une onde devient plus élevée lorsque le temps de transmission de l'information d'une particule élémentaire constituant la matière à sa voisine est plus facile. Elle dépend du niveau de cohésion de la matière. Ainsi, les vitesses de propagation d'une onde dans l'air. [75]

Le BD peut être utilisé pour atténuer l'intensité acoustique des bruits causés par le frottement des pneus sur la chaussée et les moteurs de véhicules par réflexion sur la surface du pavage. Donc l'utilisation d'un matériau poreux comme le BD limiterait la propagation de bruit et dissiperait l'énergie acoustique [66].

L'utilisation d'un matériau dissipant une partie de l'énergie sonore s'avère une bonne solution pour réduire la pollution sonore, celle-ci est plus importante dans les milieux urbains [36]. Des travaux réalisés par Marolf et al [76] ont rapporté que les bétons fabriqués avec des granulats de petite taille absorbent mieux l'énergie acoustique que ceux fabriqués avec de granulats de grande taille. Les meilleurs résultats ont été obtenus en combinant les granulats de taille maximale de 9,5 mm et 4,75 mm. Par ailleurs, il est reporté que l'ajout de la fumée de silice n'affecte pas l'absorption acoustique du BD, alors que l'ajout du sable altère les propriétés drainantes et acoustiques. Pour un même type de granulat, l'absorption acoustique du BD est fonction de la fréquence de l'onde et de l'épaisseur du matériau utilisé [60] .

Martins Filho et al [77] visent à étudier les propriétés du BD en se basant sur l'essai ultrasonique. Pour cela, trois mélanges ont été réalisés avec un rapport pâte/granulat variant de 0,45 à 0,65 et un rapport E/C de 0,3. La caractérisation du BD à l'aide de l'essai ultrasonique mérite une attention particulière e à cause de manque des recherches et des modèles analytiques qui permet de prédire les propriétés ultrasoniques en tant que variable indépendante (cf. Figure 1.21). Les résultats montrent que la forte porosité du béton perméable provoque une atténuation de l'onde ultrasonore. La vitesse des ondes ultrasoniques est plus élevée pour les mélanges avec des densités plus élevées (R^2 = 0,87), des résistances à la compression et à la traction plus élevées (R^2 de 0,79 et 0,84, respectivement) et une perméabilité plus faible (R^2 = 0,91).



Figure 1. 21 Mesure de la vitesse de propagation d'ondes [77]

1.3.2.7 Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau est définie comme l'énergie (ou la quantité de chaleur) transférée par conduction thermique à travers un matériau La conductivité thermique des bétons dépend de la conductivité thermique de chacun de ses composants. Cependant, il est généralement admis que la conductivité thermique du béton dépend essentiellement de celle des granulats [78]. Pour les bétons courants, la conductivité thermique diminue lorsque la température augmente. Cette baisse de conductivité est montrée à travers les travaux de [78], [79] et suivant le type de béton et la nature des granulats (cf. Figure 1.22).

Zaetang et al [80] ont utilisé des granulats légers pour la fabrication des BDs légers. La diatomite (DA), la pierre ponce (PA) et des granulats recyclés à partir d'un béton cellulaire autoclavé (RA) ont été utilisés comme granulats. Le volume de pâte a été varié de 15 à 25 % en volume pour chaque type de granulat utilisé. Les résultats montrent que l'utilisation de la diatomite et la pierre ponce et les granulats recyclés du béton cellulaire autoclavé dans le béton perméable pourraient réduire la densité et la conductivité thermique d'environ 3 à 4 fois par rapport au béton perméable contenant des granulats naturels.

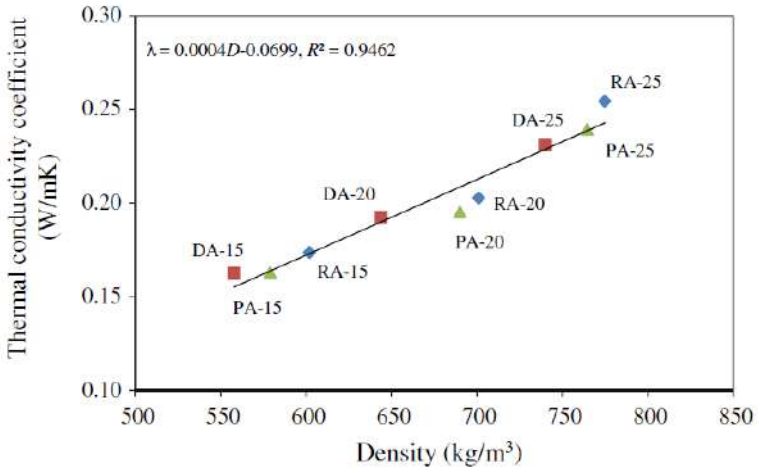


Figure 1. 22 Relation entre la conductivité thermique et la densité [80]

L'effet d'ilots de chaleur est un phénomène qu'on rencontre dans les grandes villes avec de grandes surfaces recouvertes par des matériaux denses ou possédant un très faible albédo (le béton conventionnel et l'asphalte). Dépendamment de la qualité de sa structure poreuse, le BD peut dissiper l'énergie solaire emmagasinée et réduire l'effet d'ilots de chaleur urbain. Une étude menée à l'Université d'Iowa comparant un système mixte composé d'une partie en béton conventionnel et l'autre en BD a révélé que ce dernier emmagasine moins d'énergie que le béton conventionnel (cf. Tableau 1.2) [81] .

Tableau1. 2 Énergie emmagasinée dans un système mixte[81] .

Date	Température Maximale (°C)	Durée d'exposition (heures)	Énergie emmagasinée (J/cm²)	
			Béton Conv.	Béton Drainant
7/7/2007	33,7	9	560,2	492,3
7/8/2007	34,2	9	576,7	516,8
7/17/2007	33,9	9	501,6	449,5
7/18/2007	32,3	9	398,4	352,4
8/11/2007	32,8	10	486,6	449,3

1.3.2.8 Retrait et Gonflement

Le retrait et le gonflement sont deux déformations indissociables du comportement du béton. Ils trouvent leur origine dans la pâte de ciment. Ces déformations doivent donc, en toute circonstance, être prises en compte.

Cette contraction dimensionnelle est d'autant plus grande que le rapport E/C est plus élevé. Cependant, le retrait de séchage qui peut effectivement se produire est limité par les granulats si ceux-ci sont à des pourcentages élevés. Selon certaines études la dégradation (fissuration) qui en découle du retrait se trouve favoriser par la présence des granulats plats qui peuvent constituer des drains s'ils sont juxtaposés[43], par la présence des argiles et fines dans les granulats [42] et à la grandeur du module élastique de ces derniers [82].

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 [82].

Les bétons à base de granulats de recyclage tendent à avoir un retrait et un fluage plus importants. Cette tendance augmente avec la proportion de granulats de recyclage. Le retrait et le fluage sont signalés excessifs en cas d'utilisation de sable de béton concassé et le mouillage préalable des granulats, selon une étude[83]

HASABA & ALL. [84] ont signalé que le retrait de séchage du béton à base de granulats recyclés et de sable naturel est de 50% plus élevé que celui du béton conventionnel, et lorsqu'on utilise les deux granulats recyclés (gros et fins), le retrait de séchage du béton recyclé peut augmenter jusqu'à 70% plus élevé que celui de béton conventionnel. Ces auteurs soutiennent que le facteur responsable qui a induit l'effet de retrait dans ce type de béton est la forte absorption d'eau des granulats recyclés.

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 [85]. 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 [86]. Le retrait est fonction de la quantité de pâte utilisée ainsi que du rapport granulat/ciment (G/C) [4](cf. Figure 1.23).

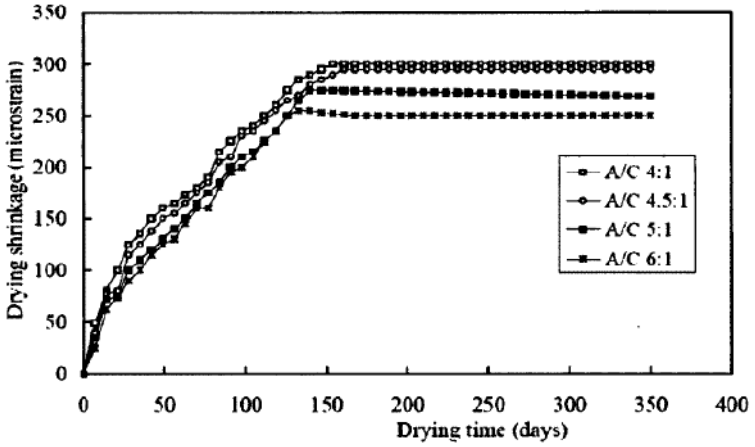


Figure 1. 23 Évolution du retrait de séchage en fonction du temps [4]

John T Kevern et Nowasell [87] ont étudié la cure interne d'un BD à base des granulats légers. Ils ont trouvé que le retrait du BD à base de granulats légers est plus élevé que celui du béton témoin.

Certaines études KATZ (2003) [88] 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 [88] l'effet de la teneur en granulats recyclés n'aboutit à aucune différence notable dans le retrait si cette teneur ne dépasse pas 50%. Sur celle-ci est présentée une comparaison de mesures de retrait sur des spécimens de bétons fabriqués de 20, 50 et 100% de granulats recyclés. À des taux de 100% de recyclés, la différence est bien évidente néanmoins.

Des résultats du test de fluage mené dans des conditions normales en laboratoire sont à contre sens de ce qui a été avancé précédemment et après 1 an de chargement le fluage est donné environ 20% de moins que pour un béton (A. AJDUKIEWICZ & A. KLISZCZEWICZ 2002). Bien qu'un travail supplémentaire dans le domaine soit indispensable pour confronter les résultats, il semble que les comportements du béton de granulats recyclés et du béton de granulats naturels ne sont pas comparables lors de la visualisation de l'effet combiné du retrait et le fluage.[24]

1.4 Facteurs influençant les bétons drainants

Pour obtenir un matériau drainant d'excellente qualité plusieurs paramètre et facteur ont été optimise notamment la résistance à la compression et la durabilité face aux cycles de gel dégel

peuvent être affectées par différents facteurs dont le volume et le type de granulat le rapport E/C l'énergie de consolidation les ajouts cimentaires et l'ajout d'une certaine quantité de sable [89].

1.4.1 Influence du rapport E/C

Les rapports situés entre 0.35 et 0.40 offrent les meilleures résistances à la compression qui a observé par Richard Meininger selon l'étude qui a été réalisée en 1988 [90] (cf. Figure 1.24). Une attention très importante doit être faite lors de l'utilisation de rapports E/C élevés, car la pâte de ciment deviendrait plus poreuse et fluide et aurait tendance à ferme les vides inters granulaires par gravité, ce qui réduit considérablement la conductivité hydraulique.

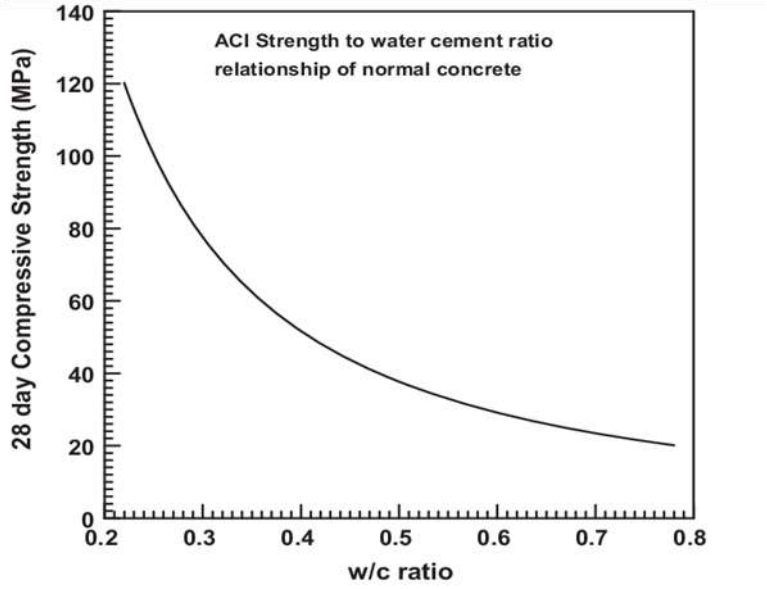


Figure 1. 24 Relation entre le rapport E/C et la résistance à la compression à 28 jours [90]

Les rapports E/C les plus utilisés sont de l'ordre de 0,27 à 0,30 [91]. Il y a un problème de cure et un faible développement des propriétés mécaniques dus au risque d'évaporation plus grand dans le cas de faible rapport causé par la structure poreuse ouverte des BDs. À énergie de consolidation et rapport C/G (ciment/granulat) constants, la porosité effective décroit linéairement avec le rapport E/C (cf. Figure 1.25) [91].

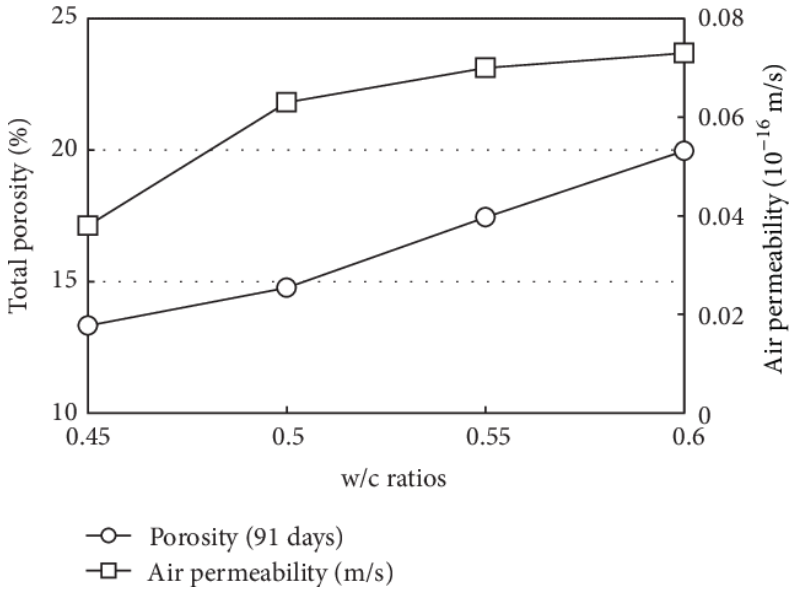


Figure 1. 25 Relation entre le rapport E/C et la porosité effective [92]

1.4.2 Influence de la porosité

La porosité effective est indispensable pour assurer une certaine conductivité hydraulique du béton poreux on y fait référence comme le volume des vides est fonction de l'énergie de consolidation, de la forme et du coefficient d'uniformité des granulats [92] . il y a une relation entre la taille des granulats et la porosité effective des échantillons du BD ce qui a été décrit par l'étude faite par Marlof en 2004 [76]. Cette étude montre également que les granulats de grande taille fournissent des BDs de porosité supérieure que ceux de petites taillent. La combinaison de deux granulats de taille différente peut altérer la porosité effective, notamment dans le cas de deux granulométries assez éloignées [89] (cf. Figure 1.26).

Une porosité effective d'au moins de 15% est nécessaire pour assurer une perméabilité minimale [65]. 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. Vernon et al ont trouvé une excellente relation entre la masse volumique des échantillons au laboratoire et le volume total de vides [89].

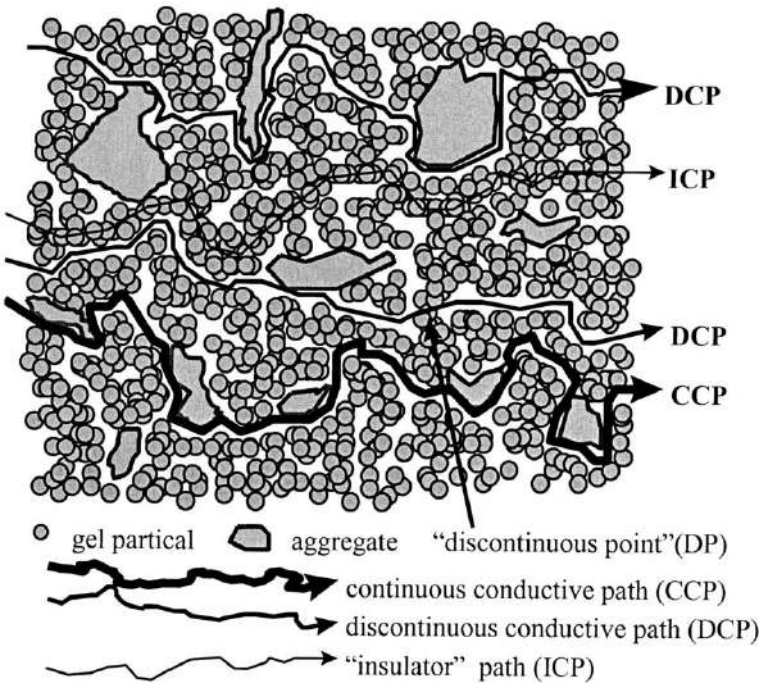


Figure 1. 26 Représentation schématique de la micro structure du béton [95]

1.4.3 Influence des ajouts

Pour améliorer principalement les propriétés mécaniques en utilise les ajouts cimentaires.

Le laitier d'acier utilisé était de taille de 20 mm conforme à l'agrégat gradué selon IS 383:1970. Les scories d'acier étaient dures, denses et poreuses et composées de morceaux de plus de 20 mm. il a ensuite été écrasé et porté à la taille requise selon IS 33:1970. Le laitier d'acier a été utilisé en remplacement des granulats naturels dans le mélange de béton. Les remplacements ont été effectués dans les rapports de 40% et 80% des scories d'acier avec 60% et 20% des agrégats naturels respectivement. Les propriétés chimiques des différents types de laitier ferreux varient selon le procédé de production. La teneur en fer (Fe) des scories de haut fourneau (ABS/GBS) est généralement inférieure à 0,5 % en poids puisqu'elle résulte d'un processus de réduction. Contrairement au laitier de haut fourneau, le laitier de four à oxygène de base (BOS) et le laitier de four à arc électrique (EAF) (laitier d'acier) sont générés dans un processus d'oxydation et ont donc une teneur en fer significativement plus élevée [93].

Une étude sur l'effet du remplacement du ciment par de la cendre volante a montré qu'un taux de remplacement de 2% assure des performances mécaniques supérieures à celles obtenues avec un taux de remplacement de 30%. Mais les échantillons obtenus avec un remplacement de 30% ont donnée des meilleures propriétés drainantes que ceux à 2%, respectivement 2,1 mm/sec avec une porosité de 15,8% et 1,3 mm/sec avec une porosité effective de 14,9% [94].

1.4.4 Influence des granulats

1.4.4.1 Effet des diamètres des granulats

Les caractéristiques des tailles de pores pour différents mélanges ont été comparées afin de vérifie l'influence de la taille de granulat et de la gradation sur la taille des pores. La parcelle de la taille de l'agrégat par rapport à la taille caractéristique des pores est montrée pour les mélanges avec des granulats de taille unique. Le mélange à base des granulats 3/8 a la plus grande taille des pores parmi tous les mélanges étudiés alors que le mélange avec seulement de diamètre 8 mm possède une taille des pores minimale. Une augmentation de la taille globale entraine une augmentation des pores de moyenne taille [76].

1.4.4.2 Effet des granulats roulés et concassés

Les granulats de forme angulaire sont moins compactés que ceux de forme ronde, ce dernier fournirait des bétons ayant des masses volumiques et performances mécaniques plus élevées [92].

Afin de réduire le gaspillage des ressources, la brique d'argile recyclée a été considérée comme un substitut du granulat dans le béton. Les propriétés physiques des GBrs ont été étudiées. Comme la conception d'un mélange est essentielle au béton de déchet de GBr, elle a également été étudiée. De plus, certains chercheurs ont étudié les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à base de granulat recyclé [95].

Les GBrs présentent une porosité et une absorption plus élevées que les granulats naturels, la densité des bétons diminue avec la teneur croissante en briques et le taux d'absorption de l'eau et l'indice de broyage sont plus élevés que ceux des granulats naturels. Comme les particules des GBrs étaient de forme angulaire, elles se sont bien collées au ciment. La résistance de GBrs à un effet plus important sur la résistance du béton. Si la résistance des GBrs est élevée, la résistance des bétons est élevée. Les images microscopiques de la surface de coupe du béton avec des granulats naturels et de GBrs sont montrées à la figure 1.27. De l'observation visuelle de la surface du béton, par rapport aux granulats naturels, les GBrs avaient plus de pores dans leur structure [95].

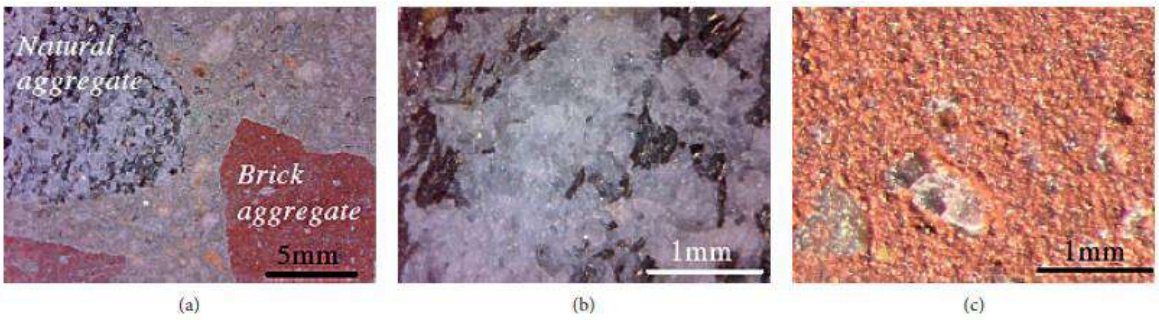


Figure 1. 27 Images de la surface du béton : (a) granulats naturels et briques, (b) granulats naturels et (c) granulats de briques [98]

1.5 Avantages et les inconvénients :

1.5.1 Avantages

Comme la chaussée en BD est perméable, l'eau peut être captée et se déplacer dans la chaussée pendant les précipitations. Entretemps, l'air libre est stocké dans la chaussée et permet la communication entre l'air et le sous-sol. Ces propriétés offrent de nombreux avantages pour le béton perméable.

L'une des principales utilisations du béton perméable est la gestion des eaux pluviales. En raison de sa porosité élevée, le béton perméable peut capter les eaux pluviales et fournir une voie d'écoulement de l'eau dans le sous-sol, aidant à ajuster naturellement le niveau des eaux souterraines. Les résidus sur les chaussées seront absorbés par le béton perméable ou sous les sols au lieu d'être transportés dans les rivières et les lacs par l'eau de pluie, ensuite dégradés par les micro-organismes dans les sols. Par conséquent, la pollution des ressources en eau pourrait être réduite considérablement, ce qui permettrait d'économiser considérablement sur la gestion des eaux pluviales [94].

Sur la base des recherches effectuées par Kevern J T [81], la surface en béton perméable aurait une réflectance solaire plus faible et donc une température de surface plus élevée dans des conditions de rayonnement solaire similaires. L'utilisation de systèmes de béton perméable avec leurs couches de matériaux ayant une porosité plus élevée que les systèmes de chaussée traditionnels peut être un outil efficace pour réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain. Il est important de tenir compte des caractéristiques des matériaux sous le niveau du sol, comme la porosité, pour déterminer la capacité d'une chaussée perméable à atténuer les îlots de chaleur. La réflectance solaire ne doit pas être utilisée indépendamment de ces autres variables [81].

1.5.2 Inconvénients

La capacité portante du béton perméable est réduite en raison de l'existence de grandes quantités de vides d'air. La faible résistance limite l'utilisation du béton perméable aux aires de stationnement, aux trottoirs et aux autres voies de circulation à faible volume. De toute évidence, une porosité et une résistance élevées sont deux caractéristiques incompatibles du béton perméable. Ce désavantage initie l'étude sur le béton perméable vise à améliorer sa résistance à la compression tout en maintenant la porosité relative élevée [94].

L'utilisation de béton perméable dans un environnement de gel-dégel est également une préoccupation, surtout dans la partie nord des États-Unis, qui sont des districts où le temps est froid. Le béton perméable est plus susceptible d'être détruit par temps de gel. Des recherches ont été faites pour étudier la pertinence du béton perméable dans ce type de climat. Des règlements ont été pris pour assurer l'applicabilité du béton perméable [94].

L'abrasion du béton perméable peut limiter son utilisation. Il peut y avoir éblouissement si l'agrégat n'est pas suffisamment enduit de pâte de ciment. D'autres facteurs tels que le rapport eau/ciment (E/C), le temps sec, en particulier la surface rugueuse, rendent également l'agrégat vulnérable à l'abrasion. Théoriquement, l'abrasion de la surface peut rendre la surface plus inégale et aggraver l'abrasion au fil du temps [94].

1.6 Domaine d'application

Lorsque le béton perméable est utilisé pour le pavage, il peut absorber les eaux pluviales à un débit rapide de de 146 à 244 litres par minute par mètre carré de surface, ce qui dépasse le débit nécessaire pour prévenir le ruissèlement dans la plupart des cas de pluie. L'eau de pluie peut être stockée dans une couche de gravier grossière sous la chaussée ou laisser infiltrer dans le sol sous-jacent. Comme le revêtement lui-même agit comme une zone de rétention, il aide à prévenir une grande partie du ruissèlement pollué qui se produit normalement avec les chaussées imperméables. Le processus de filtration aide également à purifier l'eau. Comme l'eau percole à travers les cellules ouvertes de la chaussée, les bactéries aérobies dans les vides aident à décomposer les polluants nocifs et les produits chimiques [96].

Les types perméables de béton ont trouvé son application particulièrement dans les chaussées des aires de stationnement et des parcs. Lorsque le béton perméable absorbe l'eau, les flaques d'eau stagnante sont réduites. Cela facilite le passage dans les parcs et assure la sécurité des conducteurs sur la chaussée [96].

L'effet d'îlot de chaleur urbain est réduit par l'utilisation de béton de type perméable. Cela est dû au fait que le béton est de couleur claire et a une structure à cellules ouvertes. Par conséquent, moins de chaleur est absorbée par le béton perméable et donc moins de chaleur est rayonnée dans l'environnement. La structure à vide ouverte du béton perméable aide également à garder la surface froide en raison de la température plus froide du sol en dessous [96].

1.7 Mise en place [97]

La première phase liée à la gestion et au contrôle de la qualité. Les plans décrivent l'emplacement, les détails et les limites du projet. Les spécifications précisent les procédures et les exigences applicables aux matériaux, la qualité de fabrication attendue et les conséquences de leur niveau insuffisant. Les estimations reflètent les quantités prévues de matériel et les taux d'application.

La préparation au placement du revêtement est relativement mineure. Les élévations de la voie devraient correspondre à celles de l'aéroport ; une épaisseur donnée (selon la conception structurelle du revêtement du programme conjoint de protection civile (PCPC) de la dalle de béton existante doit être fraisée. Ensuite, nettoyez la surface en béton fraisé avec un balai ou un aspirateur. Enfin, localisez les tuyaux en PVC perforés de 10 à 15 cm diamètre pour le transporter débordement ou déplacement du système de drainage existant pour garantir les avantages hydrologiques du recouvrement.

Les transitions de chaussée constituent un détail de conception courant pour les recouvrements. Ils assurent une transition en douceur, idéalement inaperçue, de la dalle de béton existante au revêtement. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser des couches d'apprêt et de collage pour assurer la liaison entre les couches.

Installation. Une fois que le béton poreux à base de ciment portland (BPCP) arrive sur le terrain, la maniabilité doit être mesurée (ASTM C1611) [98]. En raison de sa consistance rigide, il ne peut pas être pompé. Ensuite, le béton perméable est déversé directement sur la surface. Le recouvrement BPCP est placé en une seule couche, d'une épaisseur donnée. La mise en place, l'épandage et la suppression de BPCP doivent être continus et rapides, dans un délai de 60 minutes pour les mélanges conventionnels et de 90 minutes pour les mélanges modifiés (avec réglage étendu).

Le compactage final est réalisé avec un rouleau à tambour statique (10 psi de force verticale). En raison du durcissement rapide et des taux d'évaporation élevés, il est recommandé de terminer la consolidation dans les 15 minutes suivant le placement.

Les joints de contrôle sont facultatifs pour le béton perméable. Si cela est fait, il doit être coupé avec un passage d'un "coupe-pizza" (cf. Figure 1.28). L'espacement et les profondeurs (1/4 de l'épaisseur du recouvrement) devraient être les mêmes que pour la dalle existante, afin d'éviter les fissures réfléchissantes. L'installation conjointe devrait avoir lieu peu après la consolidation. Les joints de coupe de scie sont également possibles, mais ils ne sont pas recommandés parce que le lisier créé peut obstruer la structure poreuse, et il en résulte souvent un débordement excessif des joints.



Figure 1. 28 Rouleau à joint, communément appelé « coupe-pizza » [97]

Le durcissement est essentiel à la durabilité et à la performance du béton perméable. Dans un délai maximum de 20 minutes après le placement, un brouillard suivi d'une feuille de plastique (6 mm) doit être placé. Il doit rester en place pendant au moins 7 jours (PCPC conventionnel) ou 10 jours (PCPC modifié). Remarque : Les bords peuvent être fixés avec des sacs de sable sur du plastique pour assurer le durcissement de toute la surface.

Le taux d'infiltration en place devrait être mesuré (ASTM C1701) [99], des valeurs minimales de 1,4 mm/sec sont prévues. Pour les véhicules et les aéronefs, il est recommandé de ne pas ouvrir les chaussées pendant 7 jours et 14 jours (jusqu'à ce qu'elles atteignent leur pleine résistance), respectivement. Un séchage continu est recommandé jusqu'à la fin de ces délais. Une fois que cela se produit, des carottes peuvent être prises pour mesurer l'épaisseur et la densité (ASTM C1754) [100] [97].

2. BETON DE MOUSSE

2.1 Définition

Le béton de mousse est un type de béton léger dans lequel des bulles d'air sont introduites par l'intermédiaire d'une mousse « produite par agitation d'un agent moussant » dans un mélange coulis de ciment ou de mortier. Ce béton contrairement au béton autoclavé ne nécessite pas d'étuvage, son durcissement se fait à l'air libre [101] (cf. Figure 1.29).



Figure 1. 29 Béton de mousse [102]

Ce type de béton possède des propriétés d'isolation thermique et acoustique ainsi qu'une bonne résistance au feu et au gel. Le béton mousse peut être produit aussi bien sur site pour l'isolation des murs et des planchers qu'en usine pour la préfabrication d'éléments de construction [103].

Les possibilités d'utilisation du béton mousse se sont vues élargies grâce à ses caractéristiques structurelles, associées à une faible densité et une faible consommation énergétique. Ce type de béton mousse présente une bonne fluidité à l'état frais, une masse volumique à l'état durci plutôt légère (400 à 1600 kg/m^3), une faible résistance mécanique, mais d'excellentes propriétés d'isolation thermique [104], [105].

Les bulles d'air sont introduites soit par brassage d'une mousse aqueuse fabriquée séparément soit par addition d'un entraîneur d'air au cours du malaxage. Avec un agent entraîneur d'air, la quantité de bulles va dépendre dans une certaine mesure de la quantité de mousse, de la durée de malaxage, de la composition du mortier et de l'intensité du mélange [103].

2.2 Constituants

2.2.1 Liant

Le liant le plus couramment utilisé pour les bétons mousses est le ciment Portland, seul ou avec d'autres composés. Les additions sont ajoutées pour diverses raisons : réduire les coûts de production (économie de ciment Portland), modifier la consistance de la pâte, diminuer le temps de prise, augmenter les performances au jeune âge [106] .

Awang et al.[107] ont étudié les propriétés thermomécaniques de bétons mousses avec différentes additions. La mousse stable a été fabriquée avec un tensioactif à base de protéine (Noraite PA-1) à raison de 70 mg/L d'eau. Trois masses volumiques apparentes du produit fini sont examinées : 600, 1000 et 1400 kg/m^3. Des cendres volantes, de la chaux ainsi que des fibres de polypropylène sont incorporées au mélange dans différentes proportions. La résistance en compression, en flexion et le retrait sont mesurés 180 jours après la fabrication des différents échantillons. La technique du disque chaud a été mise en œuvre pour déterminer les conductivités thermiques. Les différentes additions ne modifient pas la résistance en compression (affirmant les conclusions de [108], mais améliorent les performances en flexion et diminuent le retrait). En revanche, l'effet sur les propriétés thermiques est moindre, car elles semblent uniquement dépendre de la masse volumique.

Des fines de charge non cimentaires telles que du sable [109], [110], du calcaire [111], de la silice[112], du verre broyé [113] ou des granulés de polystyrène [114] peuvent également être ajoutés pour réduire les coûts ou ajuster la densité[115] .

Awang et al.[107] ont étudié les propriétés thermomécaniques de bétons mousses avec différentes additions. La mousse stable a été fabriquée avec un tensioactif (agent moussant) à base de protéine (Noraite PA-1) à raison de 70 mg/L d'eau. Trois masses volumiques apparentes du produit fini sont examinées : 600, 1000 et 1400 kg/m^3. Des cendres volantes, de la chaux ainsi que des fibres de polypropylène sont incorporées au mélange dans différentes proportions. La résistance en compression, en flexion et le retrait sont mesurés 180 jours après la fabrication des différents échantillons. La technique du disque chaud a été mise en œuvre pour déterminer les conductivités thermiques. Les différentes additions ne modifient pas la résistance en compression (affirmant les conclusions de [108], mais améliorent les performances en flexion et diminuent le retrait). En revanche, l'effet sur les propriétés thermiques est moindre, car elles semblent uniquement dépendre de la masse volumique.

2.2.2 Granulats

Il convient de noter que les granulats les plus utilisés dans le béton mousse sont les sables. Geng et al [116] présentent une étude portant sur l’influence des différents rapports

sable/ciment avec différentes classes de ciment sur le comportement mécanique des bétons de mousse. Les résultats montrent que la résistance à la compression diminue tout en augmentant le rapport S/C. D'autre part, Les mélanges confectionnés avec un ciment 42.5R ont une résistance à la compression plus élevée que ceux formulés avec un ciment 32.5R (cf. figure 1.30).

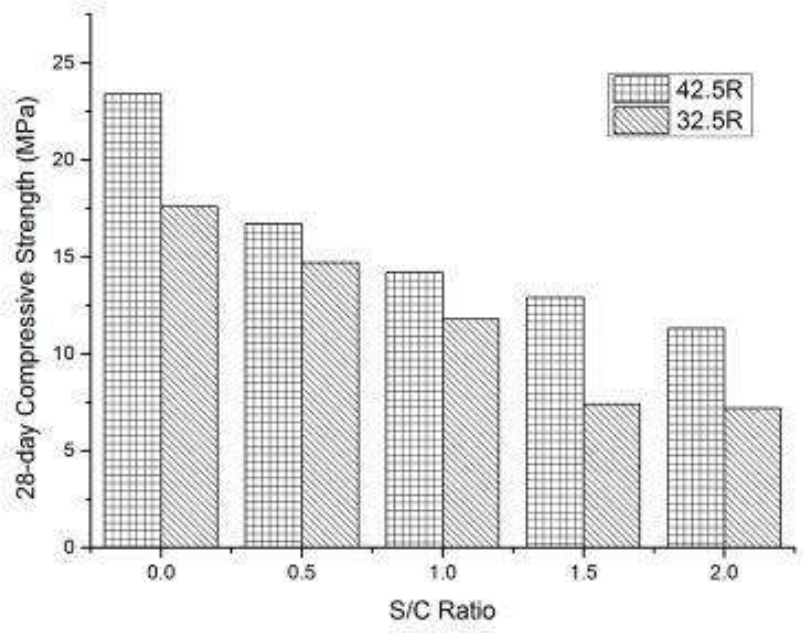


Figure 1. 30 Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport Sable/Ciment avec différents types de ciment [116]

2.2.3 Eau

La quantité d'eau nécessaire à la création de béton mousse est très variable et dépend de la composition du mélange et de la consistance de pâte souhaitée. Le rapport eau/liant doit être maintenu faible afin d'obtenir de bonnes performances mécaniques et de réduire le phénomène de retrait. Une quantité d'eau trop faible donne une pâte trop ferme, ce qui peut entrainer une rupture des bulles. Au contraire, une pâte trop liquide ne peut empêcher les bulles de remonter, des problèmes de ségrégation et de drainage sont également possibles. Indépendamment du liant, le rapport massique eau/liant varie généralement entre 0,45 et 0,65 [117], [118].

2.2.4 Agents moussants [105]

Au cours des dernières décennies, les mousses aqueuses ont été de plus en plus utilisées dans le domaine de la construction. Elles sont également utilisées dans l'industrie pour la décontamination ou l'extraction du pétrole. Afin d'obtenir une mousse stable et des films d'eau plus rigides, des agents moussants de types synthétique ou protéinique sont indispensables.

La compatibilité entre l'agent moussant et le superplastifiant ou d'autres additions chimiques doit être prise en considération. Les superplastifiants ou autres additifs peuvent avoir un effet anti-moussant. Par exemple, le polyalcool est un additif anti-mousse pour béton classique

contenant des groupes -OH. Ces groupes, en se disposant autour des bulles, repoussent l'entraineur d'air engendrant de la coalescence [117], [119].

Les agents moussants sont généralement classés en deux grandes catégories :

2.2.3.1 Agents moussants protéiques

Les protéines contribuent à la formation et à la stabilité de la structure de la mousse. Des études ont montré que l'augmentation de la concentration en protéines entraine une augmentation du taux d'adsorption des protéines à l'interface liquide/gaz, ce qui conduit à une réduction de la tension de surface et donc à une augmentation du pouvoir moussant [120], [121].

Plusieurs principes généraux sont souvent donnés dans la littérature pour décrire la relation entre la stabilité d'une mousse de solution de protéines et leurs propriétés interraciales [122]. Les explications les plus courantes dans ces articles sont : l'adsorption plus rapide, le déploiement rapide des protéines, la faible tension superficielle et la formation de réseaux entraînant une grande élasticité de surface. Tous ces facteurs favorisent la formation de la mousse et renforcent sa stabilité. Ils sont souvent basés sur une co-occurrente, comme l'apparition de valeurs maximales de changement de la tension de surface et de la stabilité de la mousse autour du point isoélectrique de la protéine [123]. Autour de ce point, une barrière énergétique à l'adsorption plus faible a été constatée accélérant l'adsorption des protéines. Par ailleurs, en ce même point, la répulsion électrostatique entre les protéines adsorbées est moindre, permettant d'atteindre des valeurs plus élevées de densité des protéines adsorbées à l'interface. Cette densité plus élevée de la couche adsorbée assure une stabilisation stérique, se traduisant par une mousse plus stable, malgré une diminution de la répulsion électrostatique entre surfaces dans les films d'eau de la mousse liquide [124].

2.2.3.2 Agents moussants synthétiques

Les agents moussants sont des molécules amphiphiles, elles ont une double affinité pour la phase liquide et gazeuse et s'adsorbent sur les interfaces liquide/gaz. Elles sont constituées de deux parties : une tête hydrophile associée à une queue hydrophobe, constituée d'une chaîne carbonée dans la plupart des cas.

Les agents moussants de type synthétique s'adsorbent aux interfaces gaz/liquide au niveau des bulles créées par le moussage (cf. Figure 1.31) [125]. Ils changent la rhéologie interfaciale et rendent ainsi les films plus rigides [125]. Cette adsorption renforce le caractère

viscoélastique (une répulsion électrostatique entre les surfaces des bulles) et augmente, de ce fait, la stabilité des films [126], [127].

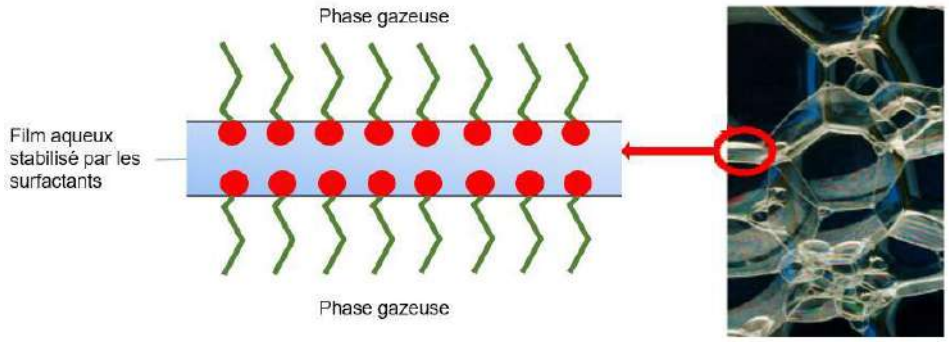


Figure 1. 31 L'adsorption des agents moussants synthétiques aux interfaces liquide/air.

La structure des mousses aqueuses ainsi créée va évoluer dans le temps, rendant leur description géométrique difficile. Cette géométrie varie sous l'effet des paramètres physiques comme la fraction volumique liquide, la taille de bulle, la viscosité du fluide, la température et la pression ; elle est également dépendante d'autres paramètres liés à l'interface tels que la tension de surface, l'adsorption des tensioactifs qui conditionnent la rhéologie de l'interface.

2.3 Techniques de fabrication [128]

2.3.1 Moussage mécanique

La méthode de malaxage rapide repose sur un fort ajout de tensioactif au sein de la suspension minérale qui permet la création d'une mousse minérale stable lorsque tous les composants sont mélangés. La méthode par mousse préformée repose sur la production séparée d'une suspension minérale et d'une mousse aqueuse légère stable. Ces deux méthodes requièrent un maintien de la structure de la mousse minérale jusqu'à la prise.

Cette stabilité dépend de plusieurs paramètres tels que la contrainte de cisaillement de la suspension, la nature et concentration du tensioactif, la structure moléculaire du tensioactif. D'après Buyn et al [129], la méthode mousse préformée est généralement préférée à la méthode de malaxage rapide, car elle requiert moins de tensioactif et sa mise en place est facilitée sur chantier lors de la construction.

Yang et Lee [130] étudient l'influence de plusieurs paramètres sur les performances thermomécaniques de béton mousse fabriqué par moussage mécanique. Les mousses sont fabriquées à partir de ciment Portland ordinaire et d'un tensioactif constitué de protéine hydrolysée. Entre 1,5 et 3 % de gypse anhydre sont ajoutés afin d'accélérer la prise

(hydratation plus rapide de C3A). Trois principaux paramètres sont étudiés : le volume de mousse préformée, le taux de gâchage et la masse volumique apparente du béton mousse. La structure porale de ces différents échantillons est analysée à l'aide d'un prosimètre à mercure et un microscope optique. Une résistance mécanique optimale est obtenu pour un taux de gâchage de 0,25 et un volume de mousse de 1250 %. La structure porale est composée de bulles non communicantes montrant l'action bénéfique du tensioactif. La taille moyenne de bulle diminue avec le l'augmentation du rapport E/L et augmente avec le volume de mousse introduit. Just et Middendorf [131] obtiennent des résultats similaires.

2.3.2 Moussage chimique

Le béton à base de moussage chimique (béton gaz) est produit grâce à la réaction chimique d'une faible quantité (de l'ordre de 0,2 % de la masse de ciment) de poudres métalliques (agent expansif). Ces fines poudres réagissent avec l'eau et les hydroxydes dans le milieu alcalin, libérant ainsi des bulles de dihydrogène et créant des complexes métalliques hydrolysés. La réaction endogène est réalisée suivant l'équation (1.1) écrite pour le cas de l'aluminium :

$$Al\ (s) + 3H_2O\ (l) + OH^-(aq) \rightarrow Al(OH)^-\ (aq) + 3/2\ H\ (g) \qquad \text{(Equation 1. 1)}$$

D'autres métaux peuvent être utilisés, le zinc ou le silicium suivant une réaction analogue. La pâte de ciment doit avoir une consistance suffisante pour empêcher les bulles de remonter à la surface [132]. Le béton gaz peut contenir ou non des granulats. Cependant, cette technique de fabrication peut entrainer de l'anisotropie.

Cabrillac et al [110] étudient ce phénomène en réalisant différentes matrices et bétons aérés non- autoclavés correspondants. De la chaux et du sable, en proportion variable, sont ajoutés au ciment Portland ordinaire ainsi qu'une quantité variable en agent d'expansion, l'aluminium. Tout d'abord, l'ajout de chaux et de sable tend à diminuer la porosité quels que soient le dosage en ciment et la quantité d'aluminium tandis qu'une augmentation du dosage en aluminium augmente la porosité.

Le béton mousse le plus répandu est le béton cellulaire autoclavé. Sa composition est basée sur un mélange de sable siliceux, de ciment, de chaux, d'eau et d'une faible quantité de poudre d'aluminium. Après avoir mixé ces composants, la suspension minérale est coulée dans des moules. Le volume est multiplié par cinq lors de la phase d'expansion provoquée par l'apparition de bulles de dihydrogène, un gaz inflammable. Après la prise, les panneaux sont découpés et placés dans un four pour y subir une phase d'autoclavage pendant 10 à 12 heures

afin d'initier la réaction pouzzolanique entre la silice et la chaux [133] . En découle une structure constituée de millions de cellules (0,05 < dpore < 3 mm) qui confèrent au matériau ses propriétés isolantes (0,13 < λ < 0,27 W/(m·K)). Enfermé de façon homogène dans la matrice, l'air joue le rôle d'isolant parfait. La matrice rigide permet au béton cellulaire d'être utilisé comme matériau partiellement porteur (2 < Rc < 8 MPa). Cependant, la phase d'autoclavage, à haute température et haute pression, augmente significativement la consommation énergétique de production. L'énergie grise associée est de 340 kWh/m³.

Jerman et al [134] relèvent une très grande dépendance de la conductivité thermique à la teneur en eau du béton cellulaire. La conductivité est multipliée par six lorsque le matériau passe de l'état sec à l'état d'humidité maximale. L'air peut également être directement enfermé dans la suspension minérale sans réaction chimique. Ces mousses sont produites mécaniquement, par la méthode par malaxage rapide ou à l'aide de la méthode par mousse préformée.

2.4 Propriétés de béton de mousse

2.4.1 Densité à l'état frais

La densité à l'état frais est mesurée à l'aide d'une balance. La mesure est effectuée juste après l'arrêt du malaxeur une fois la fabrication terminée. Celle-ci correspond à une prise d'environ 10 minutes du ciment. Trois mesures de la densité à l'état frais sont effectuées pour toutes les gâchées. Pour une formulation plusieurs gâchées ont pu être effectuée afin d'évaluer la répétabilité du protocole de fabrication [135].

2.4.2 Porosité

La taille et la distribution des vides est l'étape la plus critique lors de la production de bétons mousses. La porosité et la structure porale du produit fini semblent conditionner la conductivité thermique et les propriétés mécaniques du béton mousse au même titre que les performances de la matrice. Selon Visagie et Kearsley [136], une forte porosité totale « ϕ » va fortement réduire la résistance à la compression, tout particulièrement si les pores sont de grandes tailles. Tout comme les matériaux cimentaires classiques, le béton mousse se compose de nano-pores (dpore < 0,01 μm), de pores capillaires ou micro-pores (0,01 μm < dpore < 10 μm) et de macro-pores (10 μm < dpore ; air entraîné et/ou piégé). Les gel pores occupent 40 à 55 % du volume de pore total, mais n'influencent ni la perméabilité à l'eau, ni la résistance mécanique. Cependant, l'eau dans ces gel-pores est physiquement liée au ciment, par hydratation, elle contrôle ainsi les phénomènes de retrait et de fluage. Les pores des mousses issus d'un moussage chimique sont en général plus grands que ceux issus d'un moussage mécanique [137], [117].

Just et Middendorf [131] étudient l'influence de plusieurs paramètres sur la microstructure de bétons mousse réalisés avec du CEM I 42,5 R. Tout comme l'ont démontré Yang et Lee [130] , la diminution du taux de gâchage diminue la taille moyenne de bulle. La taille moyenne de pores peut également être réduite en ajoutant des fumées de silice. De plus, la relation entre la taille des pores et la sphéricité est étudiée. Cette dernière diminue lorsque la taille de pores augmente.

2.4.3 Auscultation dynamique

Depuis plus d'un demi-siècle, la tendance est à l'utilisation de la méthode de vitesse des ondes ultrasoniques dans l'industrie du béton , cette technique est applicable à la détermination de la densité du béton, résistance, module d'élasticité, homogénéité, durabilité, profondeur de fissuration superficielle et autres propriétés [138].

Les propriétés du béton comme les granulas, le type de ciment, le rapport eau/ciment, les mélanges et l'âge du béton auront tous une incidence sur l'auscultation dynamique ; d'autres effets, y compris le contact avec le transducteur, la surface de contacte, l'humidité et l'état de durcissement du béton, la longueur, la taille et la forme de l'échantillon, le niveau de contrainte et l'acier d'armature auront également une incidence sur la propagation des ondes ultrasoniques. Par conséquent, ces facteurs devraient être contrôlés pour fournir des résultats d'essai fiables [139].

La taille de l'échantillon soumis à cet essai devrait être prise en considération pour déterminer la fréquence appropriée. La dimension latérale minimale de l'échantillon doit être supérieure à la longueur d'onde ultrasonique [138]

La vitesse des ondes ultrasonique est calculée à l'aide de l'équation 1.2.

$$VOU = \frac{L}{\Delta t} \qquad \text{(Équation 1. 2)}$$

Où :

L : la longueur du trajet d'impulsion ultrasonique

Δt : le temps de trajet des ultrasons à travers l'échantillon.

Davraz et al [140] ont étudié la relation entre la vitesse ultrasonique (UPV) et la porosité dans le béton mousse, il ont montré que l'augmentation de la porosité tend à une diminution de la vitesse ultrasonique (cf. Figure 1.32).

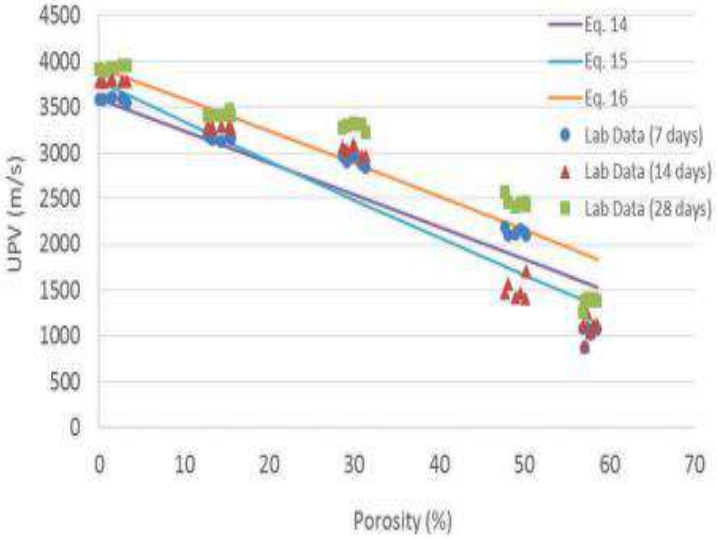


Figure 1. 32 Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité à 7,14 et 28 jours [139]

2.4.4 Propriétés mécaniques

L'utilisation de béton mousse, en tant que matériau partiellement porteur, impose une résistance à la compression minimale qui va dépendre de l'utilisation ciblée. La résistance à la compression est influencée par plusieurs facteurs tels que la nature du liant [141], le rapport E/L, la nature de l'agent moussant utilisé, les additions, la forme des pores et leur distribution.

Kearsley et Wainwright [142] indiquent que la résistance à la compression de béton léger diminue d'une manière exponentielle avec la masse volumique (cf. Figure1.33).

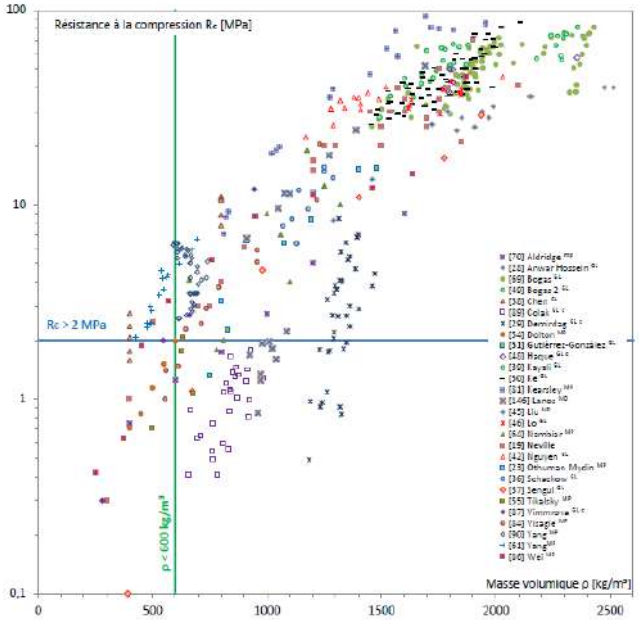


Figure 1. 33 Relation entre résistance mécanique et masse volumique des bétons légers. Légende : Granulats légers = GL ; Moussage chimique = MC ; Malaxage rapide = MR ; Mousse préformée = MP [117]

Samson et al [143] et Aldridge [144] confirment que la relation entre la résistance à la compression et la masse volumique n'est pas linéaire. Selon Samson et al [117] , la diminution de la résistance est causée par un dosage élevé en tensioactifs qui affecte la cristallisation de la matrice minérale, associé à une diminution de la masse volumique. Dans ces travaux, une résistance à la compression minimale de 2 MPa, pour une masse volumique de 600 kg/m^3, est recherchée.

Différentes substitutions telles que la fumée de silice, les granulats légers, les cendres de boue de papier usagé, les granulats d'argile et de schiste expansé, les cendres volantes, le filler calcaire, le laitier de haut fourneau granulé [145] ,[142] sont utilisées pour améliorer les performances mécaniques des bétons mousses [146], mais aussi pour en réduire les coûts de fabrication. Une étude expérimentale, recherchant un substitut aux briques d'argile classiques, a montré que l'ajout de cendres volantes dans la formulation d'un béton mousse entraine une augmentation de 36% de la résistance à la compression [130]. Ganesan et al [147] ont également trouvé que la résistance du béton mousse augmente avec la diminution de la teneur en mousse aqueuse et avec l'ajout de cendres volantes. D'autres ajouts tels que les fibres d'acier, les fibres de noix de coco et la cellulose de vieux papiers [148] permettent aussi d'améliorer la résistance en empêchant les microfissures. Ils sont généralement ajoutés dans des proportions comprises entre 0,2% et 1,5% du volume du mélange. Ces résultats sont confirmés également par [149].

Falliano et al [141] remarquent que la diminution du rapport E/C, même si elle augmente la résistance de la matrice de ciment, diminue la résistance à la compression du béton mousse [141]. Ils attribuent cet effet à la forme irrégulière des bulles. Certains auteurs mentionnent que la résistance mécanique est meilleure lorsque la distribution de la taille des bulles est plus serrée et donc mono disperse [104] et lorsque les bulles ne sont pas connectées [117]. Les résultats de [117] ont montré également que la résistance du béton mousse augmente lorsque le rapport eau/ciment change en réduisant les grosses bulles présentes dans le béton. Selon Steshenko et al.[150], l'ajout d'un plastifiant et de microfibres a permis de réduire la taille des pores et a entraîné la formation de pores fermés dans le béton mousse.

En se basant sur l'étude menée par Samson et al [143] , les mousses minérales, présentant des résistances à la compression supérieures à 2 MPa, ont été produites avec trois tensioactifs de nature différentes : le tétradactyle triméthyle ammonium bromide et le hexadecyle trimethyle ammonium bromide de type cationique et un autre de type anionique AOS (90% sodium alpha-olefin sulphonate). Ces mousses sont produites avec de faibles dosages (0,003%

à 0,1% de la masse de liant) et un faible rapport E/L, en appliquant la méthode de moussage dissociée.

2.4.5 Propriétés thermiques [105]

Les études portant sur les mousses minérales ont montré que la conductivité thermique est une fonction linéaire de la masse volumique du béton mousse [63], [147]. D'après Samson et al [143], les mousses minérales de densité ≤ 600 kg/m^3 présentent une conductivité inférieure à 0,2 W/m·K. Ces résultats sont aussi présentés par Yang et Lee[130] qui ont étudié la conductivité thermique des bétons mousses produits par pré-moussage. Ils ont identifié une gamme de conductivité thermique allant de 0,119 à 0,199 W/(m·K) pour des masses volumiques entre 400 et 600 kg/m^3. Les différentes formulations étudiées par Kearsley et Wainwright [142] présentent des conductivités thermiques comprises entre 0,1 et 0,7 W/m·K pour des masses volumiques entre 600 et 1600 kg/m^3. Des valeurs similaires sont obtenues par Gökçe et al [151] (entre 0.239 et 0.942 W/m·K) pour une gamme de mases volumiques plus grande (jusqu'à 1998 kg/m^3). La conductivité thermique est cependant influencée par la formulation, le type d'addition et la structure porale.

Ganesan et al [151] ont trouvé des conductivités thermiques comprises entre 0,24 et 0,74 W/m·K pour des bétons mousses produites avec différent additifs, ayant des masses volumiques de 700 à 1400 kg/m^3. Weigler et Karl [152] ont observé une diminution de 0,04 W/m·K de la conductivité thermique pour chaque diminution de 100 kg/m^3 de la masse volumique.

Chen et Liu [149] ont évalué les performances thermomécaniques du béton mousse contenant du polystyrène expansé. Les résultats ont montré que la maniabilité du mélange et le pouvoir isolant sont fortement améliorées suite à l'introduction de mousse aqueuse. Les bétons mousses produits ont des masses volumiques de 400 et 800 kg/m^3 ayant des résistances à la compression de 3 et 12 MPa et des conductivités thermiques de 0,009 et 0,25 W/(m·K) respectivement.

Yang et Lee [130] ont montré que la conductivité thermique du béton de mousse testé a tendance à diminuer légèrement avec l'augmentation du volume de mousse aqueuse et la diminution de la teneur en liant. D'autres études ont montré aussi que la nature et le dosage du tensioactif utilisé affecte fortement les propriétés thermiques des mousses[117], [143] .

Peu d'études toutefois ont été menées sur les performances thermiques des mousses de gypse. Huang et al [153] ont étudié les performances thermomécaniques des mousses de gypse produites par moussage chimique. Les propriétés thermomécaniques sont liées à la teneur en tensioactif, au rapport E/L et à la structure des pores ; toutefois en recoupant l'information

avec le contenu de la Figure I.34, la masse volumique apparente reste bien le facteur influent principal.

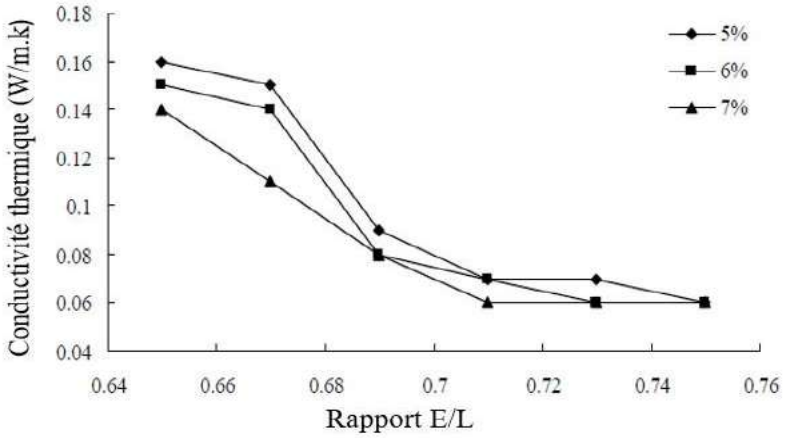


Figure 1. 34 Évolution de la conductivité thermique en fonction du rapport E/L pour différentes dosages en agent moussant [153]

2.5 Avantages

- Ce type de béton est léger, Il est donc beaucoup plus facile à transporter. De plus, il permet à construire de plus en plus en hauteur.
- En raison de ses avantages environnementaux le béton mousse est intégré comme un matériau écologique.
- Les bétons de mousse présentent une excellente résistance aux cycles de gel/dégel, ainsi qu'un meilleur comportement au feu.
- La structure poreuse des bétons de mousse gouverne leur pouvoir d'isolation thermique et acoustique. En outre, ce type de béton apparaisse comme régulateur d'humidité [154].

2.6 Inconvénients

- Les bétons de mousse présentent des faibles résistances mécaniques.
- En raison de retrait important des bétons de mousse, l'apparition des fissures est très probable
- Le béton cellulaire n'est pas renouvelable.
- Il est nécessaire d'augmenter les distances d'enrobage des armatures en raison de ma porosité et la perméabilité importante des bétons de mousse.
- Le béton cellulaire est susceptible de se fissurer plus facilement que d'autres matériaux utilisés (briques ou parpaings) [155].

2.7 Domaine d'application

Les domaines d'emploi de béton mousse sont [156] :

- De panneaux isolants non porteurs
- En forme de pente isolante pour toiture-terrasse
- Il s'utilise pour l'isolation de sols, sur terre-plein ou vide
- La préfabrication des éléments architecturaux
- La protection d'étanchéité sur terrasse
- Rénovation d'anciens planchers afin d'éviter la surcharge des structures ou apporter une isolation complémentaire.

3. MODELISATION PAR PLAN D'EXPERIENCE

Afin de prendre en considération tous les facteurs affectant les propriétés aux états frais et durci du béton étudié, plusieurs gâchés sont nécessaires dans la formulation. Les méthodes basées sur le plan d'expérience permettent d'atteindre les propriétés visées et d'obtenir des formulations optimisées par l'établissement des modèles statistiques donnant l'effet de chaque paramètre de formulation et leurs effets sur ces propriétés, tout en minimisant le nombre de gâchés [157], [158].

La préparation du plan d'expérience commence par la définition des objectifs de l'étude, ce qui permet de choisir les réponses permettant d'atteindre les objectifs visés et rechercher par la suite les facteurs qui pourraient être influant sur la réponse. Les facteurs choisis doivent être étudiés dans des intervalles limités par des niveaux haut et bas et le choix des limites des intervalles se fait selon l'influence du facteur. Une connaissance préliminaire de l'effet de chaque facteur est nécessaire. Les limites hautes et basses des facteurs sont recherchées dans la littérature et confirmés par des essais aux laboratoires [157].

3.1 Méthodologie des plans

Avec un plan d'expérience on cherche à réaliser le minimum d'essais tout en réduisant l'influence de l'erreur expérimentale sur les modélisations mathématiques qui serviront à prendre des décisions. Cet objectif est atteint en considérant les propriétés mathématiques qui relient la réponse aux facteurs. Il existe des plans classiques qui permettent de modéliser les réponses dans les meilleures conditions et qui possèdent d'excellentes qualités statistiques tels que les plans factoriels complet et les plans factoriels fractionnaires (Figure 1.35) [159].

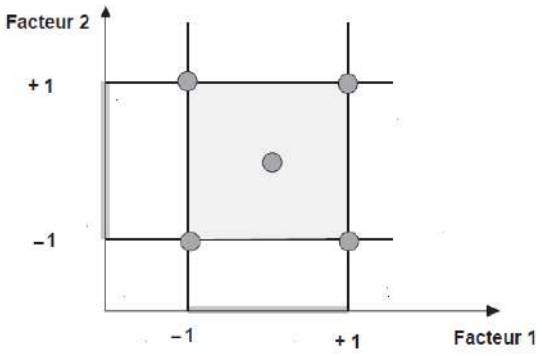


Figure 1. 35 Disposition des points expérimentaux dans un plan de 2 facteurs [159]

3.2 Modélisation de la réponse

La loi d'évolution qui relie la réponse (y) aux facteurs (x1, x2, …) est donné par la relation suivante :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots\ , x_n) \qquad \text{(Équation 1. 3)}$$

Le développement précédent est trop général, il est d'usage d'en prendre un développement limité. Les dérivées peuvent être considérées comme des constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé [159] :

$$y = a_0 + \sum a_i\, x_i + \sum a_{ij}\, x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \cdots \qquad \text{(Équation 1. 4)}$$

Où :

– y est la réponse ou la grandeur d'intérêt à laquelle s'intéresse l'expérimentateur,

– x_i est le niveau du facteur i,

– x_j est le niveau du facteur j,

– a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les *coefficients* du polynôme.

4. Conclusion

Cette étude bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives concernant les BDs et les bétons de mousse vis-à-vis leurs comportements à l'état frais et durci, les constituants utilisés, ses particularités et ses caractéristiques importantes, les domaines d'applications ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Cette partie de la revue bibliographique consiste aussi à comprendre l'influence des propriétés des granulats, y compris les granulats légers et recyclés qui constitue une étape

essentielle pour garantir les propriétés drainantes souhaitées et les exigences techniques préconisées.

De nombreuses recherches ont été menées dans le but de développé des bétons de mousse afin d'amélioré les propriétés thermiques et acoustiques. Cependant, il n'existe aucune recherche qui s'intéresse a développé des bétons de BMD.

Par conséquent, nous nous sommes intéressés à l'étude de la possibilité de formuler des BDs légers en s'appuyant sur deux techniques différentes :

La première technique consiste a évalué le comportement d'un BD à base de GBrs. En deuxième lieu, nous avons abordé les différentes propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un BD léger.

L'application des techniques des plans d'expériences nous a fourni des modèles mathématiques permettent de tracer des courbes isoréponses et donnant l'effet de chaque paramètre étudié tout en minimisant le nombre d'essais à réaliser.

Chapitre 02 : Matériaux, méthodes et formulations

Chapitre 2 : Matériaux, méthodes et formulations

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. MATERIAUX UTILISES

2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé CEM II/B-L 42,5 N, d'appellation commerciale (Matine) (cf. Figure 2.1), conforme à la norme Algérienne NA 442 [160] et Européenne EN 197-1 [10] .



Figure 2. 1 Le ciment utilisé [161]

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

Tableau 2. 1 Caractéristiques du ciment

Caractéristiques techniques		Valeurs
Propriétés chimiques	Perte au feu (%) (NA5042)	8.0 ±2
	Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
	Teneur en oxyde de magnésium 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 suivant la méthode de Blaine (cm^2/g) (NA231)	3400
	Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
	Expansion	≤ 3.0
Temps de prise à 20° (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 Granulats

2.2.1 Gravier

Pour notre étude, on a utilisé deux types de graviers 3/8, l'un est naturel et l'autre recyclé : Le granulat naturel utilisé est un gravier de classe granulaire issu de concassage des roches calcaires, provenant de la région de Djelfa. Les granulats recyclés sont obtenus par concassage des GBrs à l'aide d'un concasseur à mâchoire (cf. Figure 2.2). L'analyse granulométrique ainsi que les caractéristiques physiques des graviers utilisés sont présentées dans la figure 2.3 et le tableau 2.2 respectivement. L'analyse granulométrique montre que le gravier naturel présente une granulométrie étalée tandis que le GBr est caractérisé par une granulométrie serrée. L'analyse montre aussi que la granulométrie de GBr est inférieure à celle des granulats naturels.

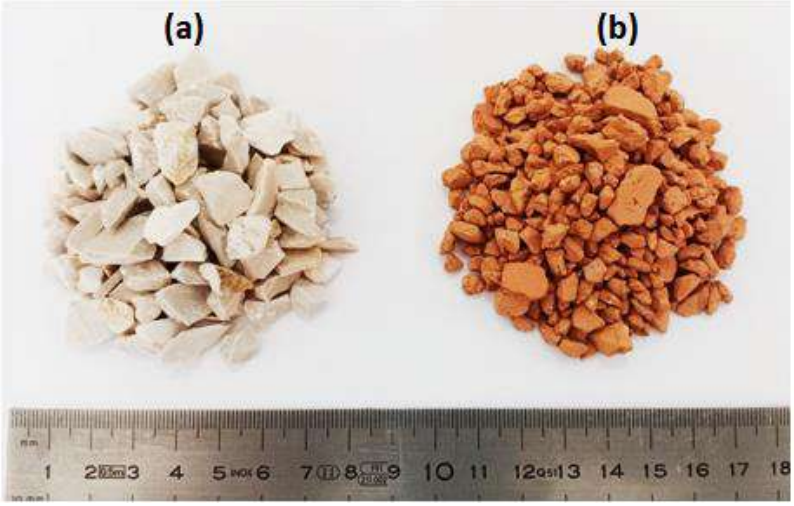


Figure 2. 2 Graviers utilisés : (a) gravier naturel (b) déchet de brique

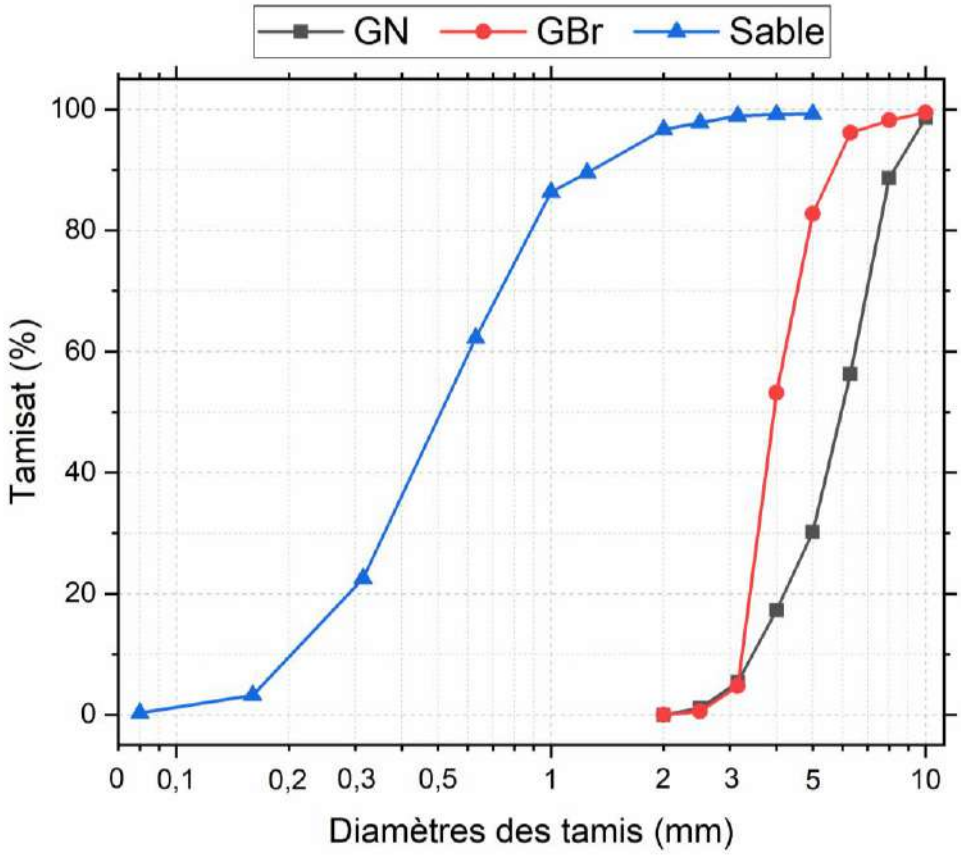


Figure 2. 3 Analyse granulométrique par tamisage des granulats utilisés

2.2.2 Sable

Le sable utilisé dans notre travail est un sable de dune provient de la région de Oued-souf (Algérie), il se caractérise par un module de finesse égale à 1.9, un équivalent de sable de 83% (très propre) et une forme arrondie (figure 2.4). Les caractéristiques physiques et la courbe de l'analyse granulométrique du sable utilisé sont données dans le tableau 2.2 et la figure 2.5 respectivement.



Figure 2. 4 Le sable utilisé

Tableau 2. 2 Caractéristiques des sables utilisés

Caractéristiques	GN	GBR	Sable
Origine	Naturel	Artificiel	Naturel
Forme	Angulaire	Angulaire	Roulée
Composition chimique	Calcaire ($CaCO_3$)	Argileux	Siliceux (S_iO_2)
Taille	3/8	3/8	0/5
Densité	2.56	2.33	2.63
Los-Angeles (LA) %	22	-	-
Absorption (%)	1	12	0.6

2.3 Superplastifiant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère acrylique, fabriqué par la société « SIKA » et commercialisé sous le nom TEMPO-10 (cf. Figure 2.6). Il peut réduire jusqu'à 30% de la quantité d'eau de gâchage (voir Annexe A).

Tableau 2. 3 Caractéristiques du TEMPO-10

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. 5 superplastifiant Sika TEMPO-10 [162]

2.4 Agent moussant

Pour cette étude, nous avons utilisé un agent moussant fabriqué par la société « TEKNACHEM » et commercialisé sous le nom « FOAMTEK » (cf. Figure 2.7). C'est un produit au pouvoir mousseux élevé, spécifiquement étudié pour produire du béton cellulaire léger (voir Annexe A). Il produit une mousse blanche, dense et crémeuse parfaitement miscible avec la plupart des liants cimentaires communs [163].

Tableau 2. 4 Caractéristiques du FOAMTEK

Aspect	Liquide
Couleur	Brun
Valeur pH	4.0 ± 1.0
Densité (g/cm³, à 15°C)	1,00 (± 0,02) g/ml



Figure 2. 6 L'agent moussant utilisé [163]

3. ESSAIS

3.1 Essais de caractérisation des matériaux'

3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage [164]

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

3.1.2 Masse volumique pilonnée ASTM C29 [165]

L'essai consiste à remplir un récipient indéformable en trois couches. Chaque couche est pilonnée en 25 coups à l'aide d'une barre métallique de 16 mm (cf. Figure 2.8). On arase le contenant après la troisième couche et on mesure la masse pilonnée. Connaissant le volume du contenant, on détermine la masse volumique pilonnée des granulats. Cet essai a pour but de déterminer la compacité granulaire et le volume de vides intergranulaire [165], [4].



Figure 2. 7 Appareillage utilisé pour déterminer la masse volumique pilonnée

3.1.3 Masse volumique apparente

Le principe de cet essai est de mesurer la masse d'un échantillon de gravier dont on connait le volume V du récipient utilisé, La masse volumique dans ce cas est égale à la masse mesurée M sur le volume V (cf. Équation2.1)

$$MVa = \frac{M}{V} \qquad \text{(Équation 2. 1)}$$

3.1.4 Masse volumique absolue

Cette méthode consiste à déterminer la masse volumique absolue d'un échantillon, deux méthodes sont couramment utilisées pour caractériser la masse volumique absolue

a) Méthode de l'éprouvette graduée

La méthode de l'éprouvette graduée est la plus utilisée pour déterminer la masse volumique absolue M_{Vabs} des gros granulats comme suit :

$$M_{Vabs} = \frac{M}{V_1 - V_2} \qquad \text{(Équation 2. 2)}$$

Avec :

V1, V2 : Volume d'eau initial et final mesuré dans l'éprouvette

M : La masse de l'échantillon

b) Méthode du pycnomètre selon NFP 18-554 [166]

La masse volumique absolue déterminée par la méthode du pycnomètre est défini comme suit :

$$M_{Vabs} = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3}\rho_{eau} \qquad \text{(Équation 2. 3)}$$

Où :

M_1 : masse de pycnomètre vide.

M_2 : masse d'échantillon et le pycnomètre.

M_3 : masse d'échantillon et le pycnomètre rempli d'eau.

M_4 : masse de pycnomètre rempli d'eau.

3.1.5 Coefficient de Los Angeles (EN 1097-2) [167]

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.

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

$$L_A = \frac{m}{M}100 \qquad \text{(Equation 2. 4)}$$

3.1.6 Essai d'équivalent de sable selon NF P 18-598 [168]

Cet essai permet de mesurer la fraction argileuse du sable conformément à la norme EN 933-8. Il consiste à agiter une quantité de sable bien définie dans une solution lavante dans un récipient tubulaire gradué, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes. L'équivalent de sable Es est donné par la relation suivante :

$$E_s = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \qquad \text{(Équation 2. 5)}$$

Avec :

H1 : La hauteur des grains solides sableux.

H2 : La hauteur des grains solides sableux + les impuretés argileuses.

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible. Lorsque ESV ≥ 85 le sable est très propre.

3.2 Essais à l'état frais

3.2.1 Essai au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai simple qui permet de contrôler l'ouvrabilité du béton frais. L'essai consiste à remplir en 3 fois un moule de forme tronconique de 10 et 20 cm de diamètres intérieurs sur une hauteur de 30 cm, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide d'une tige métallique (cf. Figure 2.9). L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage. Le béton est classé en fonction de sa consistance selon la norme NF EN 206-1 [169].

Tableau 2. 5 Classes d'affaissement selon la norme NF EN 206-1 [169]

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



Figure 2. 8 L'essai de cône d'Abrams

3.2.2 Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une plaque métallique horizontale, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue (cf. Figure 2.10).



Figure 2. 9 Essai de Mini cône

3.2.3 Densité à l'état frais :

Le but de cet essai est d'évaluer la densité à l'état frais et durci des bétons étudiés (cf. Figure 2.11). La densité du béton frais D_{frais} est déterminée selon la formule suivante :

$$D_{frais} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \rho_{eau} \qquad \text{(Équation 2. 5)}$$

Avec :

M1 : La masse du récipient

M2 : La masse de béton contenu dans le récipient + la masse du récipient

V : Volume du récipient



Figure 2. 10 La densité a l'état frais

3.3 Essais sur le béton à l'état durcis :

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) (cf. Figure 2.12).

$$D_{sèche} = \frac{M}{V}\rho_{eau} \qquad \text{(Équation 2. 6)}$$



Figure 2. 11 Densité à l'état durci

3.3.2 Résistance à la compression

L'essai de la résistance a la compression a été effectué sur au moyen d'une presse hydraulique sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de diamètre et 20 cm de hauteur pour les bétons drainant à base de GBrs et des éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur pour les BMDs selon la norme selon la norme ASTM C 39 [170] . Pour toutes les formulations de bétons étudiées, les résistances à la compression à 7, 14 et 28 jours sont évaluées. (cf. Figure 2.13).



Figure 2. 12 Essais de résistance à la compression

3.3.3 Essai de traction (Essai brésilien) (NF P94-422) [171]

Nous avons effectué les essais de traction par fendage sur les mêmes types d'éprouvettes destinées aux essais de résistances à la compression mentionnés précédemment (cf. Figure 2.14). La norme ASTM C496 décrit les procédures de réalisation de cet essai [171].

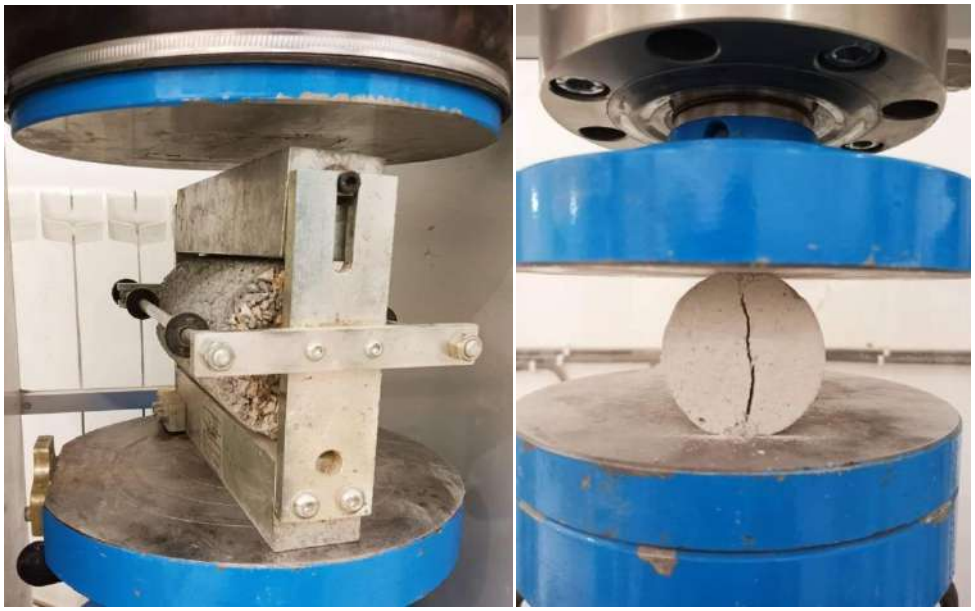


Figure 2. 13 Résistance à la traction par fendage

3.3.4 Auscultation dynamique (NF EN 12504-4) [172]

Cet essai a pour objectif de déterminer la vitesse de propagation des ondes ultrasonique (VOU) à travers le béton étudié. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps de déplacement d'une impulsion ultrasonique généré par un appareil à ultrason. La mesure a été effectuée dans la direction longitudinale des échantillons (cf. Figure 2.15). Il est recommandé d'employer une couche épaisse de gel entre les deux sondes et l'éprouvette.



Figure 2. 14 Essai d'auscultation dynamique.

3.3.5 Essai de perméabilité (ASTM D 5084) [173]

La perméabilité des bétons étudiés est mesurée à l'aide d'un perméamètre à charge variable développé au niveau de laboratoire selon la norme ASTM D 5084 [173] (cf. Figure 2.16). Les mesures de la perméabilité hydraulique ont été réalisées sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm. Ces mesures ont été répétées trois fois afin de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus. Le coefficient de perméabilité hydraulique k (mm/sec) est donnée par l'équation suivante :

$$k = \frac{aL}{At} ln \frac{h_0}{h_1} \qquad \text{(Équation 2. 7)}$$

Où

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

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

À : La section de l'éprouvette (cm^2);

h_0 = Le niveaux d'eau initiale (mm);

h_1 = Le niveaux d'eau finale (mm) ;

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



Figure 2. 15 L'essai de perméabilité à charge variable

3.3.6 Essai de conductivité thermique NF EN 993-15 [174]

La mesure de la conductivité thermique a été effectuée selon la méthode du fil chaud conformément à la norme (NF EN 993-15) [174]. L'appareil utilisé pour la mesure est appelé « CT mètre ». Cet essai nous permet d'estimer la conductivité thermique du béton étudié à partir de l'évolution de la température mesurée à l'aide d'une sonde placée entre deux échantillons superposés (cf. Figure 2.17).

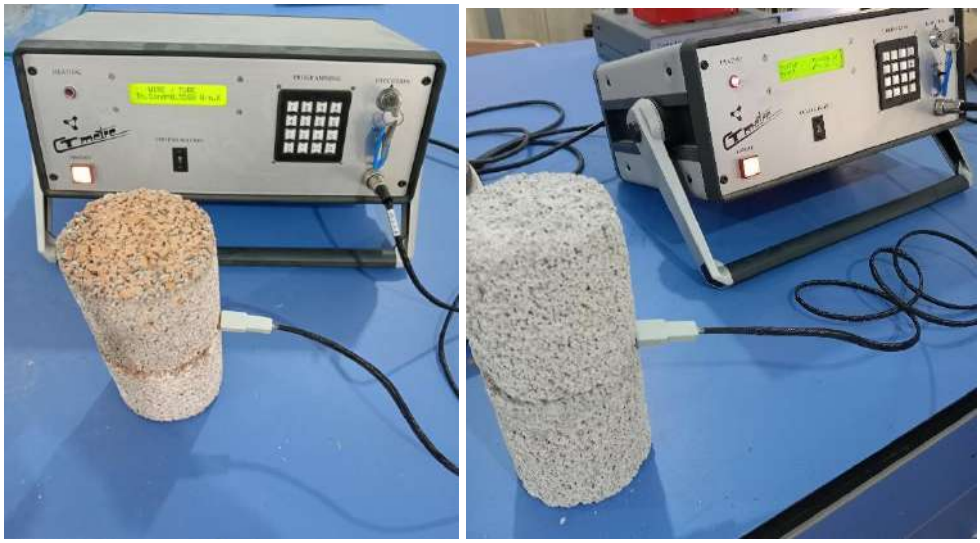


Figure 2. 16 Essai de conductivité thermique

3.3.7 Essai d'abrasion NLT-352/86 [71]

La mesure de la résistance à l'abrasion des bétons étudiés a été effectuée selon l'essai « Cantabro ». Cet essai permet de déterminer la perte de masse d'une éprouvette cylindrique de diamètre et hauteur similaire (D=H=100 mm) (cf. Figure 2.18). Les éprouvettes étudiées sont misent en rotation dans un tambour Los Angeles pendant 300 tours pour les BDs à base de GBrs et 50 tours pour les BMDs en raison de sa faible dureté.



Figure 2. 17 Mesure de la résistance à l'abrasion

3.3.8 Mesure de retrait et gonflement (NF P 18-427) [175]

Le phénomène de retrait et du gonflement sont mesurés conformément à la norme NF P 18-427 [175]. L'essai consiste à mesurer la variation de la longueur d'une éprouvette prismatique de dimensions 7x7x28cm munies de plots métalliques (cf. Figure 2.19). La mesure se fait à l'aide d'un comparateur linéaire. Les éprouvettes de retrait sont conservées à l'air libre tandis que les éprouvettes de gonflement sont entièrement immergées dans l'eau pendant toute la durée de l'essai.



Figure 2. 18 Mesure du retrait et gonflement.

4. METHODES DE FORMULATION

4.1 Formulation du béton drainant à base de déchets de brique

La formulation que nous avons adoptée pour la première phase d'étude est basée sur les recommandations proposées par le comité 522 de l'Institut Américain du Béton (ACI) [176]. Cette approche de formulation est basée sur la masse volumique pilonnée à sec des granulats, déterminée selon la méthode ASTM C29 [177], [4] (voir Chapitre 2, § 2.3.1.2).

Nous cherchons en premier lieu à établir un volume de pâte minimal et nécessaire pour assurer la liaison des granulats et une ouvrabilité satisfaisante, tout en gardant un volume des vides suffisant pour offrir une meilleure perméabilité.

Pour estimer le volume de pâte en se basant sur l'abaque présenté dans la Figure 2.20 qui donne la relation entre le volume de pâte et le volume de vide correspondant en cas d'utilisation des granulats de class N° 8 (correspond à la classe granulaire 3/8) [178].

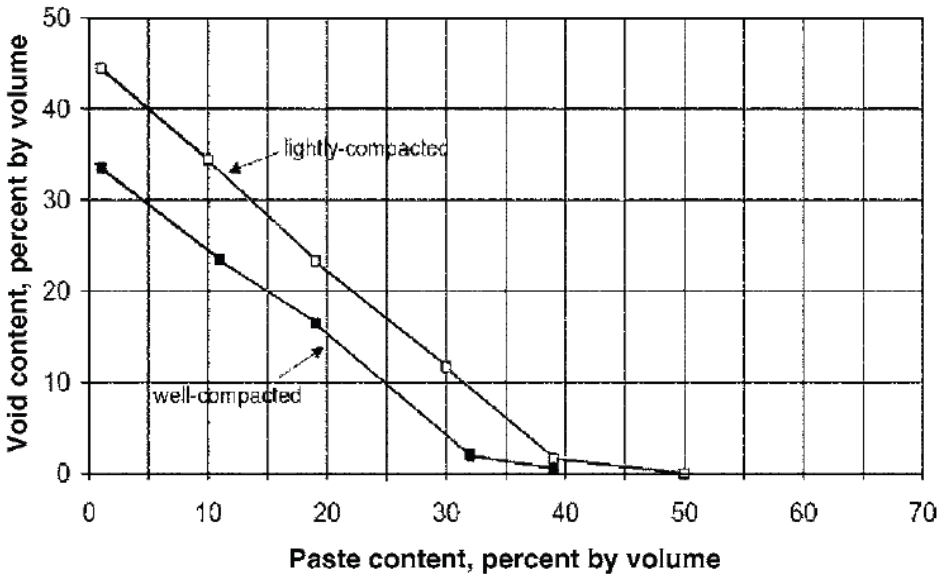


Figure 2. 19 Relation entre le volume de pâte et le volume de vide « Granulats de classe N° 8 » [176]

Dans notre cas nous avons choisi un volume de pâte égale à 18%, ce qui correspond à un volume de vides de l'ordre de 23% (le compactage est assuré par une vibration légère). Une fois que le volume de pâte est déterminé (le rapport E/C est maintenu initialement égale à 0,3), le dosage en ciment (C) doit être déterminé à partir de la relation suivante :

$$C = \frac{Vp}{\rho_c + E/C} \qquad \text{(Équation 2. 8)}$$

La quantité du gravier nécessaire (G) est obtenue à partir de la masse volumique pilonnée selon les exigences de la norme ASTM C29 [177] .

Les GBrs ont été introduits en substitution volumique des granulats naturels avec des taux de substitution de 0 à 100%. Il convient aussi de noter que les mélanges étudiés ont été fabriqués à ouvrabilité constante pour faciliter la comparaison entre eux [56]. Cela nous amène à augmenter le dosage en SP de 1.2 à 1.7 %.

Le tableau 2.6 résume le calcul des proportions de chaque constituant pour tous les mélanges de la première phase de cette étude.

- Le rapport E/C est maintenu constant (E/C=0.2) en présence de superplastifiant
- Le dosage en Sp est pris 1.2 % du poids de ciment pour le mélange témoin
- Le rapport Gravier/Ciment est de l'ordre de 6.

Tableau 2. 6 Composition des différents BDs étudiés dans un 1 m^3

Mélange	Gravier 3/8 (kg/m^3)	Brique (kg/m^3)	Ciment (kg/m^3)	E/C	Sp (%)
BT	1500	0	300	0.2	1.2
BD25	1125	341.3			1.4
BD50	750	682.6			1.6
BD75	375	1023.9			1.7
BD100	0	1365.2			1.7

Nomenclature utilisée :

BT : Béton témoin avec 100% de GN

B25 : Béton drainé avec 25 % de granulats de brique cuite

B50 : Béton drainé avec 50 % de granulats de brique cuite

B75 : Béton drainé avec 75 % de granulats de brique cuite

B100 : Béton drainé avec 100 % de granulats de brique cuite

4.2 Formulation du béton de mousse

Afin de comprendre le rôle joué par les différents paramètres de formulation, il est nécessaire d'adopter une démarche expérimentale capable de prendre en considération l'effet de chaque paramètre sur les propriétés étudiées, tout en effectuant un nombre minimal d'essais au niveau de laboratoire. L'une des méthodes les plus connues est la méthode de plan d'expérience, elle permet de déterminer un nombre limité d'essais dont la réalisation permet de bien comprendre l'influence des paramètres étudiés [158].

La méthode des plans d'expériences s'est avérée très utile dans notre cas, où nous avons utilisé un plan factoriel complet de 2 facteurs : dosage en ciment et rapport eau/ciment (E/C). L'application de ce plan a nécessité la détermination d'un domaine expérimental, en définissant les niveaux hauts et bas de chaque facteur. Comme il y a deux facteurs à étudier, le plus simple est de choisir un plan factoriel complet de 6 compositions.

Il est à noter que le volume de la mousse ajoutée est complémentaire au volume du mortier jusqu'à l'obtention du volume souhaité. La mousse est tout d'abord fabriquée puis ajoutée au mélange « ciment+eau » qui a été préparé en parallèle.

Le domaine d'étude, qui est constitué de 02 facteurs définis par leurs niveaux bas et hauts, est décrit dans le tableau suivant :

Tableau 2. 7 Facteurs choisis et les niveaux correspondants

Facteurs	Niveaux bas	Niveau (0)	Niveaux hauts
Dosage en ciment (kg/m^3)	300	500	700
E/C	0.5	-	0.6

L'utilisation des logiciels statistiques rend la réalisation des plans d'expériences une tache simple. Ces logiciels favorisent les représentations graphiques qui illustrent de manière claire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes étudiés [157].

Dans notre cas d'étude, la construction des plans d'expérience est effectuée à l'aide du logiciel statistique JMP7 (cf. Figure 2.21) [179].

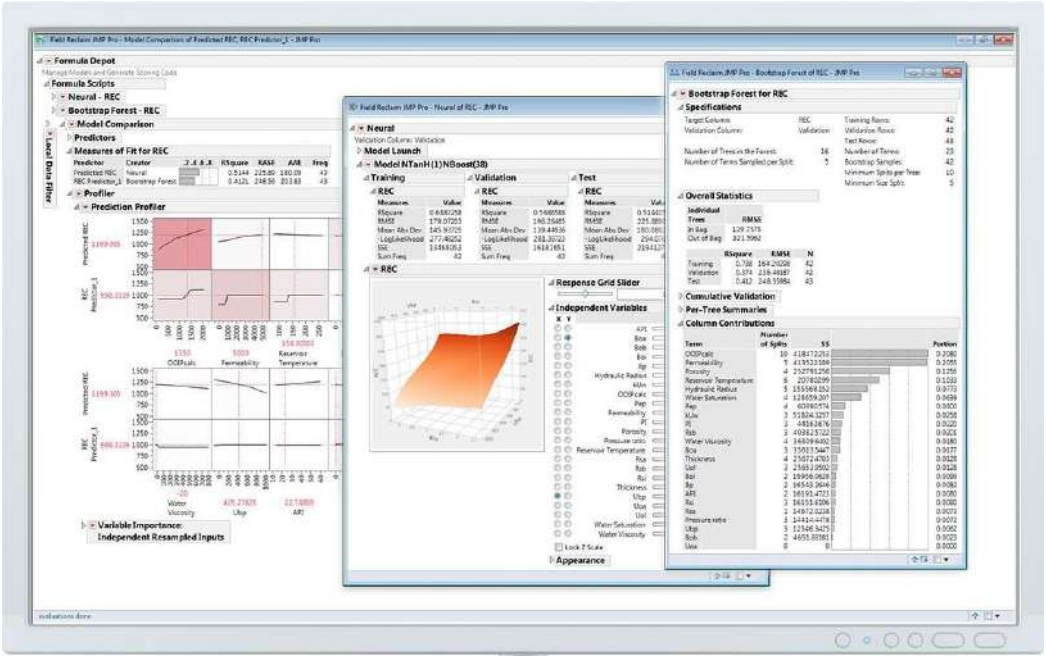


Figure 2. 20 Logiciel de modélisation statistique JMP [179]

Les compositions des points factoriels du plan d'expérience choisie sont récapitulées dans le tableau 2.8.

Tableau 2. 8 Compositions du plan d'expérience choisi

Mélanges	Dosage en ciment (Kg/m^3)	E/C
01	300	0,5
02		0,6
03	500	0,5
04		0,6
05	700	0,5
06		0,6

5. PROCEDURE DE MALAXAGE

Les BDs à base de GBrs ont été confectionnés dans un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 150 litres (cf. Figure 2.22). La séquence de malaxage doit être adaptée de façon à ce que le béton aura un aspect parfaitement homogène.



Figure 2. 21 Malaxeur à axe vertical

La procédure de malaxage est la suivante :

- Les granulats utilisés et le ciment sont mélangés en premier pendant une minute pour homogénéiser le mélange ;
- Malaxage pendant une minute avec 70% de la quantité d'eau.
- Malaxage pendant une minute avec le restant de l'eau mélangé avec le superplastifiant.
- Pause de 02 minutes pendant laquelle on enlève le béton adhérent aux parois et au fond du malaxeur.
- Reprendre ensuite le malaxage pendant 02 minutes.

Le BMD est préparé dans un récipient d'une capacité de 20 L. Nous préparons en premier lieu le coulis de ciment en mélangeant du l'eau et du ciment à l'aide d'un mélangeur hélicoïdal jusqu'à la dispersion complète des grains du ciment. À l'aide d'un générateur de mousse, la mousse est préparée avec un dosage d'agent moussant et une quantité d'eau nécessaire, puis injectée directement dans le récipient où se trouve le coulis de ciment (cf. Figure 2.23).

Il convient de noter que la densité de mousse générée dépend de l'équipement utilisé, la densité de mousse utilisée pour notre cas d'étude est de l'ordre de 14 à 15kg/m^3. Nous avons tenu à garder le même mode de malaxage pour les différentes formulations.



Figure 2. 22 Procédure de malaxage du béton de mousse

L'introduction de la mousse au mélange présente le problème de l'éclatement des bulles d'air qui est influencé par l'énergie de malaxage. L'éclatement des bulles d'air nécessite alors un temps et une vitesse de malaxage minimale [180].

6. CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les résultats des différents essais de caractérisation des matériaux utilisés ainsi que les essais effectués à l'état frais et durci des bétons étudiés conformément aux normes en vigueur. Nous avons exposé par la suite les méthodes de formulation, les techniques et les procédures expérimentales adoptées pour cette étude.

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif de présenter et analyser les résultats des différents essais effectués sur les bétons étudiés. On présente en première partie les résultats des essais effectués sur les BDs à base de GBr. La deuxième partie a pour objectifs de mettre en évidence la possibilité de formuler des BMDs tout en faisant varier le rapport E/C et le dosage en ciment en se basant sur les techniques des plans d'expériences.

2. BETON DRAINANT A BASE DE DECHETS DE BRIQUE

Cette partie d'étude consiste à utiliser les granulats de brique recyclés comme remplacement des granulats naturels.

- Les essais choisis pour notre étude sont :
- Ouvrabilité (Affaissement au cône d'Abrams) ;
- Densité à l'état
- Densité à l'état frais et durci ;
- Les résistances à la compression et à la traction ;
- Porosité ouverte ;
- Perméabilité hydraulique ;
- Conductivité thermique (CT);
- Auscultation dynamique (AD) ;
- Résistance à l'abrasion ;
- Retrait et gonflement ;
- 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	Rc 7j (MPa)	Rc 14j (MPa)	Rc 28j (MPa)	Rt 7j (MPa)	Rt 14j (MPa)	Rt 28j (MPa)
BT	18	1,71	8,89	14,70	18,03	1,13	2,15	3,15
BD25	17	1,60	7,16	11,16	14,08	0,70	1,25	2,04
BD50	18,5	1,44	6,56	10,65	12,73	0,41	0,82	1,36
BD75	19	1,36	5,23	8,80	10,25	0,36	0,84	1,45
BD100	18	1,28	4,58	7,93	9,57	0,33	0,84	1,32

Aff : Affaissement

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	1,70	23,70	15,17	0,64	3711	49,67
BD25	1,52	23,83	14,53	0,47	3027	42,41
BD50	1,38	25,33	14,38	0,43	2907	31,95
BD75	1,27	26,02	13,08	0,41	2707	29,21
BD100	1,17	27,72	12,57	0,33	2538	25,99

K : Coefficient de perméabilité hydraulique
CT : Conductivité thermique
AD : Auscultation dynamique

2.1 Affaissement au cône d'Abrams

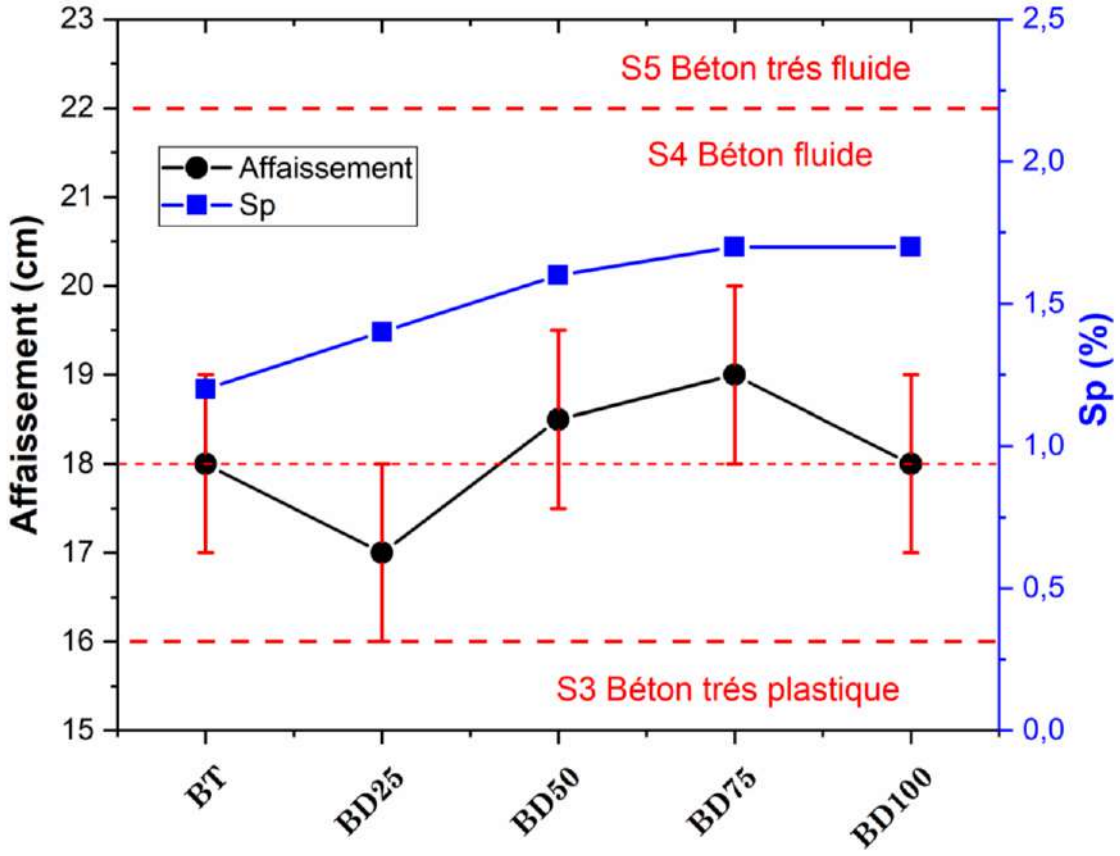


Figure 3. 1 Affaissement en fonction de la teneur en GBr

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]. Il convient de noter que les bétons ont été fabriqués à ouvrabilité entre 16 et 22 cm conformément à la classe S4 (béton de consistance fluide) afin de faciliter la comparaison entre les mélanges étudiés [56]. Cela nous amène à augmenter le dosage en SP pour maintenir un affaissement proche de mélange témoin. Le dosage en superplastifiant a été varié de 1.2 à 1.7% de poids du ciment.

D'après la figure 3.1, il semble clair que les mélanges qui contiennent des proportions plus importantes de GBr ont besoin des pourcentages supplémentaires de superplastifiant afin d'obtenir un affaissement similaire au mélange témoin. Le remplacement des granulats naturel par des GBrs concassé conduit à une diminution de l'ouvrabilité. Cette perte d'ouvrabilité est attribuée à la forme angulaire des GBrs ainsi que leur coefficient d'absorption élevée [44].

2.2 Densité a l'état frais et durci

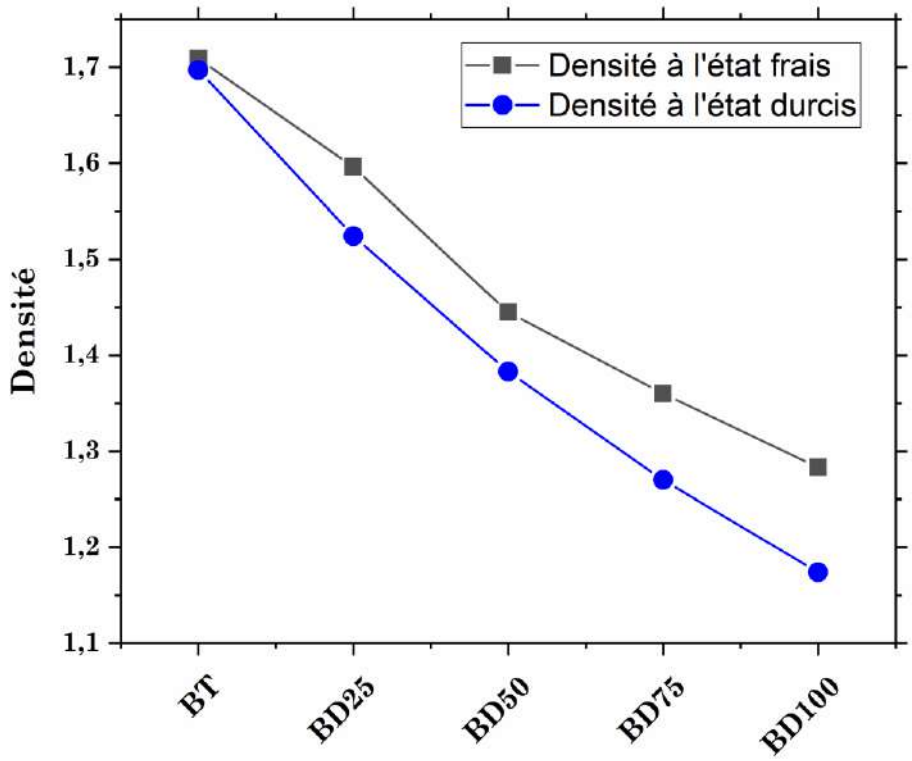


Figure 3. 2 Évolutions de la densité en fonction de la teneur en GBr

L'évolution de la densité à l'état frais et durci pour différents bétons fabriqué à base de GBr est présentée dans la figure 3.2. On observe que la densité du béton diminue de l'ordre de 35% par substitution successive des granulats naturels par les GBr. Les valeurs de la densité des bétons étudiés sont comprises entre 1.1 et 1.7, mène à les considérés comme des bétons légers selon les spécifications définies dans la norme NF EN 206 [182] (masse volumique comprise entre 800 et 2 000 kg/m^3).

En comparaison avec un GN, les GBrs ont généralement une densité plus faible que les GN en raison de sa nature poreuse. Des résultats similaires ont été rapportés par [183]–[185] où ils ont trouvé une baisse de la densité de l'ordre de 6 à 10% [186]. Il convient de noter que la granulométrie affecte également la densité du béton [187]. On remarque aussi que la différence entre la densité à l'état frais et durci sera plus importante avec des teneurs élevées en GBr. Cela peut s'exprimer par le coefficient d'absorption important de GBr (12%) tandis que les GN se caractérisent par une faible absorption (1%).

2.3 Les résistances à la compression et à la traction

Les figures 3.3 et 3.4 montrent la variation de la résistance à la compression et à la traction de tous les mélanges à l'âge de 7,14 et 28 jours. Le BD se caractérise généralement par un faible comportement mécanique en raison de l'absence des particules fines ce qui introduisent un volume des vides élevé.

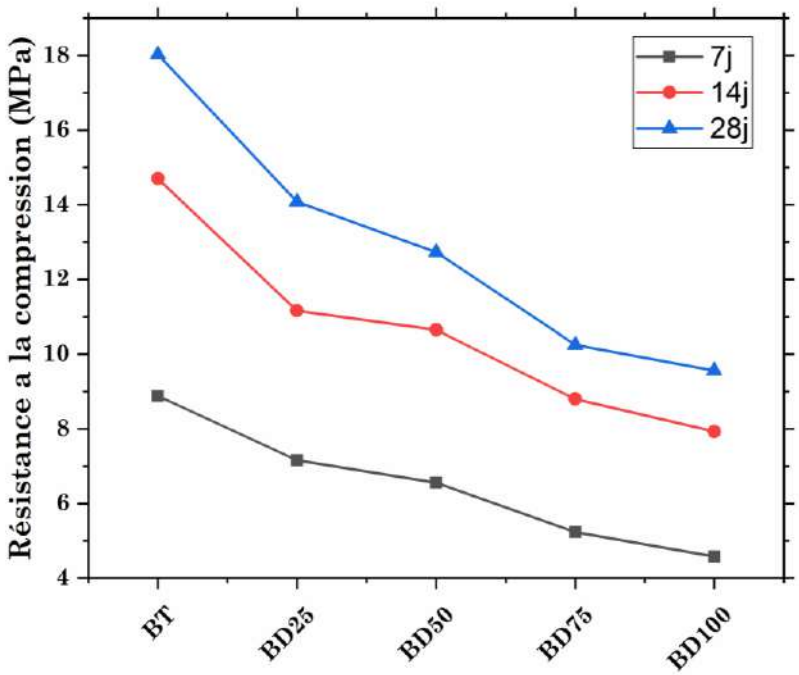


Figure 3. 3 Évolutions de la résistance à la compression en fonction de la teneur en GBr

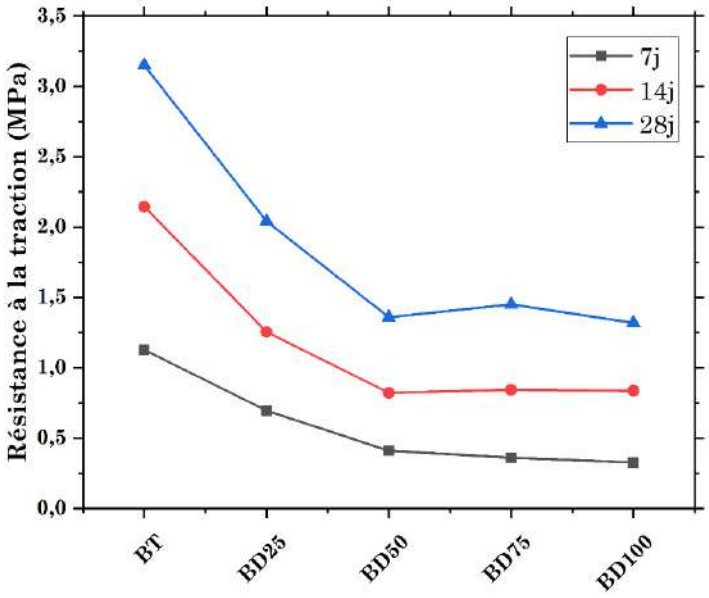


Figure 3. 4 Évolutions de la résistance à la traction en fonction de la teneur en GBr

D'après la figure 3.3, il est remarquable que l'augmentation du taux de substitution des GN par les GBrs donne des résistances à la compression faibles. Le taux de diminution de la résistance à la compression à 28 jours est de l'ordre 88% pour les BDs avec 100% de GBr. La porosité élevée et la qualité inférieure des GBr par rapport au granulats naturels rendent le mélange très faible et ne peut pas supporter des charges supplémentaires [188]. Debnath et al [189] ont montré que la résistance a la compression des BDs à base des GBrs est comparativement inférieur a celle des bétons à base de GN en raison de la qualité inférieure des GBrs.

Les résultats des résistances à la traction par fendage pour tous les mélanges sont présentés dans la figure 3.4. On observe que l'introduction de GBr conduit à une diminution de la résistance à la traction pour des teneurs en GBr de 0 à 50%, au dela de cette proportion, on observe une stabilité de la résistance à la traction (de l'ordre de 1.4 Mpa à 28 jours). Ceci peut être attribué à l'effet de l'angularité et l'enchevêtrement des granulats de GBr qui sera plus important pour des teneurs élevées en GBr.

La résistance à la traction du BD se situe entre 1,0 à 3,4 MPa alors que la résistance à la traction des bétons conventionnels varie généralement de 2,4 à 4,1 MPa [190]

2.4 Porosité connectée

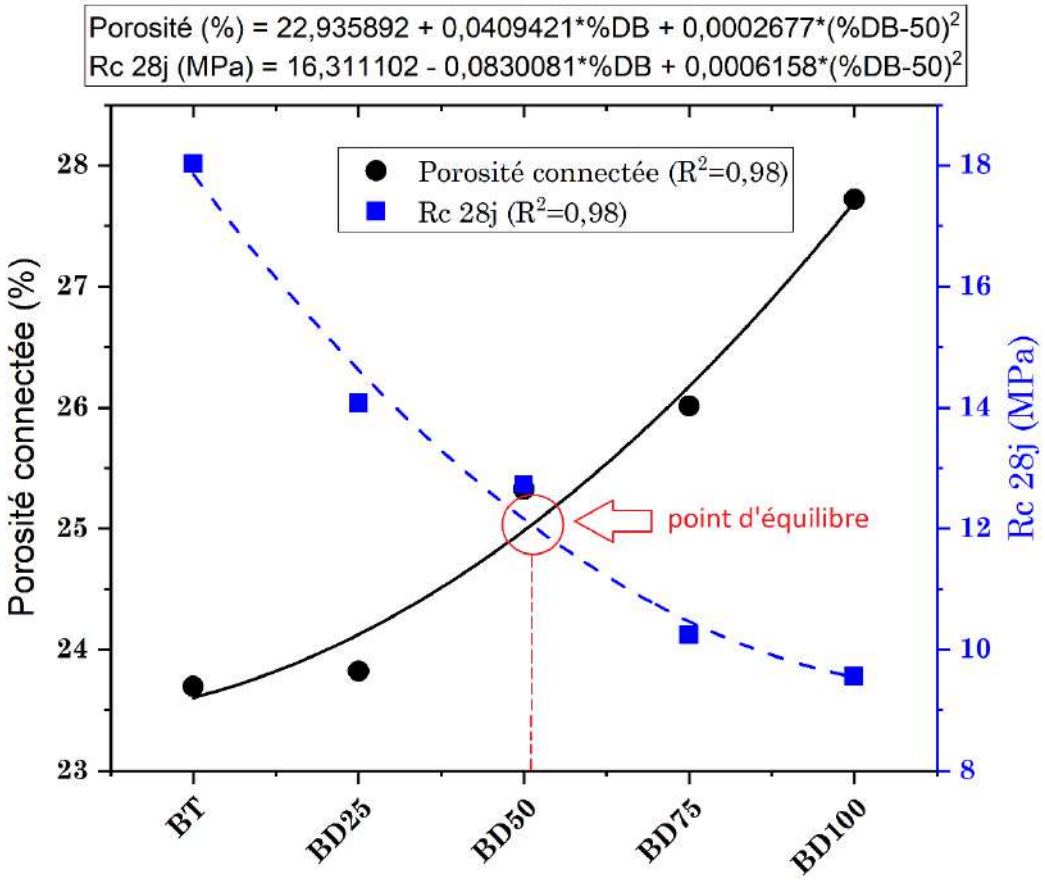


Figure 3. 5 Évolutions de la porosité connectée et Rc 28j en fonction de la teneur en GBr

L'influence de substitution de GN avec différents pourcentages de GBr sur la porosité connectée et Rc28 j est présentée dans la figure 3.5. On observe que les mélanges contenant des teneurs élevées en GBr se caractérisent par une porosité élevée et une faible résistance par rapport aux autres combinaisons. Un point d'équilibre entre la porosité et la résistance a été observé pour un taux de substitution de 50% des GN par les GBrs. Une augmentation de la porosité ouverte de 17% a été enregistrée avec un remplacement total des GN par GBr.

Concernant les faibles teneurs en GBr, nous ne constatons pas une augmentation remarquable de la porosité, les granulats de GBr dans ce cas commencent à occuper l'espace entre les GN en raison de sa petite taille granulaire. Pour des teneurs élevées en GBr, les vides entre les GN sont complètement remplis et les granulats GBrs commencent à occuper la place des GN, ce qui induit une porosité intergranulaire supplémentaire et par conséquent la porosité connectée augmente.

2.5 Conductivité hydraulique

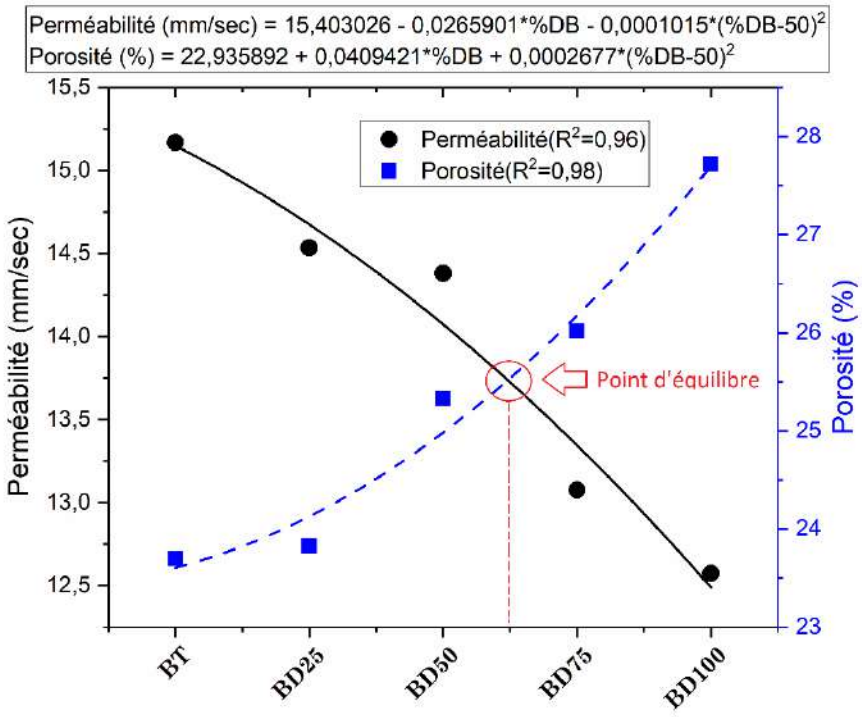


Figure 3. 6 La perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de la teneur en GBr

La figure 3.6 représente la variation de la perméabilité hydraulique et la porosité en fonction de l'augmentation des proportions de GBr. On constate que l'augmentation du GBr diminue les valeurs du coefficient de perméabilité tandis que la porosité effective augmente.

On observe aussi que le BD avec un taux de substitution de l'ordre de 60% des GN par les GBrs permet d'atteindre à la fois une bonne perméabilité et une porosité effective acceptable.

Le taux de diminution de la perméabilité était de l'ordre de 20% pour une substitution de 100% des GN par les GBrs. Il convient de noter que la valeur minimale de la perméabilité pour qu'un béton puisse être considéré comme drainant est de l'ordre de 1 mm/sec [59]. La perméabilité des bétons étudiés est comprise entre 12 et 15 mm/sec. Cette perméabilité est considérée largement suffisante par rapport à la limite inférieure préconisée.

Cela est dû au fait que les GBrs occupent l'espace entre les GN « en raison de ces petites tailles granulaire », ce qui améliore l'empilement des granulats et par conséquent conductivité hydraulique diminue.

2.6 Conductivité thermique

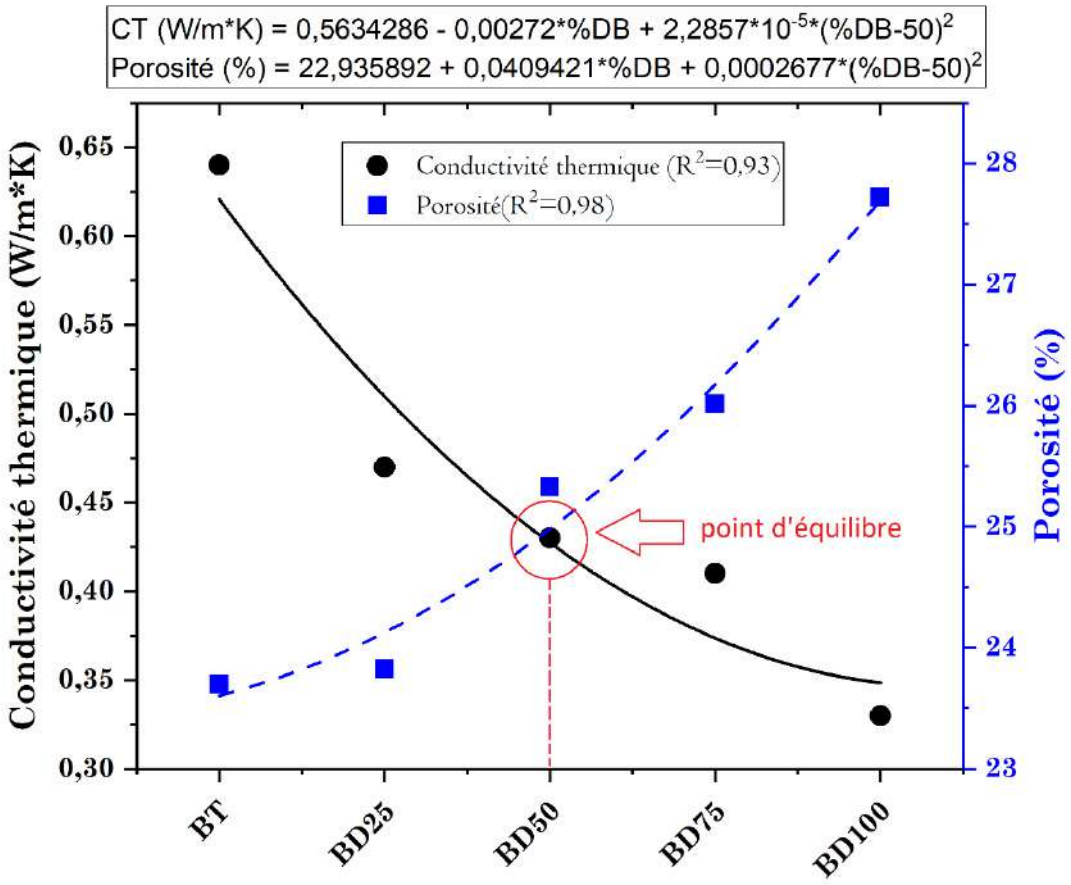


Figure 3. 7 Evolution de la conductivité thermique et la porosité en fonction de la teneur en GBr

La figure 3.7 illustre l'évolution de la conductivité thermique et la porosité effective en fonction de l'augmentation du taux de substitution des GN par GBr. L'augmentation des proportions des GBrs entraîne une diminution de la conductivité thermique et une augmentation de la porosité des BDs étudiés. La conductivité thermique est diminuée de plus de 90% (d'environ 2 fois) pour une substitution complète des GN par des GB. Les résultats montrent aussi qu'il existe un point d'équilibre entre la conductivité thermique et la porosité effective pour une substitution de 50% des GN par les GBrs.

Les bétons légers se caractérisent généralement par des valeurs de conductivité thermique entre 0.4 et 1 W/m·K à l'état sec [192]. Les valeurs de la conductivité thermique des bétons formulés s'inscrivent dans l'intervalle 0.3 à 0.65 W/m·K ce qui présente une bonne performance d'isolation thermique.

La conductivité thermique des briques est liée principalement à leur densité apparente, de sorte que l'augmentation des propriétés thermique implique l'utilisation des matériaux avec une porosité plus élevée qui donne une faible densité. L'efficacité d'un matériau céramique dépend essentiellement de sa structure cristalline et de la composition chimique de ses constituants essentiels ainsi que la quantité des minéraux accessoires présents [193].

2.7 Auscultation dynamique

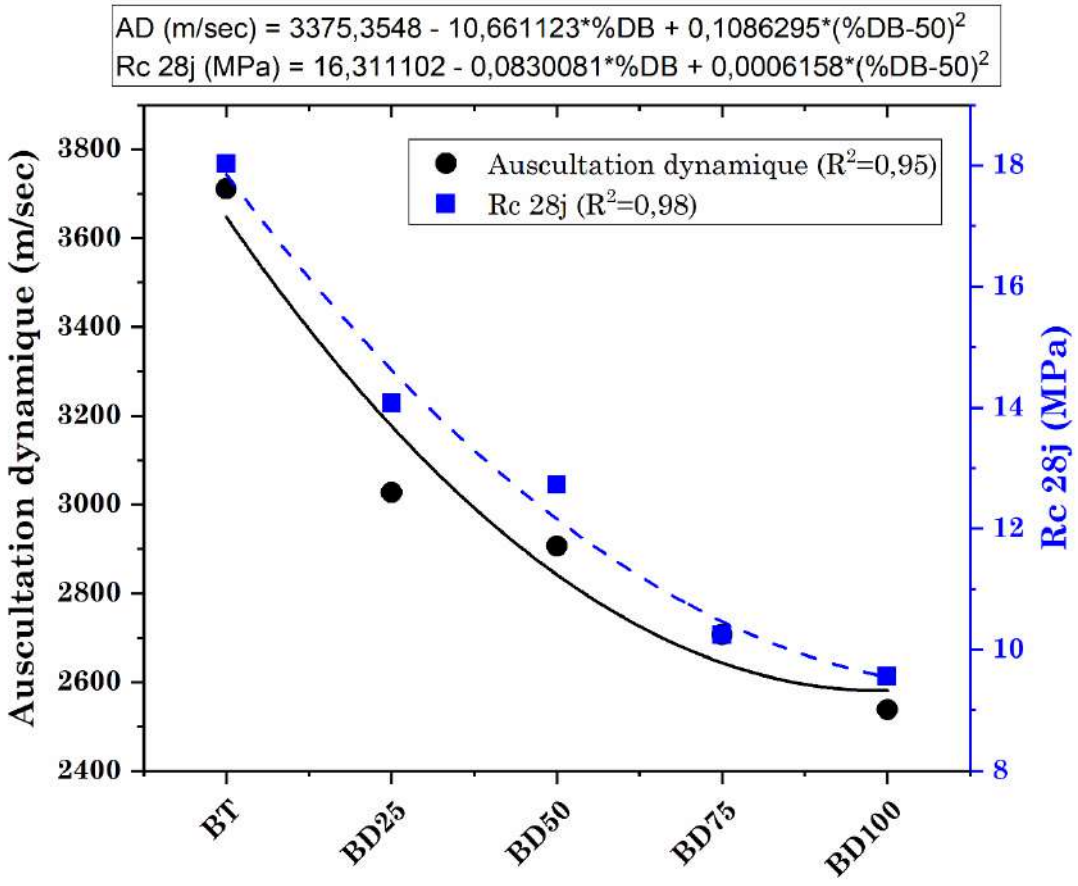


Figure 3. 8 Auscultation dynamique et Rc28j en fonction de la teneur en GBr

L'évolutions de l'auscultation dynamique et la résistance a la compression à 28 jours sont représentées dans la figure 3.8. Les résultats obtenus montrent que l'introduction de GBr conduit à une diminution de la vitesse des ondes ultrasoniques et de la résistance à la compression en parallèle. La vitesse des ondes ultrasoniques diminue de 22 et 46% respectivement pour un taux de substitution de 25 et 100%.

Ceci peut s'expliquer par la porosité élevée des GBrs, ce qui rend la matrice plus poreuse et réduit par conséquent la vitesse des ondes ultrasoniques [186]. Cela est conforme aux résultats obtenus par d'autres chercheurs [184], [194], [196]. De plus, des fissures peuvent apparaître pendant le processus de concassage de brique, ce qui reflète directement sur la porosité globale du béton et réduit par conséquent la vitesse de propagation [197].

2.8 Retrait et gonflement

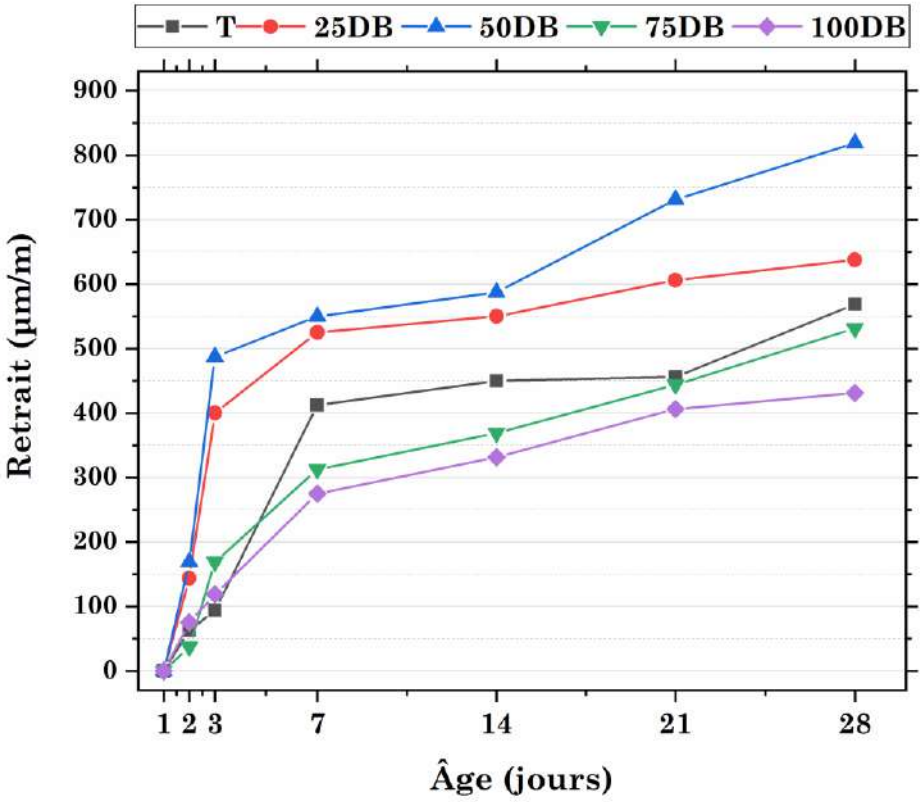


Figure 3. 9 Évolutions du retrait en fonction de la teneur en GBr

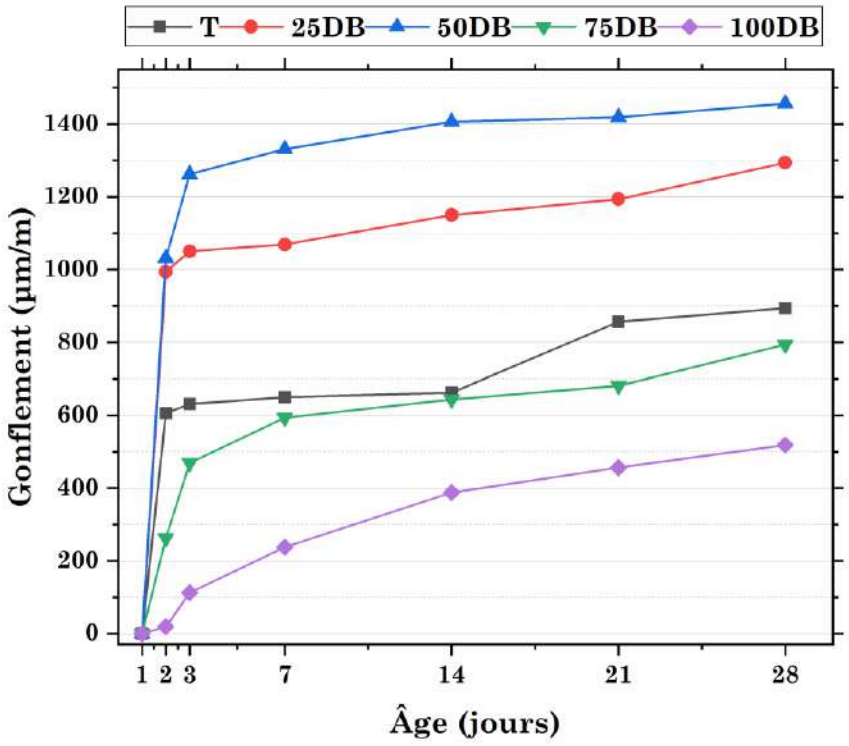


Figure 3. 10 Évolutions du gonflement en fonction de la teneur en GBr

La figure 3.9 et 3.10 présente les résultats de retrait des bétons confectionnés. Pour des teneurs élevées en GBr, on observe que le retrait et le gonflement se caractérise par des valeurs faibles par rapport aux autres mélanges. Cela peut être dû au fait que les granulats de GBr ont absorbé une certaine quantité d'eau en raison de sa grande capacité d'absorption (12%), les GBr ont libéré ensuite cette quantité d'eau au moment de la prise. Cette quantité d'eau a compensé l'évaporation de l'eau du béton et par conséquent, le retrait du béton diminue [198]. Kevern [199] a constaté aussi que les mélanges contenant des granulats légers possèdent un retrait moins que celle contenant des granulats naturels.

Dû aux faibles rapports E/C utilisé dans la plupart des formulations des BDs, le phénomène de séchage sera très rapide. De plus, la forte porosité effective occasionne une perte rapide de l'eau pendant la cure. En dépit de ce phénomène, les BDs présentent un retrait moins que les bétons conventionnels [200], [201]. Le retrait est influencé directement par le rapport granulat/ciment (G/C) ainsi que la quantité de pâte utilisée [4]. Malhotra [86] a montré aussi que les BDs ont un retrait deux fois inférieur à celui des bétons ordinaires.

2.9 Résistance à l'abrasion

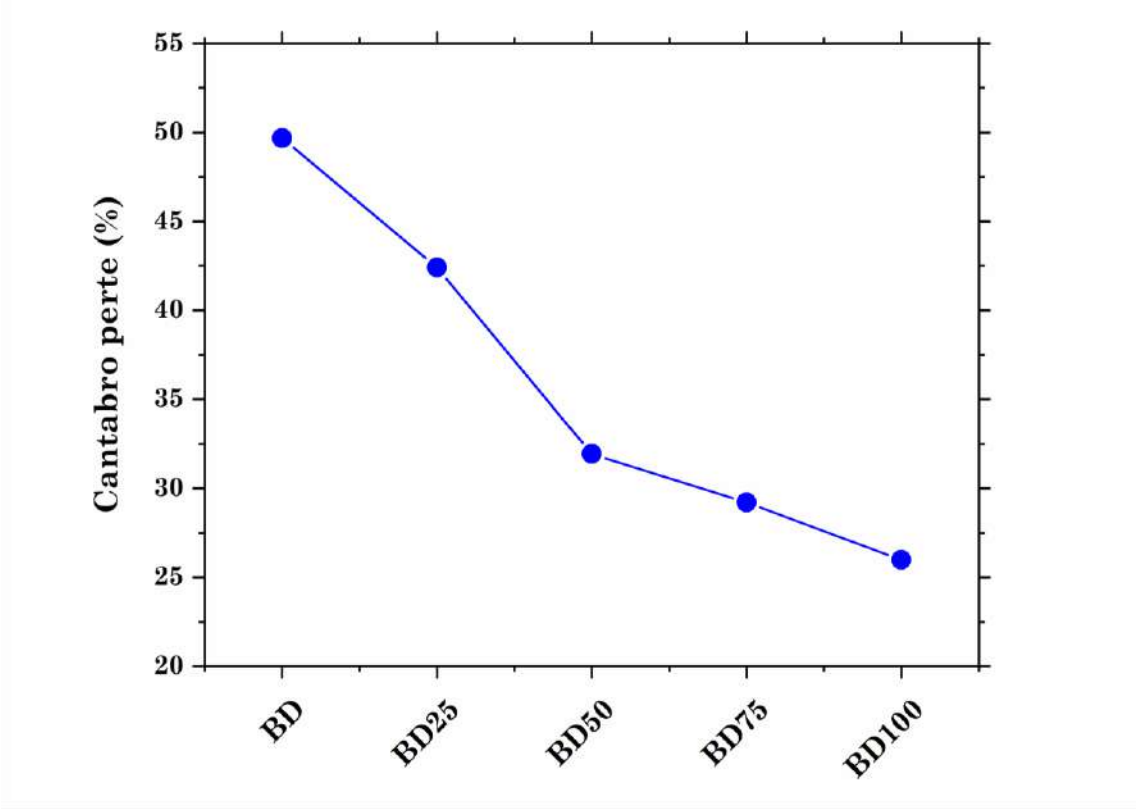


Figure 3. 11 la résistance à l'abrasion en fonction de la teneur en GBr

La variation de la résistance à l'abrasion évaluée par l'essai Cantabro des différents bétons étudiés est représentée dans la figure 3.11. L'essai Cantabro a montré une faible perte de matériaux pour des teneurs plus élevées en GBr.

Il convient de noter que la qualité de la pâte est le facteur le plus important qui peut affecter la résistance à l'abrasion [202]. Étant donné que nous avons fixé le dosage en ciment et le rapport E/C, la résistance à l'abrasion sera affecté dans notre cas par la nature des granulats utilisés.

Le comportement mécanique des granulats ne semble pas constituer une bonne indication de la résistance à l'abrasion des bétons formulés avec les granulats donnés. Des granulats légers de bonne qualité présentent une meilleure résistance à l'abrasion puisqu'il s'agit d'un matériau céramique même s'il n'est pas résistant aux chocs associés à l'abrasion en raison de sa structure poreuse [17], [56].

2.10 Relation entre la porosité connectée et la résistance

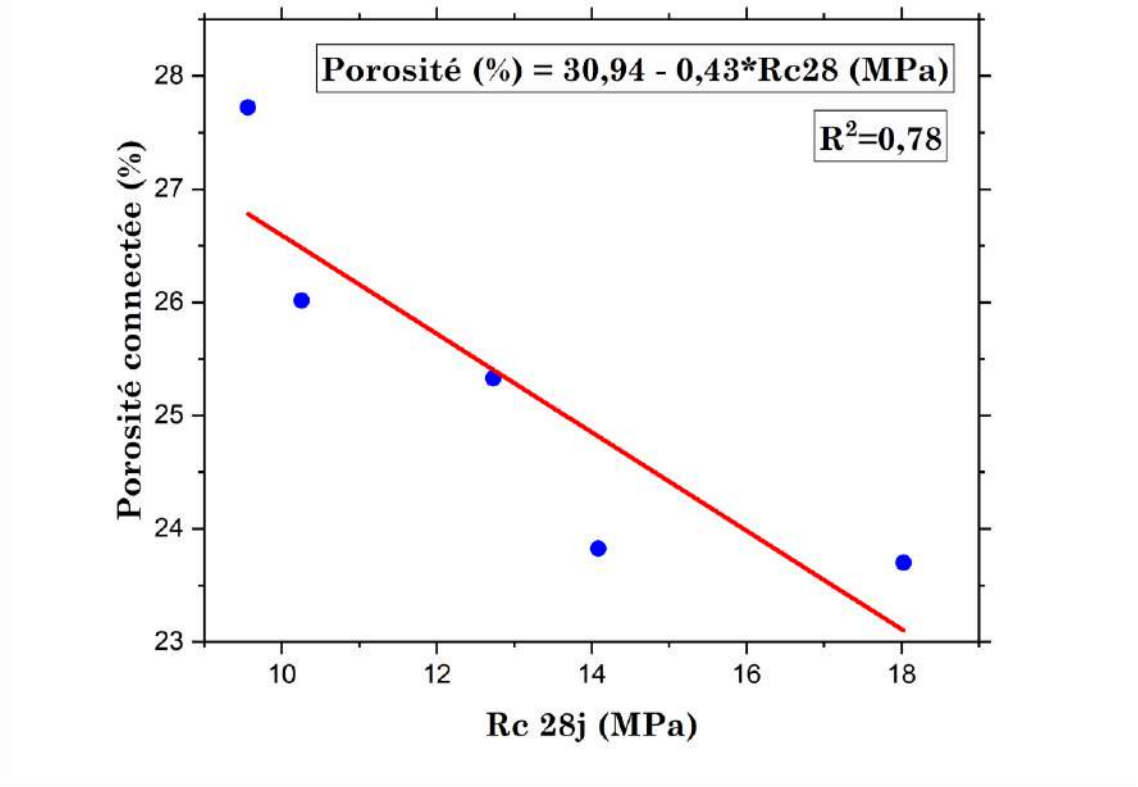


Figure 3. 12 Corrélations entre la porosité connectée et Rc28

Une bonne corrélation a été établie entre la porosité connectée et la résistance à la compression à 28 jours comme le montre la figure 3.12. La porosité ouverte peut être directement liée à la résistance en compression, ce qui considère comme un reflet des caractéristiques intrinsèques du béton qui découlent de sa composition [203]. Des relations similaires ont été obtenues par autres chercheurs [204], [205].

2.11 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique

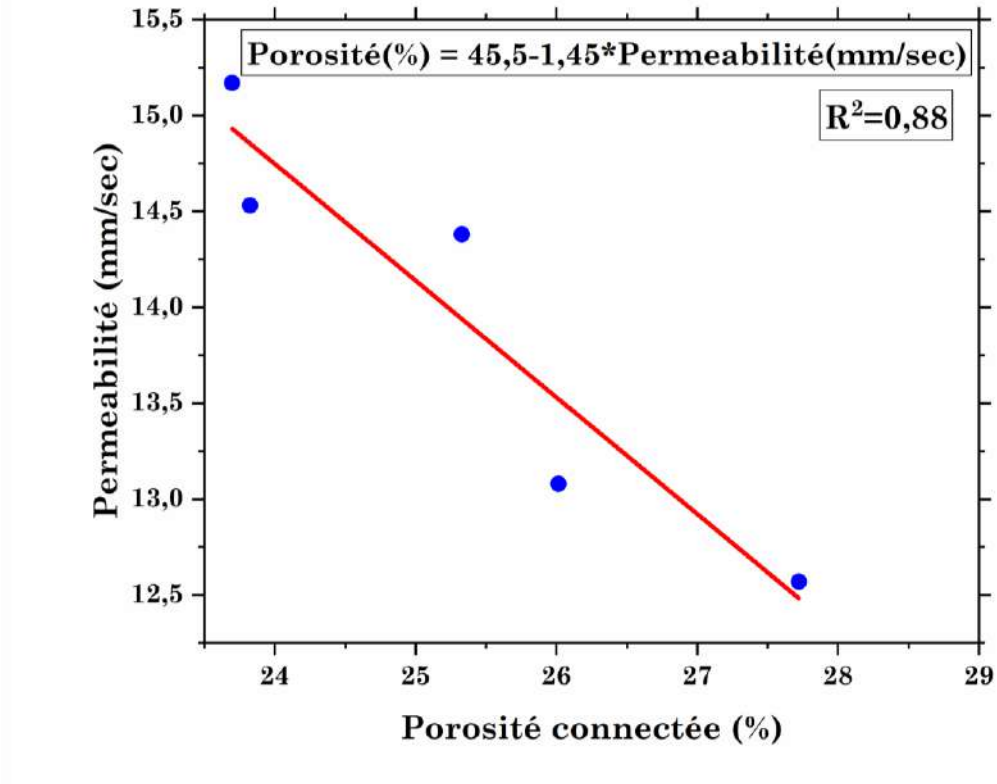


Figure 3. 13 Corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique

Les résultats obtenus ont montré une bonne corrélation entre la perméabilité hydraulique et la porosité effective (R^2=0.88). Dans notre cas l'augmentation de la porosité affecte négativement la perméabilité hydraulique. Ceci serait dû au fait que la porosité effective est une propriété volumétrique tandis que la perméabilité intrinsèque est une propriété qui définit la capacité d'écoulement, qui ne dépend pas seulement de la quantité des pores, mais également de leur distribution et leur connectivité [206], [4]. La granulométrie des GBr dans notre cas est inférieure à celle des GN comme le montre l'analyse granulométrique (cf. Figure 3.13), ce qui peut avoir une influence sur le diamètre des pores interconnecté. Il convient de noter aussi que l'angularité et la texture regureuse des granulats de GBr peuvent affecter la perméabilité hydraulique.

2.12 Relation entre la densité et la résistance

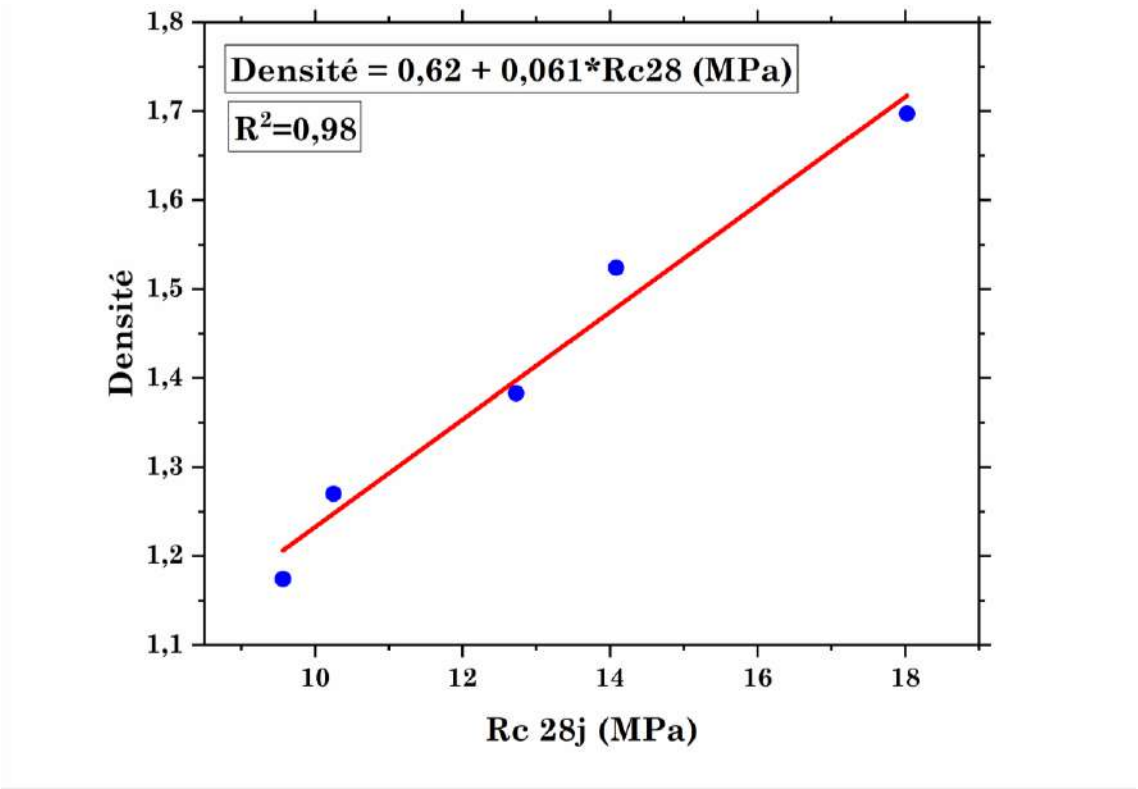


Figure 3. 14 Corrélation entre la densité et la résistance à la compression

La figure 3.14 montre une très bonne corrélation linéaire entre la densité et la résistance à la compression (R^2=0.98). Cela peut s'expliquer par le fait que la résistance à la compression des granulats d'un béton ordinaire est 1,5 à 2 fois supérieure à la résistance du béton lui-même, tandis que la résistance des granulats légers est bien inférieure à celle du béton. Cette corrélation permet de prédire la résistance à la compression des bétons étudiés à partir de la densité à l'état durci.

Plusieurs chercheurs ont démontré aussi que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation densité des bétons confectionnés avec des granulats légers [207], [210].

2.13 Relation entre la densité et la conductivité thermique

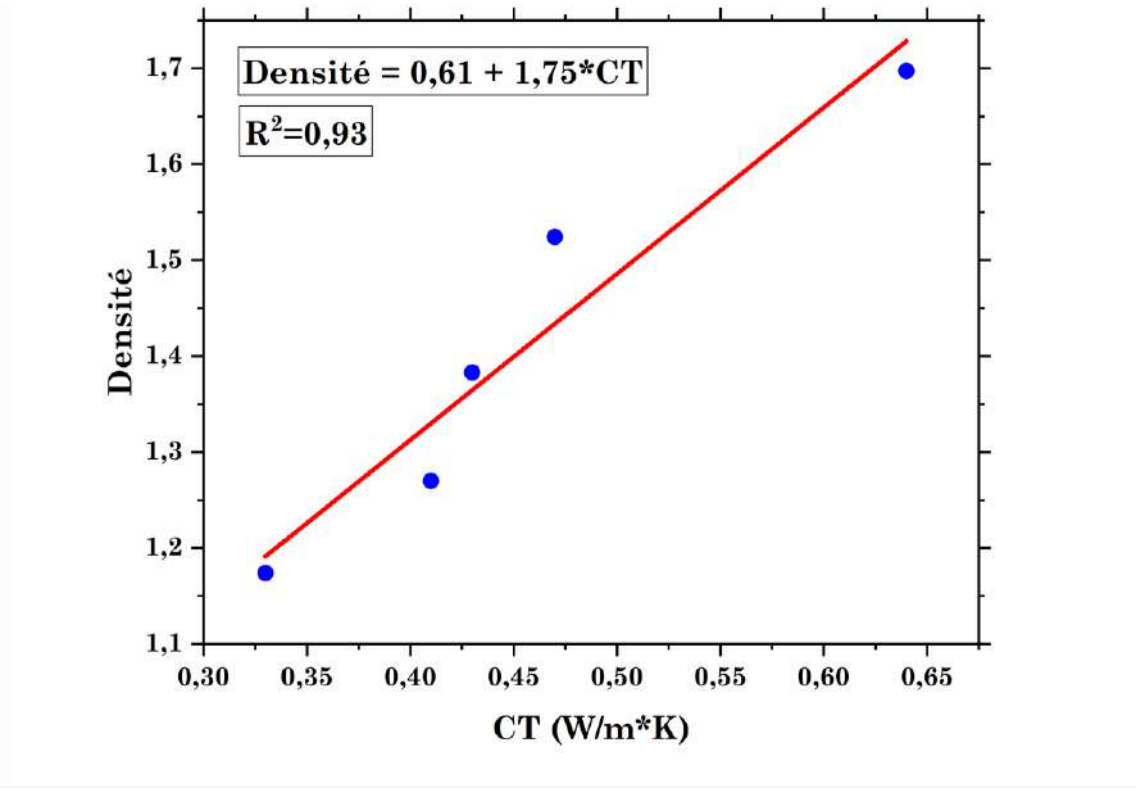


Figure 3. 15 Relation entre la densité et la conductivité thermique

Une forte corrélation a été établie la densité et la conductivité thermique, comme le montre la figure 3.15. Ce qui nous permet de prédire la densité du béton à partir de la mesure de la conductivité thermique. Real et al [211] présentent l'évolution de la conductivité thermique des bétons à base des granulats légers avec différentes classes de résistance. Ils ont montré que la conductivité thermique des bétons à base de granulats légers peut être la moitié de celle des bétons ordinaire.

Une forte corrélation linéaire a été trouvée entre la conductivité thermique et la densité. La faible conductivité thermique de l'air emprisonné dans la structure poreuse des granulats légers est la raison principale pour avoir une capacité d'isolation thermique plus élevée. Des résultats similaires ont été rapportés par [212], [213].

2.14 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique

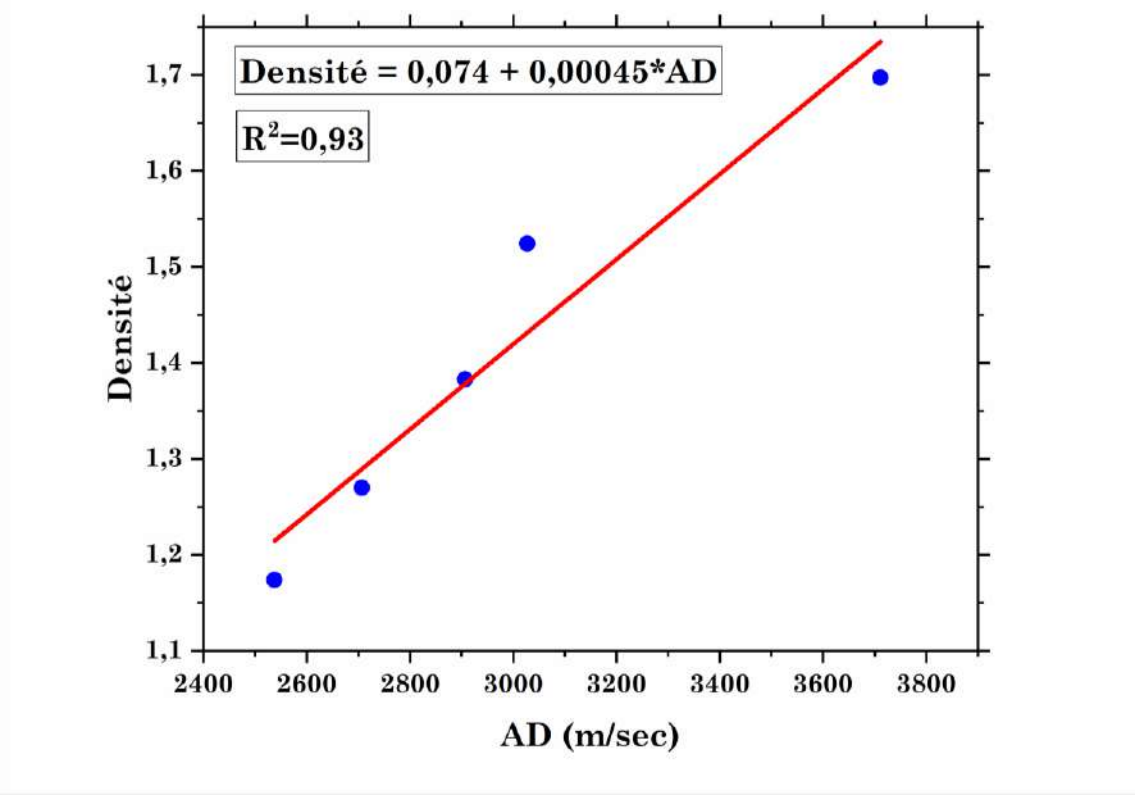


Figure 3. 16 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique

D'après la figure 3.16 on observe une très bonne corrélation linéaire entre la densité et l'auscultation dynamique. La relation entre cette dernière et la densité est semblable à la relation entre la résistance à la compression et la densité [214]. [215], [216] ont trouvé des résultats similaires. Ce résultat confirme aussi que le volume des vides et la porosité se sont avérés très efficaces sur la propagation des ondes ultrasoniques [217]. Cette relation est avérée capable de prédire la densité à partir de l'auscultation dynamique.

3. BETON DE MOUSSE DRAINANT

La deuxième partie de cette étude a porté sur la possibilité de formuler un BD obtenu par l'ajout d'une mousse. Dans ce cas, nous essaierons d'obtenir une structure poreuse où les pores sont connectés, ce qui permet une meilleure conductivité hydraulique.

Des études préliminaires ont été réalisées afin de déterminer le dosage optimal du rapport sable/ciment « S/C » et le dosage en superplastifiant nécessaire. Selon les expériences menées par Geng et al [116], la résistance à la compression des BMDs diminue en fonction de l'augmentation du rapport sable/ciment. Ce qui nous amène à adopter un rapport S/C de l'ordre de 0.5 (un rapport E/C de l'ordre de 0.5 a été adopté dans ce mélange). Cependant, nous avons obtenu un béton de mousse imperméable (porosité isolée) avec une résistance nulle comme le montre la figure 3.17 . Cela nous conduit à éviter l'utilisation du sable dans notre cas d'étude en raison d'avoir une perméabilité et une résistance mécanique acceptable.



Figure 3. 17. Béton de mousse avec S/C=0.5

Une autre expérience a été réalisée afin d'étudier la possibilité d'utiliser le superplastifiant dans la fabrication du béton mousse. Une incompatibilité a été mise en évidence entre le superplastifiant « TEMPO 10 » et l'agent moussant « FOAMTEK ». Cela peut être dû au fait que le superplastifiant utilisé dans notre cas possède un effet anti-moussant [117]. D'après la figure 3.18, on remarque un éclatement total des bulles d'air environ deux heures après le malaxage pour un BMD contenant du superplastifiant, alors qu'un mélange sans superplastifiant reste stable.

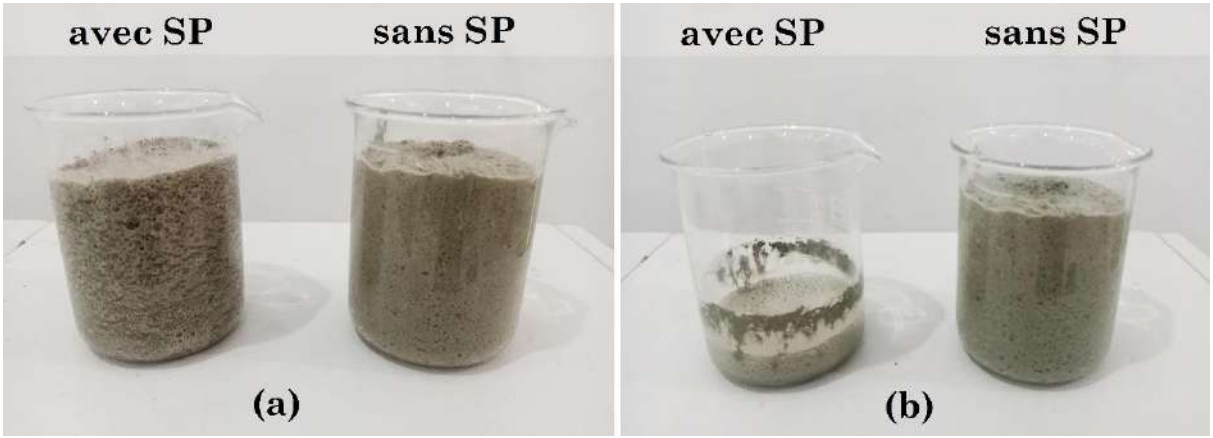


Figure 3. 18 La compatibilité entre le SP et l'agent moussant utilisé : (a) à l'instant t=0 ; (b) à l'instant t=120 min

- Les essais réalisés dans cette partie sont :
- Essais au Mini-Cône ;
- Densité à l'état frais ;
- Essai de la porosité ouverte ;
- La conductivité hydraulique ;
- Conductivité thermique ;
- Conductivité acoustique ;
- Résistance à l'abrasion ;
- Les résistances à la compression et à la traction ;

Les résultats tous les essais sont rassemblés dans le tableau 3.3 tandis que les modèles retenus des essaies réalisés et leurs coefficients de corrélation (R^2) sont récapitulés dans le tableau 3.4. Les coefficients des modèles mathématiques ont été trouvés à l'aide d'une méthode basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés standard. Les coefficients des corrélations des modèles postulés sont généralement très bons (de 0.86 à 0.99). Cela confirme que les modèles retenus représentent parfaitement les résultats expérimentaux obtenus.

Tableau 3. 3 Résultats des essais réalisés

Mélange	Ciment (kg/m^3)	E/C	Etat frais		Etat durci							
			Éta (mm)	Densité fraiche	Rc (Mpa)	Rt (Mpa)	Densité sèche	Porosité (%)	K (mm/sec)	CT W/(m·K)	AD (m/sec)	Abrasion (%)
01	300	0,5	12,5	0,44	0	0	0,30	25,4	3,58	0,079	1106	45
02		0,6	15	0,49	0	0	0,33	2,36	0,47	0,089	1536	31
03	500	0,5	13,5	0,56	0	0	0,46	11,04	0,16	0,137	1153	15
04		0,6	17	0,66	1,698	0,378	0,51	0	0	0,176	1821	11
05	700	0,5	15,5	0,82	0,168	0	0,59	1,13	0	0,143	1678	12
06		0,6	19,5	0,89	3,732	0,792	0,66	0	0	0,191	1988	5

Eta : Etalement
K : Coefficient de perméabilité hydraulique
CT : Conductivité thermique
AD : Auscultation dynamique

Tableau 3. 4 Modèles mathématiques retenus

Essai	Modèle	(R^2)
Étalement	Étalement (cm) = 10,8125+0,009375*ciment+1,66667*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,001875)	0.99
Densité à l'état frais	Densité à l'état frais = 0,15583+0,000975*ciment+0,036667*((E/C 0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,00002499)	0.98
Résistance à la compression	Rc28 (MPa) = (-1,5045)+0,004875*ciment+0,87699*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,004455)	0.99
La résistance à la traction	Rt28 (MPa) = (-0,3)+0,0009899*ciment+0,195*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05) *0,0009899)	0.99
Densité à l'état durcis	Densité à l'état durcis = 0,087499+0,000775*ciment+0,025*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,00005)	0.99
La perméabilité hydraulique	Perméabilité (mm/sec) = 3,23291667-0,0050625*ciment-0,545*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,0038875)	0.99
La porosité connectée	Porosité connectée (%) = 23,29875-0,0332875*ciment-5,86833*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,0273875)	0.99
La conductivité thermique	CT (W/m·K)= 0,0320833+0,0002075*ciment+0,0161667*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,0000475)	0.87
Auscultation dynamique	AD (m/sec) = 907+1,28*ciment+234,6667*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*-0,15)	0.94
Abrasion	Abrasion (%) = 56,70833-0,07375*ciment-4,16667*((E/C-0,55)/0,05)+(ciment-500)*(((E/C-0,55)/0,05)*0,0087499)	0.86

3.1 Essais au Mini-Cône

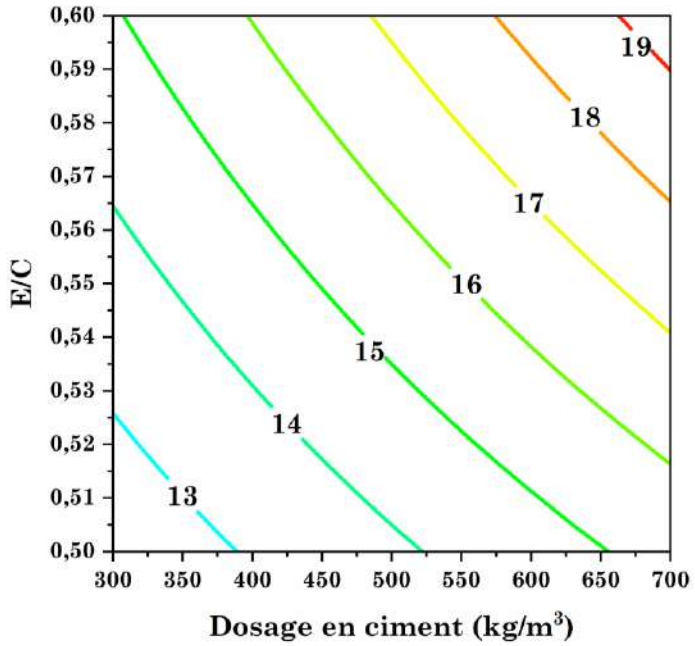


Figure 3. 19 Courbes isoréponses de l'étalement (cm) en fonction de dosage en ciment et du rapport E/C

les courbes isoréponses représentées dans la figure 3.19 montrent l'effet de la variation du dosage en ciment et du rapport E/C sur l'étalement mesuré par le mini-cône. Nous constatons que l'étalement augmente en fonction de l'augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C de l'ordre de 45% pour les BMDs confectionnés avec un dosage en ciment de 700 kg/m^3 et un rapport E/C de l'ordre de 0.6 . Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de dosage en ciment a entrainé une teneur en eau plus élevée ce qui augmente par conséquent l'ouvrabilité du mélange. Bayraktar et al [218] ont constaté aussi une amélioration de l'affaissement due à l'augmentation de dosage en ciment de 300 à 500 kg/m^3.

3.2 Densité

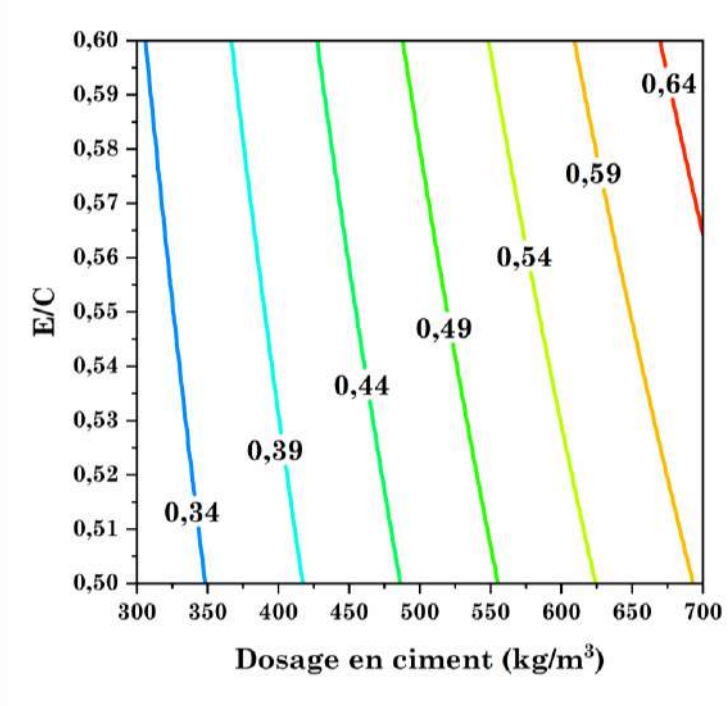


Figure 3. 20 l'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur l'évolution de la densité a l'état durci

La Figure 3.20 montre l'effet de dosage en ciment et le rapport E/C sur l'évolution de la densité a l'état durci en courbes isoréponses. D'après cette figure, on constate que la densité augmente en fonction de l'augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C. L'augmentation du dosage en ciment aura pour conséquence de diminuer le volume de mousse, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la densité du mélange [219]. D'autre part, l'augmentation du rapport E/C diminue la capacité du maintien des bulles d'aire dans la matrice, ce qui augmente par conséquent la densité du mélange [219], [220].

3.3 Résistances à la compression et à la traction

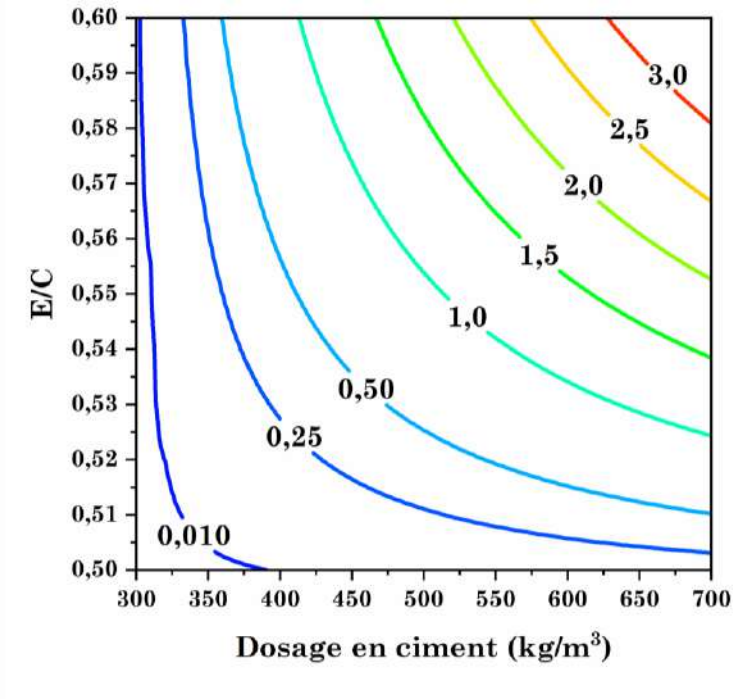


Figure 3. 21 L'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur la résistance a la compression (MPa)

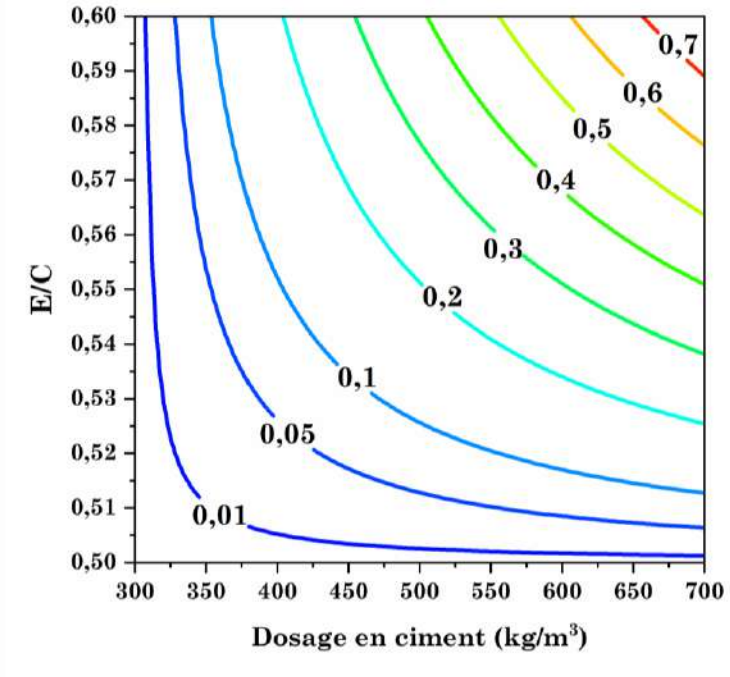


Figure 3. 22 L'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur la résistance a la traction (MPa)

Les courbes isoréponses représentés dans les figures 3.21 et 3.22 montrent l'effet de la variation de la résistance à la compression et à la traction des compositions étudiées avec différents dosages en ciment et rapports E/C. Nous constatons que la résistance à la compression et à la traction augmente en fonction de l'augmentation de dosage en ciment et du rapport E/C. L'augmentation du dosage en ciment aura pour conséquence de diminuer le volume de mousse, ce qui se traduira nécessairement par une amélioration des performances mécaniques. Par ailleurs, l'augmentation du rapport E/C influe négativement la capacité du maintien des bulles d'aire dans la matrice, la densité du mélange augmente et par conséquent la résistance mécanique s'améliore [219], [220].

3.4 Essai de la porosité ouverte

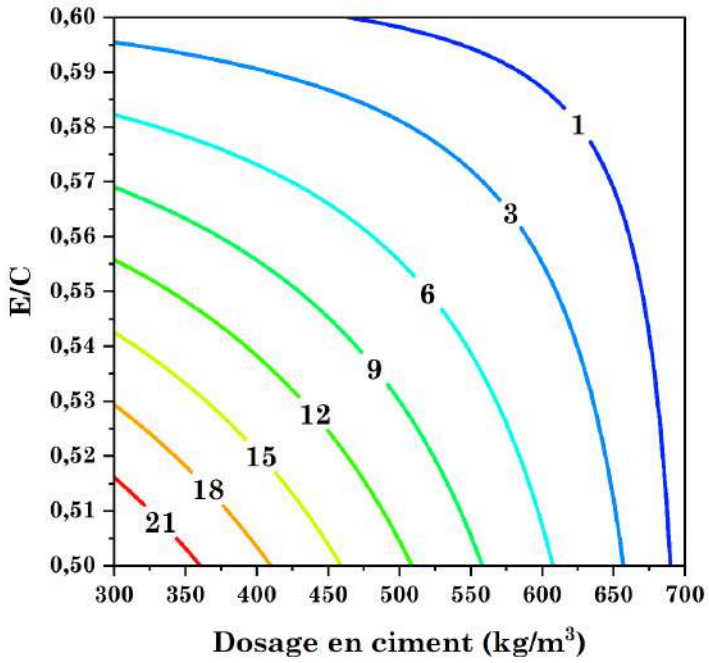


Figure 3. 23 Courbes isoréponses de la porosité connectée (%) en fonction de dosage en ciment et du rapport E/C

L'influence du dosage en ciment et du rapport E/C sur la porosité ouverte est présentée dans la figure 3.23. Nous remarquons d'après ce résultat que l'augmentation du rapport E/C et du dosage en ciment diminue les valeurs de la porosité ouverte.

Le BMD confectionné avec un faible rapport E/C présente un grand nombre de pores connectés. Ceci est expliqué par le fait qu'un faible rapport E/C apporte une proportion plus élevée des petits pores avec une plus grande surface, ce qui conduit a des parois de pores plus minces et des pores plus connectés [221].

3.5 Conductivité hydraulique

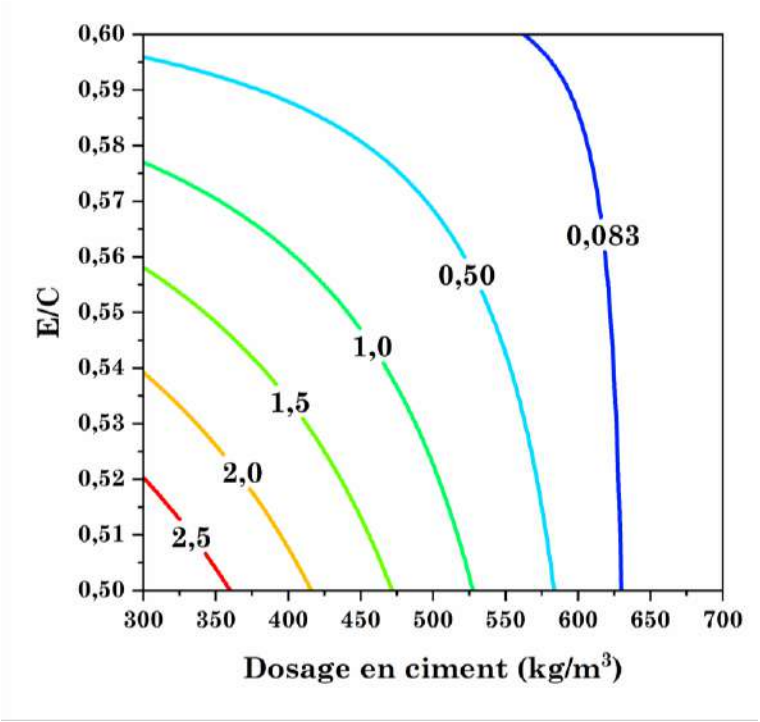


Figure 3. 24 Courbes isoréponses de la perméabilité hydraulique (mm/sec) en fonction de dosage en ciment et du rapport E/C

La Figure 3.24 montre l'effet de dosage en ciment et le rapport E/C sur la conductivité hydraulique en (mm/sec). D'après cette figure, on constate que la perméabilité hydraulique diminue en fonction de l'augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C.

Les mélanges confectionnés avec un dosage en ciment supérieur à 550 kg/m^3 et un rapport E/C supérieur à 0.58 sont caractérisés par une perméabilité hydraulique inférieure a 1mm/sec ce qui est effectivement non conforme aux exigences techniques préconisées.

Ce résultat peut être dû au fait qu'un faible rapport E/C apporte une proportion plus élevée des petits pores et une grande surface de contacte, provoquant par conséquent des pores avec des parois plus minces et plus connectées [221].

3.6 Conductivité thermique

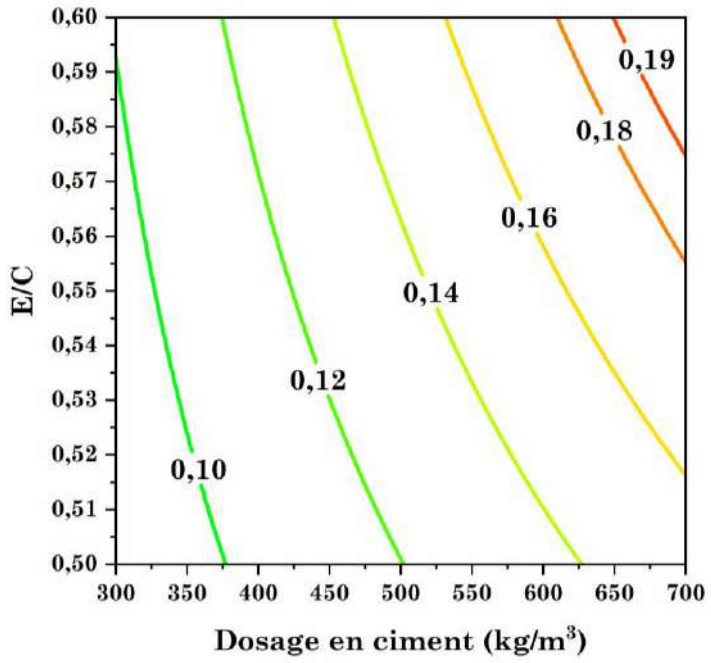


Figure 3. 25 Courbes isoréponses de la conductivité thermique (W/m·K) en fonction de dosage en ciment et du rapport E/C

Les résultats de la conductivité thermique sont représentés sur la figure 3.25. D'après cette figure, on remarque que les BMDs étudiés présentent une conductivité thermique plus faible que celle des BDs à base de GBrs (inférieurs à 0.2). Des résultats similaires ont été rapportés par [222], [149], [223].

On peut noter aussi que l'augmentation du dosage en ciment engendre une augmentation de la conductivité thermique, ceci peut être expliqué par l'augmentation de la densité du mélange lors de l'augmentation de dosage en ciment. Bayraktar et al [218] ont rapporté que les mélanges qui contiennent des dosages en ciment de 300 kg/m^3 présentent les plus faibles conductivités thermiques en raison du faible poids unitaire parmi tous mélanges.

D'autre part, l'augmentation du rapport E/C entraîne une augmentation de la conductivité thermique. Sang et al [220] ont rapporté que la porosité augmente avec l'augmentation du rapport E/C et par conséquent la résistance à la compression et la conductivité thermique diminuent.

3.7 Auscultation dynamique

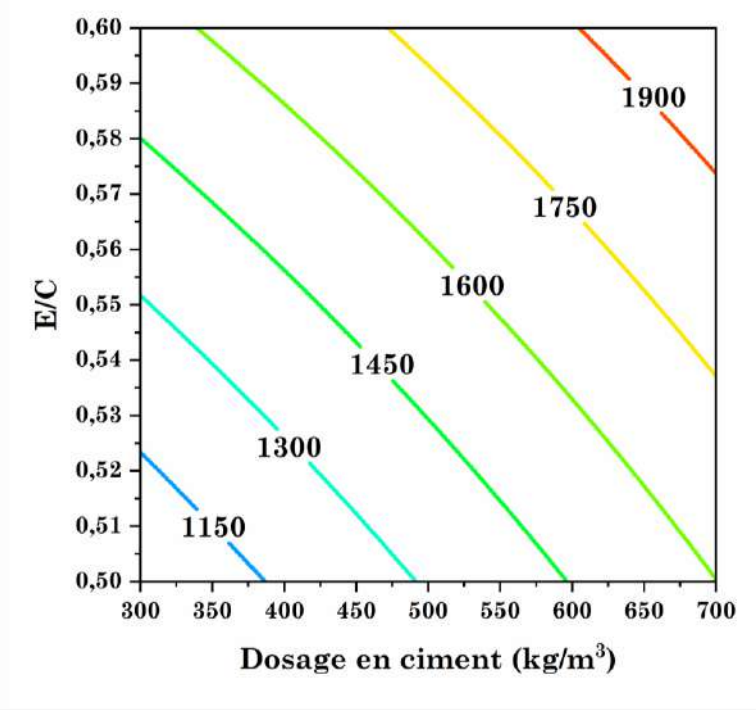


Figure 3. 26 l'effet de dosage en ciment et du rapport E/C sur l'auscultation dynamique (m/sec) en courbes isoréponses

L'influence du dosage en ciment et du rapport E/C sur l'auscultation dynamique des mélanges étudiés sont présentés dans la figure 3.26. D'âpres ces courbes isoréponses on remarque que l'augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C contribue à augmenté la propagation des ondes. Bayraktar et al [218] affirment que l'augmentation de dosage en ciment tend a augmenté le volume du contenu solide et par conséquent la vitesse de propagation augmente.

Zhang et al [224] affirment que BMD a une absorption acoustique relativement élevée par rapport au béton conventionnel. Le réseau des pores isolés est obstrué la propagation du son et entraine une diminution de la vitesse ultrasonique même si la porosité est relativement élevée [225].

3.8 Résistance à l'abrasion

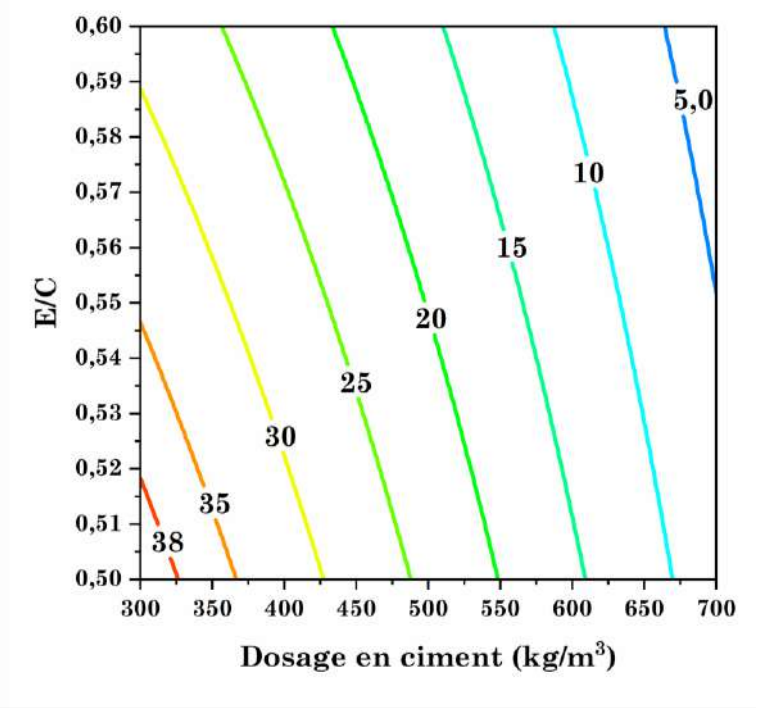


Figure 3. 27 Courbes isoréponses de l'essai Cantabro en fonction de dosage en ciment et du rapport E/C

La figure 3.27 traduise en courbes isoréponses la résistance à l'abrasion (perte de masse) donnée par l'essai Cantabro des BMDs étudiés en fonction de l'augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C. En remarque que l'augmentation du dosage en ciment entraîne une amélioration de la résistance a l'abrasion. En effet, l'augmentation de dosage en ciment réduit la profondeur d'abrasion alors qu'une augmentation du volume de la mousse agit au contraire, par ailleur, les mélanges avec une densité élevée ont montré une profondeur d'usure plus faible que ceux avec une faible densité [218]. D'autres auteurs ont trouvé aussi des résultats similaires [226]. Shamsai et al [227] ont rapporté aussi que la résistance à l'abrasion de la phase mortier diminue en fonction de l'augmentation du rapport E/C.

3.9 Corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique

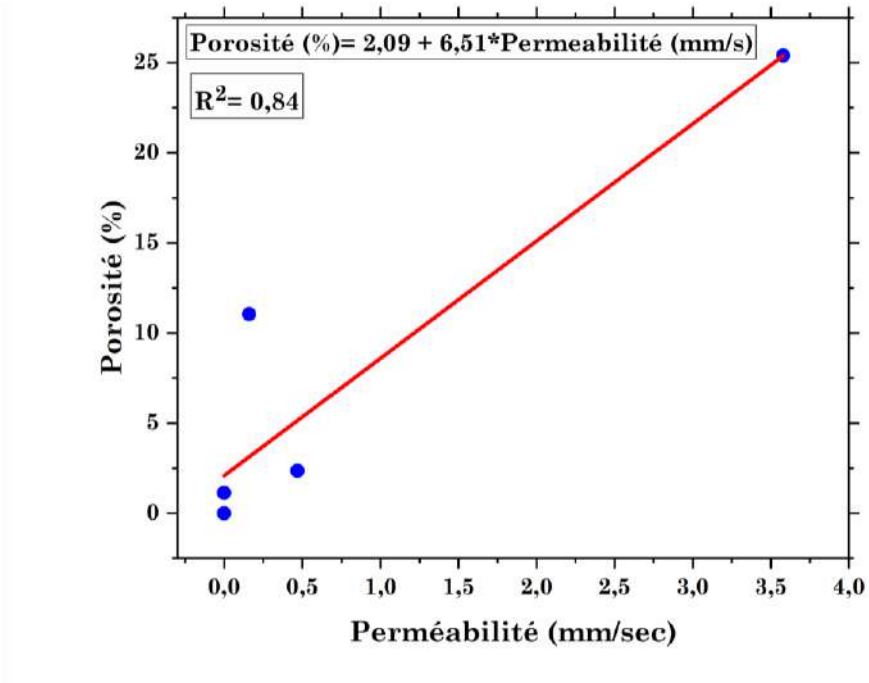


Figure 3. 28 Relation entre la porosité connectée et la perméabilité hydraulique

D'après la figure 3.28, on observe une bonne corrélation linéaire entre la porosité effective et la conductivité hydraulique (R^2=0.84). De nombreuses études ont été menées pour évaluer la relation entre la perméabilité et la porosité [228], [229].

Une porosité élevée n'implique pas nécessairement une perméabilité élevée, mais elle dépend de la nature des pores, s'ils sont interconnectés ou isolés [230]. Cette corrélation nous permet de prédire la porosité connectée par l'essai de la perméabilité hydraulique.

3.10 Relation entre la résistance et la porosité connectée

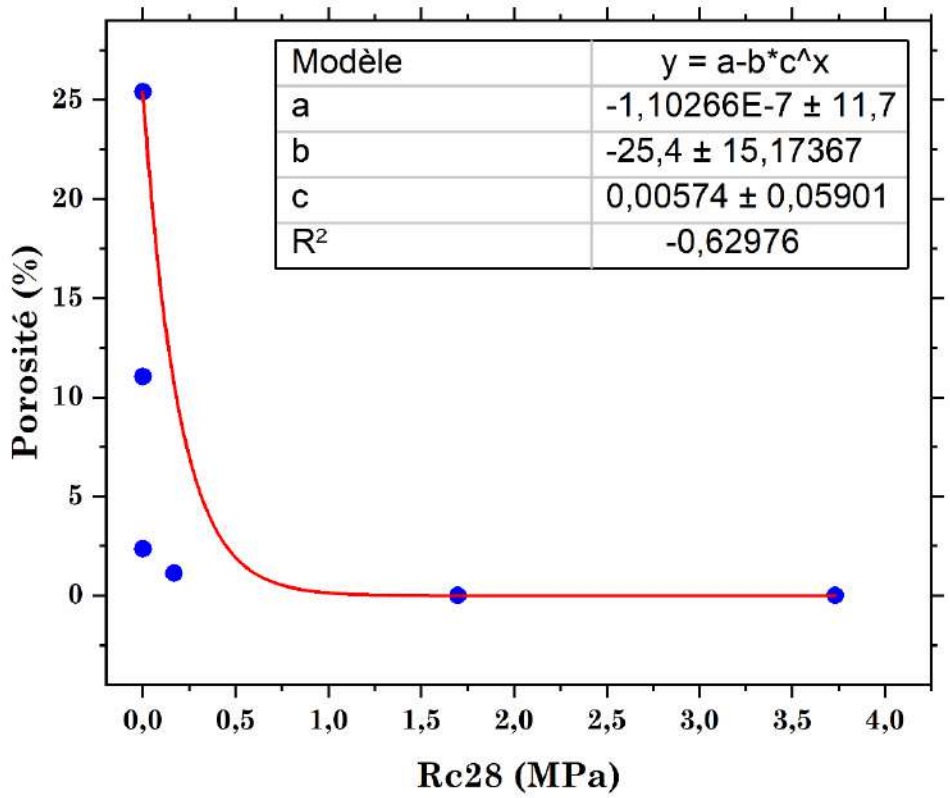


Figure 3. 29 Corrélation entre la résistance à 28j et la porosité connectée

Une corrélation modérée a été établie entre la porosité effective et la résistance à la compression à 28 jours comme le montre la figure 3.29. Ceci est expliqué par le fait que les mélanges confectionnés avec des rapports E/C et des dosages en ciment élevés tend à des perméabilités nulles, tandis que des faibles dosages en ciment et des rapports E/C minimales amènent à des résistances nulles aussi, ce qui rend les modèles résultants incompatibles et par conséquent, la corrélation devient faible.

Nous notons également qu'en raison de l'absence de valeurs nulles dans la mesure de la conductivité thermique et l'auscultation dynamique, les corrélations obtenues sont très bonnes. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés sur la relation entre la porosité des BMDs et sa résistance à la compression [231], [232], [139].

3.11 Corrélation entre la densité et la résistance

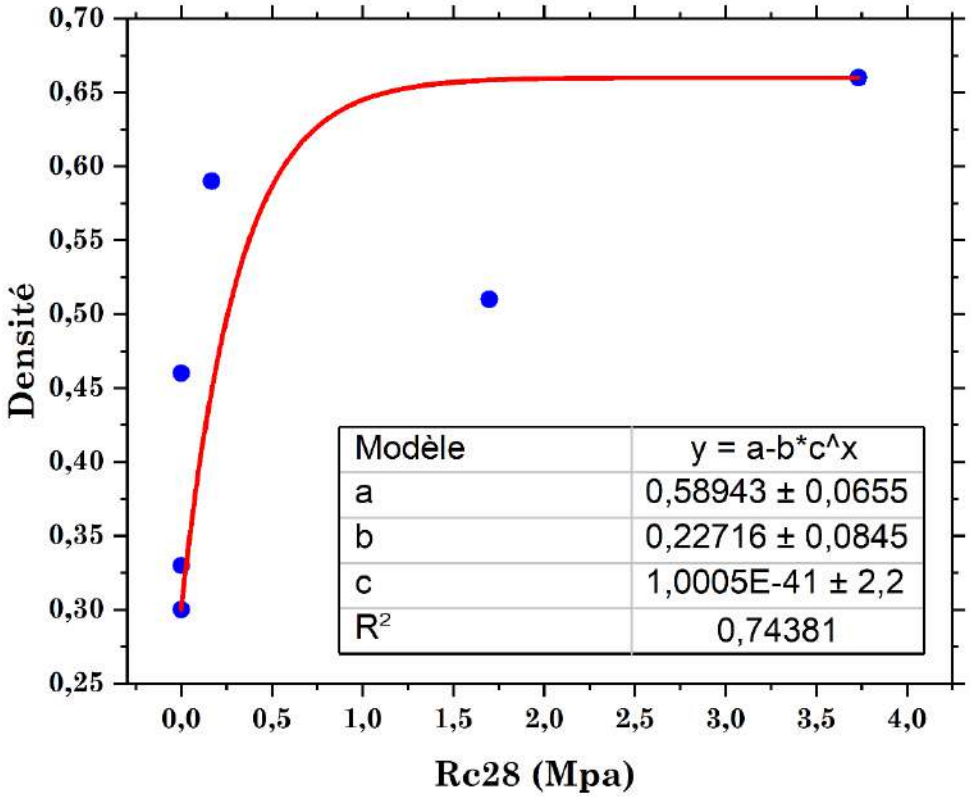


Figure 3. 30 Relation entre la résistance à la compression et la densité

La figure 3.30 montre une bonne corrélation entre la densité et la résistance à la compression (R^2=0.74). Kearsley [233] a rapporté que la résistance à la compression du BMD diminue de façon exponentielle avec la réduction de la densité. Des résultats similaires ont été observés par [234], [235].

3.12 Relation entre la conductivité thermique et la densité

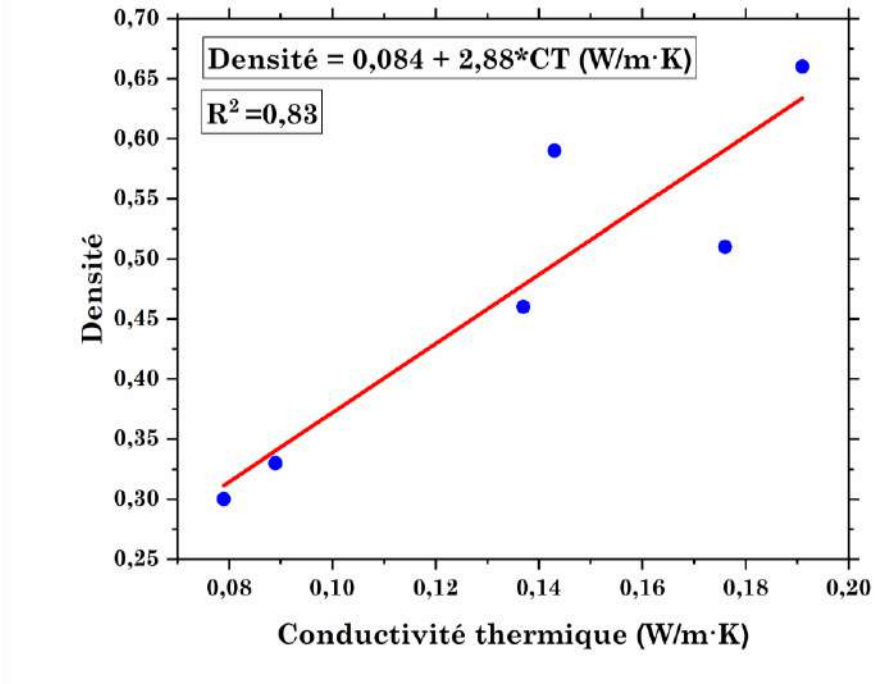


Figure 3. 31 Corrélation entre la densité et la conductivité thermique

Les résultats obtenus ont montré une bonne corrélation entre la densité et la conductivité thermique avec un coefficient de corrélation R^2=0.83 (cf. Figure 3.31). Des résultats similaires ont été rapportés par [236], [151]. Cette bonne corrélation nous permet de prédire la densité du BD étudié à partir de la conductivité thermique.

3.13 Corrélation entre la densité et l'auscultation dynamique

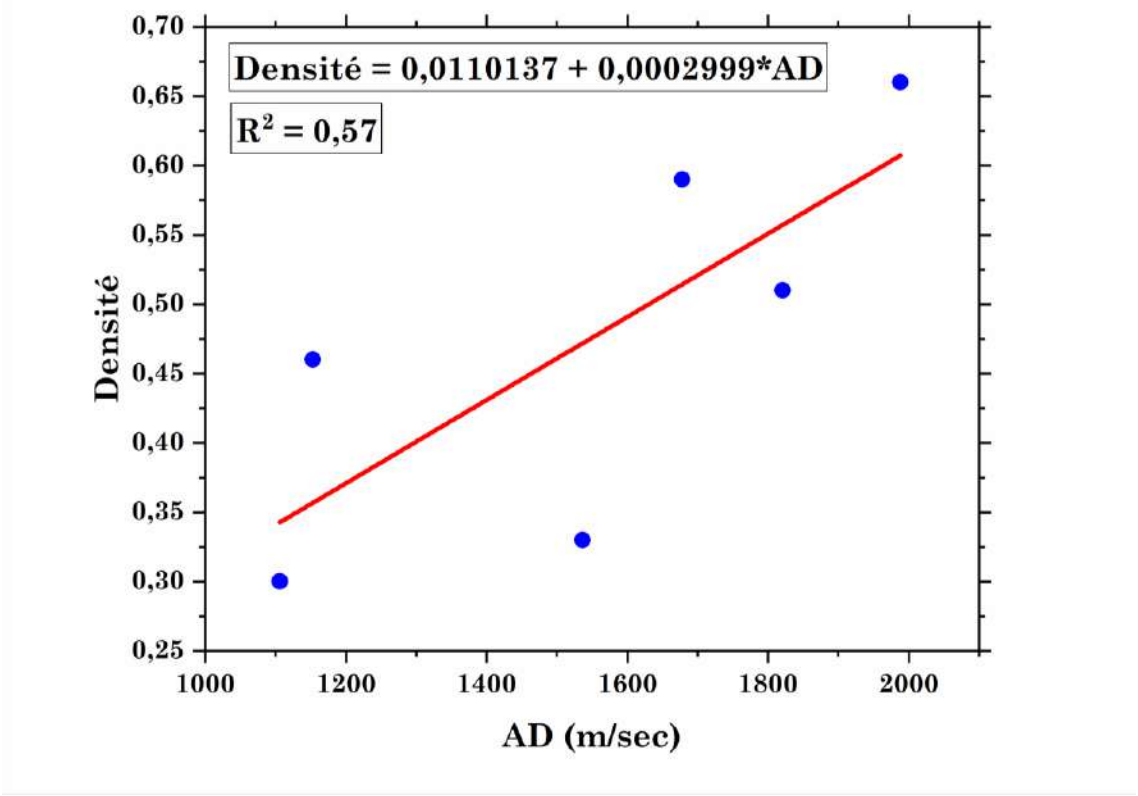


Figure 3. 32 Relation entre la densité et l'auscultation dynamique

Une corrélation modérée a été établie entre la densité et l'auscultation dynamique comme le montre la figure 3.32. D'une manière similaire à la conductivité thermique, Wongsa et al [237] ont montré que la vitesse de propagation des ondes ultrasonique augmente avec l'augmentation de la densité. Des résultats similaires ont été trouvés par [238].

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux de recherche de la présente mémoire s'articulent autour de deux axes principaux :

Le premier concerne la valorisation des GBrs pour la fabrication des BDs légers avec un taux de substitution de 0 à 100% avec un pas de 25%.

La deuxième partie consiste à étudier la possibilité de formuler un béton de BMD tout en variant le dosage de ciment de 300 à 700 kg/m^3 et le rapport E/C de 0.5 à 0.6.

À travers les résultats obtenus de la première partie d'étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une diminution de l'ouvrabilité a été enregistrée en fonction de l'augmentation des GBrs, un dosage supplémentaire en superplastifiant sera nécessaire pour avoir une ouvrabilité adéquate.
- Une diminue de l'ordre de 35% de la densité du béton a été établie par la substitution complète des granulats naturels par les GBr.
- Les mélanges contenant des teneurs élevées en GBr se caractérisent par des porosités élevées par rapport aux autres combinaisons.
- Un taux de diminution de la perméabilité hydraulique de l'ordre de 20% a été enregistré pour une substitution de 100% des GN par les GBrs.
- Les résultats montrent qu'il existe un point d'équilibre entre la porosité et la perméabilité hydraulique pour un taux de substitution de 60% des GN par les GBrs.
- La conductivité thermique est diminuée d'environ deux fois pour une substitution complète des GN par des GB.
- Un taux de substitution de 50% des GN par les GBrs offre un point d'équilibre entre la porosité, la conductivité thermique et la résistance mécanique.
- La vitesse des ondes ultrasonique est diminuée de l'ordre de 50% pour un taux de substitution totale des GN par les GBrs.
- Les mélanges contenant des teneurs plus élevées en GBr ont montré une bonne résistance à l'abrasion.
- L'augmentation du taux de substitution des GN par les GBrs donne des faibles résistances mécaniques en termes de compression et de traction.
- Des bonnes corrélations ont été établies entre la perméabilité, la résistance à la compression et la porosité connectée des BDs étudiés.
- Les résultats obtenus ont montré de bonnes corrélations entre la résistance à la compression, la conductivité thermique, l'auscultation dynamique et la densité des bétons formulés.

Les résultats obtenus dans la deuxième partie d'étude sur la formulation et la caractérisation d'un béton de BMD ont permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'utilisation des techniques des plans d'expériences nous a fourni des modèles mathématiques permettent de tracer des courbes isoréponses qui nous permet de mieux comprendre le comportement du béton étudié.
- L'ouvrabilité augmente en fonction de l'augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C.

- L’augmentation du rapport E/C et du dosage en ciment entraine une diminution considérable de la porosité connectée.
- La conductivité hydraulique diminue en fonction de l’augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C.
- L’augmentation du dosage en ciment et du rapport E/C contribue à une augmentation de la conductivité thermique.
- La vitesse de propagation des ondes ultrasonique sera plus importante tout en augmentant le dosage en ciment et du rapport E/C.
- L’augmentation du dosage en ciment entraîne une amélioration de la résistance à l’abrasion en termes de perte de masse.
- La résistance à la compression et à la traction augmente en fonction de l’augmentation de dosage en ciment et du rapport E/C.
- Les résultats obtenus ont montré de bonne corrélation entre la porosité connectée et la conductivité hydraulique.
- Des bonnes corrélations ont été établies entre la conductivité thermique, l’auscultation dynamique et la densité des BMDs étudiée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

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

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

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

[4] 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.

[5] ACI 211.3R, "Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete Reported by ACI Committee 211," *Am. Concr. Inst.*, vol. 02, no. Reapproved, pp. 1–26, 2002.

[6] P. D. Tennis, M. L. Leming, and D. J. Akers, *Pervious concrete pavements*, no. PCA Serial No. 2828. Portland Cement Association Skokie, IL, 2004.

[7] M. Science, E. T. Ingenierie, and D. E. S. Materiaux, "Essai de formulation des betons drainants," 2018.

[8] T. Goto, "Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex." Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2006.

[9] "CIMENTS - Génie Civil." .

[10] "Standard NF EN 197-1." .

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

[12] "Standard XP P18-540." .

[13] A. Charef, "La problématique des granulats au Maroc," *Push-butt. Publ.*, 2007.

[14] R. MAILLOT, *Mémento technique des Granulats*, Les Presse. paris, 2001.

[15] "Tableau des familles de roches." .

[16] V. PHOUMMAVONG, "Cours en ligne matériaux de construction," *Université Nationale du Laos*. .

[17] A. N. Neville, *Propriétés des bétons*. Eyrolles, 2000.

[18] DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS FRANCE, "La Technologie du Béton."

[19] J. BARON, et R. SAUTREY, *Le béton hydraulique*, Presse de. 1982.

[20] V. PHOUMMAVONG, *Cours en ligne matériaux de construction*, Université. .

[21] G. ARQUIE & C. TOURENQ, *"Granulats*, Presses de. 1990.

[22] J. ALEXANDRE & J. SEBILEAU, *Laitier de haut fourneau*, Centre Tec. 1988.

[23] H.-H. Kim and C.-G. Park, "Plant growth and water purification of porous vegetation concrete formed of blast furnace slag, natural jute fiber and styrene butadiene latex," *Sustainability*, vol. 8, no. 4, p. 386, 2016.

[24] R. Scientifique, "Magister Option : Structures et Matériaux Par," 2009.

[25] J.-P. Hannequart & E. Schamp, "L'utilisation de granulats issus du recyclage," 2014.

[26] RILEM, *Demolition and Reuse of concrete*, 37th-DRC, T. ed. 1988.

[27] ADEME, *Guide des déchets de chantiers de bâtiment*. paris, 1998.

[28] H. DJELAL & V. NOUVEL, *Gestion des déchets de démolition et environnement*, XXVIe Renc. Nancy, 2008.

[29] E. L. H. BENAICHI, "Etude des bétons à base des sables de démolition et ajouts minéraux actifs." Université Mohamed Khider Biskra, 2009.

[30] A. CHAREF, *La problématique des granulats au Maroc*. Push-Button Publishing, 2007.

[31] T. C. HANSEN, *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of -the- art report developments 1945-1985*, Demolition. 1996.

[32] H. Hussain and D. Levacher, "Recyclage de béton de démolition dans la fabrication des nouveaux bétons," *Proceeding, XXIemes Rencontres Univ. Génie Civil, La Rochelle, Fr.*, vol. 1, p. 10, 2003.

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

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

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

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

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

[38] D. H. Nguyen, N. Sebaibi, M. Boutouil, L. Leleyter, and F. Baraud, "A modified method for the design of pervious concrete mix," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 271–282, 2014.

[39] DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS FRANCE, “"La Technologie du Béton.” doi: Guf\Formation\Béton\Technobeton V05_01U.

[40] S. S. JANKAR et C. B. K. RAO, *Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning*, Cement & C. 2004.

[41] S. BETHMONT, “Mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplacants,” ENPC Paris, 2005.

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

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

[44] O. Olofinnade and J. Ogara, “Workability, strength, and microstructure of high strength sustainable concrete incorporating recycled clay brick aggregate and calcined clay,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 3, p. 100123, 2021.

[45] J. S. & E. F. M. WESTERHOLM, D. LAGERBLAD, *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*, Cement & C. 2008.

[46] L. MIREN ETXEBERRIA, “Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete,” Université polytechnique de Catalogne-Espagne, 2004.

[47] M. S. RASHWAN & S. ABOURIZK, *The properties of recycled concrete*. 1997.

[48] C. S. POON & C. S. LAM, *"The effect of aggregates-to- cement (A/C) ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks*, Cement & C. 2008.

[49] M. S. & D. G. R.S. RAVINDRARAJAH, *Variability of Recycled Concrete Aggregate and its Effects on Concrete Properties*, 2nd Intern. USA, 2001.

[50] A. NEALEN & S. SCHENK, “The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties,” *Annu. J. 13*, no. In Darmstadt concrete, 1998.

[51] A. Awasthi and S. Goyal, “Recycled aggregate from C&D waste modified by dry processing and used as a partial replacement of coarse aggregate in concrete,” *J Mater Sci Surf Eng*, vol. 5, pp. 671–678, 2017.

[52] M. BARRA & ALL., *Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation, use of recycled concrete aggregate*, Sustainabl. ISBN 0-7277-2726-5., 1998.

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

[54] 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.

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

[56] A. Barkat, "Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton." Faculté des Sciences et Technologies, 2017.

[57] A. béton Québec, "Techno béton."

[58] Y. Tan, Y. Zhu, and H. Xiao, "Evaluation of the Hydraulic, Physical, and Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Iron Tailings as Coarse Aggregates," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, p. 2691, 2020.

[59] N. Jin, "Fly ash applicability in pervious concrete." The Ohio State University, 2010.

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

[61] Y. Aoki, "Development of pervious concrete," vol. Master of, pp. 1–138, 2009.

[62] ACI, *Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10*, vol. 10, no. Reapproved. 2010.

[63] Na. NeithAlAth, D. P. Bentz, and M. S. Sumanasooriya, "Predicting the permeability of pervious concrete," *Concr. Int.*, vol. 32, no. 5, pp. 35–40, 2010.

[64] J. T. Kevern, K. Wang, and V. R. Schaefer, "A novel approach to characterize entrained air content in pervious concrete," *J. ASTM Int.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–10, 2008.

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

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

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

[68] "Norme NF EN 12390-6." .

[69] "Éprouvettes et résistance : les contrôles qualité sur béton durci | Concrete Dispatch." .

[70] 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.

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

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

[73] “DIN EN 12697-17 - European Standards.” .

[74] “Code de bonne pratique pour le choix du revêtement bitumineux lors de la conception ou de l’entretien des chaussées | CRR.” .

[75] B. Mohammed, “Use of non-destructive methods for determination of concrete properties,” *Thèse*, 2019.

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

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

[78] 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.

[79] 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.

[80] 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.

[81] J. T. (University of M.-K. C. Kevern, L. (Washington S. U. Haselbach, and V. R. S. (Iowa S. University), “Hot Weather Comparative Heat Balances in Pervious Concrete and Impervious Concrete Pavement Systems,” *Second Int. Conf. Countermeas. to Urban Heat Islands*, vol. 7, no. Akbari 2001, pp. 1–9, 2009, [Online]. Available: http://heatisland2009.lbl.gov/docs/211340-haselbach-doc.pdf.

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

[83] M. SANCHEZ de JUAN & P. A. GUTIERREZ, “Influence of recycled aggregate quality on concrete properties,” Espagne.

[84] T. K. & T. K. S. HASABA, M. KAWAMURA, “Drying shrinkage and durability of concrete made from recycled concrete aggregates,” 1981.

[85] 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.

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

[87] J. T. Kevern and Q. C. Nowasell, "Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 229–235, 2018.

[88] A. KATZ, *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete",* Cement & C. 2003.

[89] kABAGIRE Kibenga, *済無No Title No Title No Title*, vol. 1, no. 69. 2014.

[90] R. C. Meininger, "Pervious Concrete lar Paving," 1988.

[91] T. D. Paul, L. L. Michael, A. J. David, P. D. Tennis, M. L. Leming, and D. J. Akers, *Pervious Concrete Pavements* , vol. Portland C, no. January 2004. 2004.

[92] L. K. Crouch *et al.*, "Estimating Pervious PCC Pavement Design Inputs with Compressive Strenght and Effective Void Content," *Concr. Technol. Forum*, p. 15, 2006, [Online]. Available: http://www.rmc-foundation.org/images/PCRC Files/Structural Design & Properties/Estimating Pervious PCC Pavement Design Inputs with Compressive Strength and Effective Void Content.pdf.

[93] B. Krishnakumari, G. Gomathi, S. Indhumathi, and V. Kuralarasi, "Strengthening of Pervious Concrete Pavement using Steel Slag," vol. 10, no. 3, pp. 25076–25085, 2020.

[94] N. JIN, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title," 2010.

[95] L. Zhu and Z. Zhu, "Reuse of Clay Brick Waste in Mortar and Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/6326178.

[96] B. Mahajan, "pervious-concrete @ civiconcepts.com." https://civiconcepts.com/blog/pervious-concrete.

[97] A. Bonicelli and L. R. Pianeta, "Performance and Applications of Pervious Concrete Pavement Material as an Overlay on Existent Concrete Slabs," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 471, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/3/032061.

[98] "Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete." .

[99] "The Development, Implementation, and Use of ASTM C1701 Field Infiltration of In Place Pervious Concrete." .

[100] "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete (Withdrawn 2021)." .

[101] M. B. E. N. YOUSSEF, K. MILED, J. NEJI, and M. A. NACCACHE, "Formulation et

caractérisation mécanique d'un nouveau béton cellulaire en Tunisie dit béton mousse: étude préliminaire."

[102] "geopolymer earthbag | Geopolymer House Blog | Page 2." .

[103] L. Bessadi, H. Teggour, E. Johansson, and J. Åstrand, "Matériaux thermiquement isolants pour l'Algérie: béton mousse & panneaux en laine de bois, Rapport phase 1," *Rep. TVBM (Intern 7000-rapport)*, vol. 7047, 1993.

[104] K. Ramamurthy and E. Kunhanandan Nambiar, "Indu Siva and Ranjani G 2009," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 388–396.

[105] N. Mortada, "Mousses minérales: développement, structure porale et propriétés d'usages." Rennes 1, 2021.

[106] K. Ramamurthy, E. K. K. Nambiar, and G. I. S. Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 388–396, 2009.

[107] H. AWANG and O. M. MA, "FARHAN ROSLAN A.«," *Eff. Addit. Mech. Therm. Prop. Light. Foam. Concr. Rapp. master. Sch. Housing, Build. Planning, Univ. Sains Malaysia*, 2012.

[108] E. P. Kearsley and P. J. Wainwright, "The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 105–112, 2001.

[109] P. J. Tikalsky, J. Pospisil, and W. MacDonald, "A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 5, pp. 889–893, 2004.

[110] R. Cabrillac, B. Fiorio, A. Beaucour, H. Dumontet, and S. Ortola, "Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 286–295, 2006.

[111] M. M. Barbero-Barrera, A. García-Santos, and F. J. Neila-González, "Thermal conductivity of lime mortars and calcined diatoms. Parameters influencing their performance and comparison with the traditional lime and mortars containing crushed marble used as renders," *Energy Build.*, vol. 76, pp. 422–428, 2014.

[112] K. Miled, K. Sab, and R. Le Roy, "Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling," *Mech. Mater.*, vol. 39, no. 3, pp. 222–240, 2007.

[113] G. Bumanis, D. Bajare, J. Locs, and A. Korjakins, "Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 274–281, 2013.

[114] A. Laukaitis, R. Žurauskas, and J. Kerien, “The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 1, pp. 41–47, 2005.

[115] Y. L. Lee and Y. T. Hung, “Exploitation of solid wastes in foamed concrete: Challenges ahead,” in *Use of Foamed Concrete in Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005*, 2005, pp. 15–22.

[116] J. C. Geng, K. Ni, S. Q. Fang, Y. X. Shi, Y. N. Ding, and Y. G. Zhang, “The Effect of Sand/Cement Ratio and Cement Grade on the Compressive Strength of Foam Concrete,” in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 405, pp. 2933–2937.

[117] G. Samson, “Synthèse et propriétés des mousses minérales.” INSA de Rennes, 2015.

[118] E. K. K. Nambiar and K. Ramamurthy, “Influence of filler type on the properties of foam concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 5, pp. 475–480, 2006.

[119] B. Łaźniewska-Piekarczyk, “Influence of anti-foaming admixture and polycarboxylic superplasticizer type on fresh and hardened properties of self-compacting mortar,” *Mag. J.*, vol. 4, pp. 61–71, 2010.

[120] D. Cho, G. Narsimhan, and E. I. Franses, “Adsorption dynamics of native and alkylated derivatives of bovine serum albumin at air–water interfaces,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 178, no. 1, pp. 348–357, 1996.

[121] Z. Wang and G. Narsimhan, “Evolution of liquid holdup profile in a standing protein stabilized foam,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 280, no. 1, pp. 224–233, 2004.

[122] M. A. Bos and T. Van Vliet, “Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 91, no. 3, pp. 437–471, 2001.

[123] M. Coke, P. J. Wilde, E. J. Russell, and D. C. Clark, “The influence of surface composition and molecular diffusion on the stability of foams formed from protein/surfactant mixtures,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 138, no. 2, pp. 489–504, 1990.

[124] P. A. Wierenga, M. B. J. Meinders, M. R. Egmond, A. G. J. Voragen, and H. H. J. de Jongh, “Quantitative description of the relation between protein net charge and protein adsorption to air− water interfaces,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 109, no. 35, pp. 16946–16952, 2005.

[125] I. Cantat *et al.*, *Les mousses: structure et dynamique*. Belin, 2010.

[126] V. Bergeron, “Forces and structure in thin liquid soap films,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 11, no. 19, p. R215, 1999.

[127] C. Stubenrauch and R. Von Klitzing, “Disjoining pressure in thin liquid foam and emulsion films—new concepts and perspectives,” *J. Phys. Condens. matter*, vol. 15, no. 27, p. R1197, 2003.

[128] G. Samson, A. Phelipot-Mardelé, C. Lanos, and C. Baux, “Influence du tensio-actif sur les propriétés des gypses cellulaires,” in *XXXème Rencontres de l’AUGC-IBPSA" Constructions Durables"*, 2012, pp. 10-p.

[129] B. Mazhoud, M. Viel, F. Collet, A. Phelipot-Mardelé, C. Lanos, and S. Prétot, “Is hemp lime concrete a mix of hemp and lime?,” *Acad. J. Civ. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 422–431, 2017.

[130] K.-H. Yang and K.-H. Lee, “Tests on high-performance aerated concrete with a lower density,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 109–117, 2015.

[131] A. Just and B. Middendorf, “Microstructure of high-strength foam concrete,” *Mater. Charact.*, vol. 60, no. 7, pp. 741–748, 2009.

[132] A. M. Neville, “Properties of concrete, Edition: 5.” Prentice Hall, Harlow, England New York, 2011.

[133] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M. T. Blanco-Varela, and V. Calderón, “Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 179–185, 2012.

[134] M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, and R. Černý, “Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 352–359, 2013.

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

[136] VISAGIE M, “The effect of microstructure on the properties of foamed concrete,” University of Pretoria, 2000.

[137] Y. A. Oumeziane, “Evaluation des performances hygrothermiques d’une paroi par simulation numérique: application aux parois en béton de chanvre.” INSA de Rennes, 2013.

[138] T. R. Naik, V. M. Malhotra, and J. S. Popovics, “The ultrasonic pulse velocity method,” in *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition*, CRC Press, 2003, pp. 1–8.

[139] L. Liu, S. Miramini, and A. Hajimohammadi, “Characterising fundamental properties of foam concrete with a non-destructive technique,” *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 34, no. 1, pp. 54–69, 2019.

[140] M. Davraz, Ş. Kilinçarslan, M. Koru, and F. Tuzlak, “Investigation of relationships between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity coefficient in foam concretes,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 130, no. 1, pp. 469–470, 2016.

[141] D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, and E. Gugliandolo, “Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 735–749, 2018.

[142] E. P. Kearsley and P. J. Wainwright, “The effect of porosity on the strength of foamed concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 233–239, 2002.

[143] G. Samson, A. Phelipot-Mardelé, and C. Lanos, “Thermal and mechanical properties of gypsum–cement foam concrete: effects of surfactant,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 12, pp. 1502–1521, 2017.

[144] D. Aldridge, “Introduction to foamed concrete: what, why, how?,” in *Use of foamed concrete in construction: Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005*, 2005, pp. 1–14.

[145] E. Güneyisi, T. Özturan, and M. Gesoğlu, “A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 449–461, 2005.

[146] N. M. Ibrahim, R. Che Amat, N. L. Rahim, and S. Sallehuddin, “Performance of lightweight foamed concrete with replacement of concrete sludge aggregate as coarse aggregate,” in *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 689, pp. 265–268.

[147] S. Ganesan, M. A. Othuman Mydin, M. Y. Mohd Yunos, and M. N. Mohd Nawi, “Thermal properties of foamed concrete with various densities and additives at ambient temperature,” in *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 747, pp. 230–233.

[148] H. Awang and M. H. Ahmad, “Durability properties of foamed concrete with fiber inclusion,” *Int. J. Civil, Struct. Constr. Archit. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 273–276, 2014.

[149] B. Chen and N. Liu, “A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 691–698, 2013.

[150] A. Steshenko, A. Kudyakov, V. Konusheva, and O. Syrkin, “Structure formation control of foam concrete,” in *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1800, no. 1, p. 20001.

[151] H. S. Gökçe, D. Hatungimana, and K. Ramyar, “Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 194, pp. 1–11, 2019.

[152] H. Weigler and S. Karl, “Structural lightweight aggregate concrete with reduced density- lightweight aggregate foamed concrete,” *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 2, no. 2, pp. 101–104, 1980, doi: 10.1016/0262-5075(80)90029-9.

[153] B. Huang, Y. Zhang, and D. X. Li, “Study on the Influences of Foaming Gypsums Performance,” in *Materials Science Forum*, 2013, vol. 743, pp. 222–227.

[154] “Béton cellulaire : qu’est-ce que c’est, quels sont ses avantages ?” .

[155] “Le béton léger : avantages, utilisations, fabrication, prix – Tout sur le béton.” .

[156] “Béton armé : Règles BAEL - Bétons de granulats légers artificiels : Domaines d’application des bétons légers | Techniques de l’Ingénieur.” .

[157] T. Bouziani, “Formulation d’un béton de sable autoplaçant: rôle de la granularité et de dosages des constituants sur le comportement rhéologique,” Université M’Hamed Bougara de Boumerdès, 2012.

[158] SAHRAOUI Mohamed, “Etude de l’influence des sables locaux sur la stabilité statique à l’état frais des bétons auto-plaçants,” Université de Laghouat - Amar Telidji , Laghouat, 2020.

[159] J. Goupy and L. Creighton, *Introduction aux plans d’expériences - 3ème édition - Livre+CD-Rom*. Dunod, 2006.

[160] “NA 442.” .

[161] la farge matine, “ciment-matinetm @ www.lafarge.dz.” https://www.lafarge.dz/ciment-matinetm.

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

[163] “FOAMTEK – Groupe des Sociétés HASNAOUI.” .

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

[165] 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.

[166] “Norme P18-554.” .

[167] “Standard NF EN 1097-2.” .

[168] “Norme P18-598.” .

[169] “Standard NF EN 206-1.” .

[170] “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.”

.

[171] “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.” .

[172] “Standard NF EN 12504-4.” .

[173] “Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.” .

[174] “Standard NF EN 993-15.” .

[175] “Norme NF P18-427.” .

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

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

[178] “ASTM C33 / C33M - 13 Standard Specification for Concrete Aggregates.” .

[179] “Statistical Software. JMP Software from SAS.” .

[180] A. Zambon, “Formulation et caractérisation physique d’un béton léger de mousse et à base d’argile: valorisation des sédiments fins de dragage.” Bordeaux, 2018.

[181] “Standard NF EN 12350-2.” .

[182] “Standard NF EN 206/CN.” .

[183] L. Ferreira, J. De Brito, and M. Barra, “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 63, no. 8, pp. 617–627, 2011.

[184] S. Kou, C. Poon, and F. Agrela, “Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 8, pp. 788–795, 2011.

[185] R. Zaharieva, F. Buyle-Bodin, F. Skoczylas, and E. Wirquin, “Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 2, pp. 223–232, 2003.

[186] K. HADDAD, “Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages.” Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[187] O. HERIHIRI, “Formulation et Caractérisation des Bétons Légers.” Université Mohamed Khider-Biskra, 2010.

[188] B. Debnath and P. P. Sarkar, “Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 213, pp. 643–651, 2019.

[189] B. Debnath and P. P. Sarkar, “Characterization of pervious concrete using over burnt

brick as coarse aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, p. 118154, 2020.

[190] C. Wang, C. G. Salmon, and J. A. Pincheira, "Reinforced Concrete Design , John Willey & Sons," *Inc., Hoboken, NJ*, 2007.

[191] M. ;KAOUDJT H. HOUCHE, "Remerciement."

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

[193] E. Bwayo and S. K. Obwoya, "Thermal Conductivity of insulation brick developed from sawdust and selected Uganda clays," *Int. J. Res. Eng. Technol*, vol. 3, no. 09, pp. 282–285, 2014.

[194] T.-Y. Tu, Y.-Y. Chen, and C.-L. Hwang, "Properties of HPC with recycled aggregates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 943–950, 2006.

[195] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 565–573, 2012.

[196] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V Barai, "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete," *Mater. Struct.*, vol. 44, no. 1, pp. 205–220, 2011.

[197] 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.

[198] B. Rath, "Effect of natural rubber latex on the shrinkage behavior and porosity of geopolymer concrete," *Struct. Concr.*, 2021.

[199] J. T. Kevern, "Reducing the curing requirements of pervious concrete using prewetted lightweight aggregate for internal curing," *Univ. ○ i Missouri^ Kansas City*, 2014.

[200] S. G. Williams and A. M. McFarland, "Roller Compacted Concrete for Roadway Pavement," 2013.

[201] M. Šešlija, N. Radović, D. Jovanov, D. Kukaras, A. Starčev-Ćurčin, and I. Jokanović, "Possibilities of pervious concrete application in road construction," *Teh. Vjesn.*, vol. 25, no. 4, pp. 1202–1212, 2018.

[202] 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.

[203] 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.

[204] P. Shen, J.-X. Lu, H. Zheng, S. Liu, and C. S. Poon, "Conceptual design and performance evaluation of high strength pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, p. 121342, 2021.

[205] H. Peng, J. Yin, and W. Song, "Mechanical and hydraulic behaviors of eco-friendly pervious concrete incorporating fly ash and blast furnace slag," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 6, p. 859, 2018.

[206] N. Neithalath, J. Weiss, and J. Olek, "Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 11, pp. 2074–2085, 2006.

[207] N. U. Kockal and T. Ozturan, "Strength and elastic properties of structural lightweight concretes," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 4, pp. 2396–2403, 2011.

[208] S. Iffat, "Relation between density and compressive strength of hardened concrete," *Concr. Res. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 182–189, 2015.

[209] K. M. A. Hossain, "Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 283–291, 2004.

[210] R. Nemes and Z. Józsa, "Strength of lightweight glass aggregate concrete," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 5, pp. 710–714, 2006.

[211] S. Real, J. A. Bogas, M. da G. Gomes, and B. Ferrer, "Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 68, no. 15, pp. 798–808, 2016.

[212] Q. X. Wang, Y. X. Shi, J. B. Shi, Y. G. Zhang, and W. Liu, "An experimental study on thermal conductivity of ceramsite cellular concrete," in *International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering*, 2015, pp. 64–69.

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

[214] W. Ahmed and C. W. Lim, "Coupling effect assessment of vacuum based pozzolana slurry encrusted recycled aggregate and basalt fiber on mechanical performance of fiber reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, p. 124032, 2021.

[215] 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.

[216] 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.

[217] 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.

[218] O. Y. Bayraktar, H. Soylemez, G. Kaplan, A. Benli, O. Gencel, and M. Turkoglu, "Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H2SO4 and freeze–thaw," *Constr. Build. Mater.*, vol. 302, p. 124229, 2021.

[219] L. T. Van, D. V. Kim, H. N. Xuan, V. D. Tho, B. I. Bulgakov, and O. V Alexandrova, "Modelling of the effect of the water-cement ratios on properties foam concrete," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1425, no. 1, p. 12189.

[220] G. Sang, Y. Zhu, G. Yang, and H. Zhang, "Preparation and characterization of high porosity cement-based foam material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 91, pp. 133–137, 2015.

[221] Z. Liu, K. Zhao, C. Hu, and Y. Tang, "Effect of Water-Cement Ratio on Pore Structure and Strength of Foam Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/9520294.

[222] D. Bouvard *et al.*, "Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 12, pp. 1666–1673, 2007.

[223] N. Sebaibi, F. Khadraoui-Mehir, S. Kourtaa, and M. Boutouil, "Optimization of non-autoclaved aerated insulating foam using bio-based materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120822, 2020.

[224] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, "Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 97–105, 2015.

[225] A. Raj, D. Sathyan, and K. M. Mini, "Physical and functional characteristics of foam concrete : A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 787–799, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052.

[226] J. Kang, B. Zhang, and G. Li, "The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete," *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.*, vol. 27, no. 6, pp. 1144–1148, 2012.

[227] A. Shamsai, K. Rahmani, S. Peroti, and L. Rahemi, "The effect of water-cement ratio in compressive and abrasion strength of the nano silica concretes," *World Appl. Sci. J.*, vol. 17, no. 4, pp. 540–545, 2012.

[228] A. A. Hilal, N. H. Thom, and A. R. Dawson, “Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 12, no. 12, pp. 535–544, 2014.

[229] P. Shawnim and F. Mohammad, “Porosity, permeability and microstructure of foamed concrete through SEM images,” *J. Civ. Eng. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 22–33, 2019.

[230] A. Das, “Microstructure characterization of foamed cement and concrete,” 2018.

[231] N. Narayanan and K. Ramamurthy, “Structure and properties of aerated concrete: a review,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 5, pp. 321–329, 2000.

[232] T. Matusinović, J. Šipušić, and N. Vrbos, “Porosity–strength relation in calcium aluminate cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1801–1806, 2003.

[233] E. P. Kearsley, “The use of foamcrete for affordable development in third world countries,” *Concr. Serv. Mank. Appropr. Concr. Technol.*, vol. 3, p. 232, 2006.

[234] R. Othman *et al.*, “Relation between density and compressive strength of foamed concrete,” *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 11, p. 2967, 2021.

[235] K. K. B. Siram, “Foam Concrete-The Present Generation’s Building Solution,” *Int. J. Civil, Struct. Environ. Infrastruct. Eng. Res. Dev.*, vol. 3, no. 4, pp. 59–62, 2013.

[236] P. Li, H. Wu, Y. Liu, J. Yang, Z. Fang, and B. Lin, “Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 205, pp. 529–542, 2019.

[237] A. Wongsa, V. Sata, P. Nuaklong, and P. Chindaprasirt, “Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 188, pp. 1025–1034, 2018.

[238] D. Nagrockienė and A. Daugėla, “Investigation into the properties of concrete modified with biomass combustion fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 369–375, 2018.

Annexe

Annexe A : Fiches techniques des matériaux utilisés



ALGÉRIE

مَتِين
MATINE

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

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

FICHE TECHNIQUE

01-16

FOAMTEK

AGENT MOUSSEUX SPÉCIFIQUE POUR BÉTONS LÉGERS

TEKNA CHEM

DESCRIPTION

FOAMTEK est un produit au pouvoir mousseux élevé, Spécifiquement étudié pour produire du Béton Cellulaire Léger.

FOAMTEK est en outre stabilisant dans la préparation du béton léger avec ses perles de polystyrène expansées.

CARACTÉRISTIQUE TECHNIQUES

Aspect :.....Liquide

Couleur :.....Brun

Densité (g/cm³, à 15°C) :.....1,00 (± 0,02) g/ml

MODE D'UTILISATION

Il doit être employé avec des équipements approuvés (**équipement TEKNA COMPATEK**).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

- Conserver dans son emballage d'origine bien fermé.
- Stocker dans un endroit sec.
- Il ne doit pas être contaminé par des huiles, essences, solvants, détergents ou autres.
- Eviter l'exposition à des températures inférieures à 0°C.
- Reportez-vous à la fiche de données de sécurité (FDS).

CARACTÉRISTIQUE

Production de mousse :

FOAMTEK, mélangé avec de l'eau et de l'air (voir le tableau 1), dans un état de "turbulence", au moyen d'un équipement (Générateur de Mousse) Fig.2, produit une mousse blanche, dense et crémeuse (Fig.1) parfaitement miscible avec la plupart des liants cimentiers communs.

DOSAGE

Tableau 1

FOAMTEK (litres)	EAU (Litres)	AIR (Litres)
2,5	100	1400 -1500

PRODUCTION BCL (Béton Cellulaire Léger)

La mousse produite avec **FOAMTEK** correctement mélangée avec des coulis de ciment ou avec des mortiers de sable et de ciment, permet la préparation d'un matériau, appelé Béton Cellulaire Léger (BCL), dans lequel sont répartis uniformément d'innombrables minuscules bulles d'air.

En variant le rapport entre la mousse, le ciment et le sable, on obtient par rapport aux spécifications de conception, un béton cellulaire léger de poids spécifique variable entre 300 et 1800 kg/m³.

Fig 1



Fig 2



Un générateur de mousse transforme l'agent moussant liquide en mousse.

TEKNA CHEM

Siège & Usine :
B.P. 203 Zone Industrielle de Sidi-Bel-Abbès
Tél. : + 213 (0) 48 70 34 63
Fax : + 213 (0) 48 70 34 62
E-mail : info@teknachem.com
WWW.TEKNACHEM.COM

Antenne d'Alger :
Rue de la Soummam lot N° 06 Z.I. Oued Smar Alger
Tél./Fax : + 213 (0) 23 92 05 62

Antenne de Sétif :
Zone d'Activité Artisanale 6ème Tranche - Sétif
Tél. : + 213 (0) 36 93 90 10 - Fax : + 213 (0) 36 93 90 60

Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispense pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans ses propres conditions d'emploi ou à faire appel à l'assistance technique de la société. Par conséquent la **TEKNACHEM ALGERIE SARL** décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.

Annexe B 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 ».

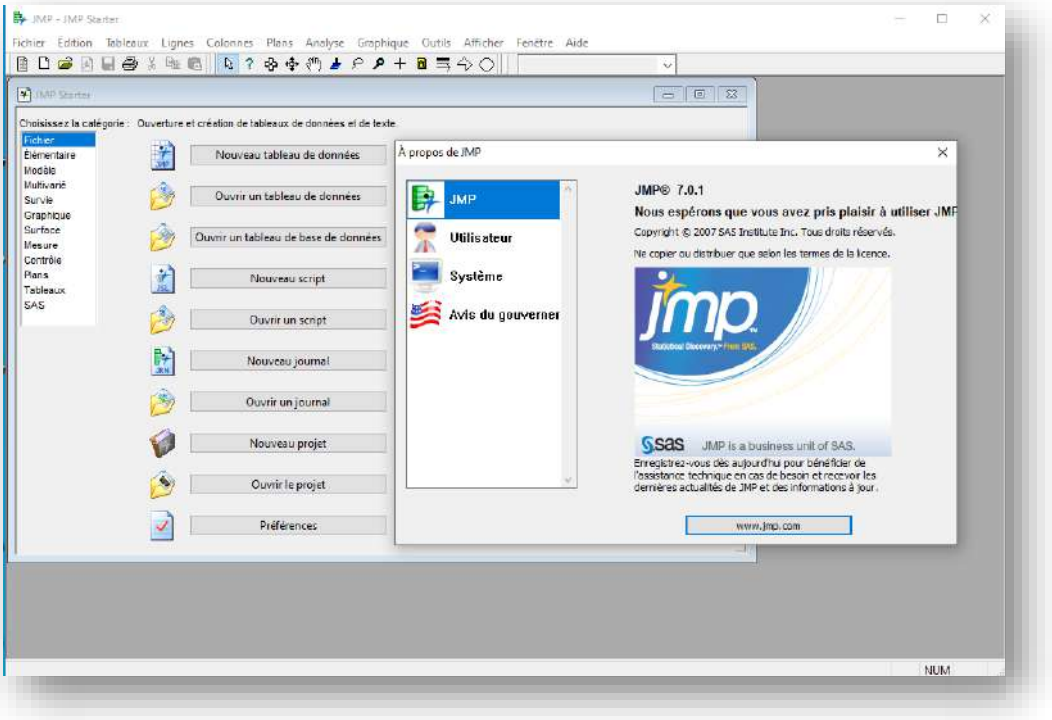


Figure B. 1 L'interface de logiciel JMP (Version 2007)

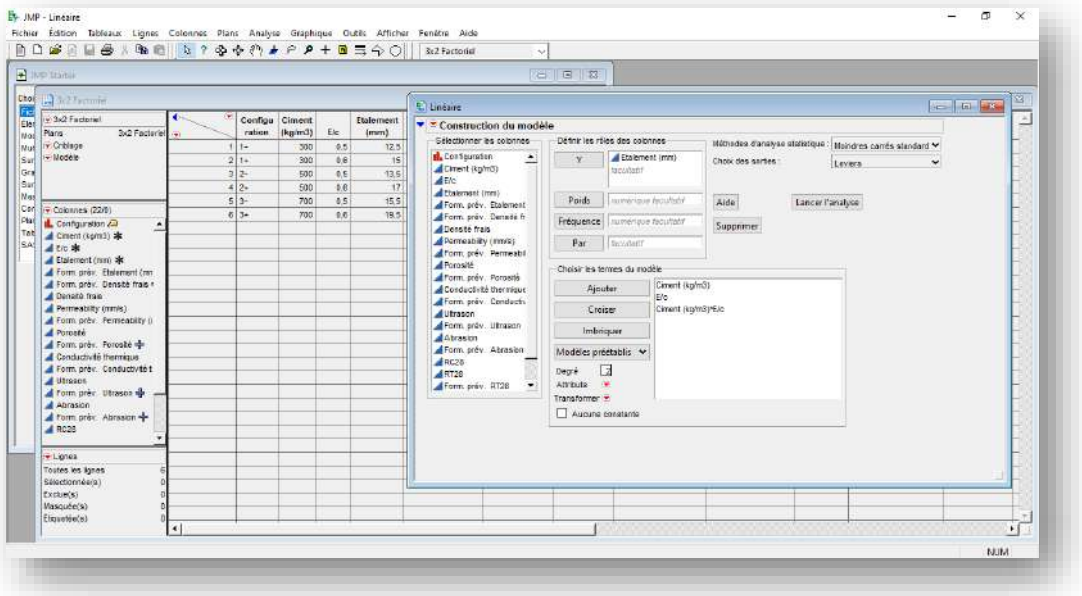


Figure B. 2 La régression par la méthode des moindres carrés standard

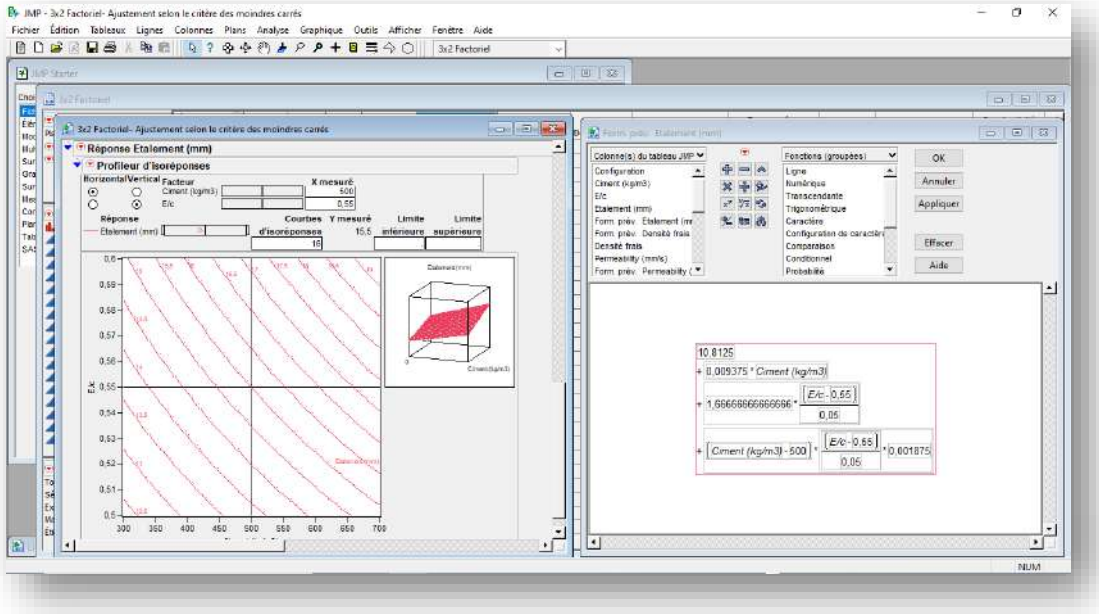


Figure B. 3 La génération des modèles postulés et le traçage des courbes isoréponses



L’analyse granulométrique par tamisage



Le générateur de mousse développé



Détermination de la masse volumique absolue à l'aide de pycnomètre



La mousse utilisé dans l’étude



BT



BD100



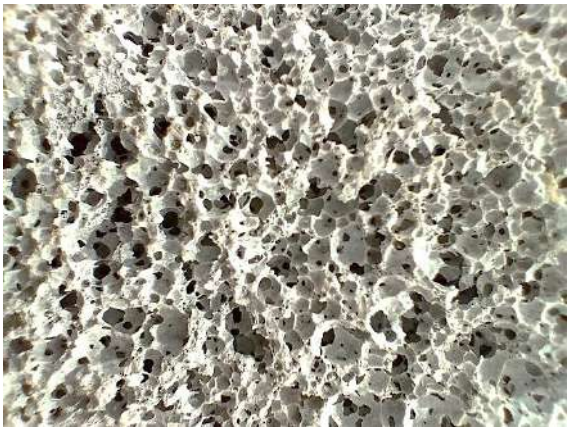
BD25



BD50



BD75



BMD avec ciment=300 kg/m^3 et E/C=0.5



BMD avec ciment=300 kg/m^3 et E/C=0.6



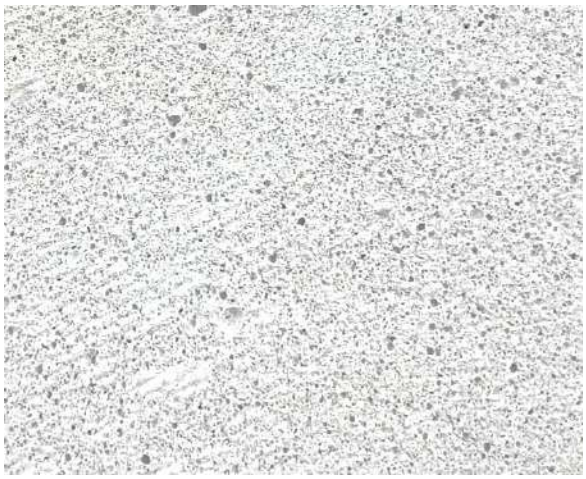
BMD avec ciment=500kg/m^3 et E/C=0.5



BMD avec ciment=500kg/m^3 et E/C=0.6



BMD avec ciment=700 kg/m^3 et E/C=0.5



BMD avec ciment=700 kg/m^3 et E/C=0.6