

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie civil.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil Spécialité : structure

Par

- Alloune Ranya
- Messadek Aya
- Lahouassa Ayoub

Intitulé

Optimisation des pavés drainants pour une meilleure gestion des eaux pluviales

Soutenu le : 28 juin 2026

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Belkadi Ahmed Abderraouf</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Kessal Oussama</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement :

Avant tout, nous remercions Allah le Tout Puissant de nous avoir donné la force, le courage, la patience et la volonté tout au long de nos années d'études.

Nous adressons nos sincères remerciements à M. Belkadi Ahmed Abderraouf et à M. Kessal Oussama

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à Mme Rim, ingénieure de laboratoire, pour sa disponibilité, son aide précieuse, ses conseils avisés et son accompagnement lors de la réalisation des essais expérimentaux.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil, pour la qualité de leur enseignement et leur contribution à notre formation.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

Avant tout, je remercie Allah , de m'avoir donné la force, la patience et la volonté tout au long de mes études.

Du plus profond de mon cœur, je dédie ce modeste travail :

À mon très cher père, pour tous les sacrifices qu'il a consentis pour mon bien-être, son soutien indéfectible et tous les efforts qu'il a fournis afin de m'assurer un meilleur avenir.

À ma très chère mère, pour ses douâa, son amour infini, ses sacrifices et ses conseils en or qui m'ont toujours guidée.

À mes frères, Ramzi et Adem, ainsi qu'à mon grand frère Zakí, à son épouse et à leur petite famille, pour leur affection et leurs encouragements.

À ma très chère sœur Bouthaina, pour son amour, son soutien permanent et ses encouragements qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours.

À mes trínômes, Ayoub et Aya, avec qui j'ai partagé les meilleurs moments de ce projet.

À toutes mes amies, chacune par son nom, spécialement pour Hanane, pour son amitié sincère et son soutien.

À mes cousines, à mes grands-parents, pour leur affection et leurs prières. À toute la promotion de Génie Civil, avec qui j'ai partagé ces années d'études

Ranya

Dédicace :

وَأَخِرْ وَعَوِّدْهُمْ أَنْ الْعَمْدَ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ "

Premièrement je remercie "Allah" le Tout-Puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

À mes chers parents, « la première raison de mon succès », pour leur amour et leur patience.

À ma grande sœur et ma deuxième mère IKRAM pour son soutien et ses encouragements dans ma vie, à son mari TAHA, ainsi qu'à leur future petite princesse ROHA.

À ma petite sœur DOUAA et à mes frères ABDENOUR et ABDRAHIM, que Dieu vous garde pour moi.

À mes trînomes, RANYA et AYOUB, pour les efforts partagés tout au long de ce projet.

À Altair, une étoile qui a illuminé une partie de ce parcours.

À ma chère tante RAZIKA pour son amour.

À mes copînes BASMA, HANANE, HADIL et MARWA, pour leur aide, leur soutien.

À toute ma famille, et à toute la promotion de Génie Civil 2026, chacun(e) par son nom, pour tous les moments de partage, d'entraide et de souvenirs inoubliables.

Aya.

Dédicace :

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :
À l'être le plus cher de ma vie, ma mère, pour son amour,
ses encouragements, ses sacrifices et son soutien
indéfectible tout au long de mon parcours.*

*À mon père, celui qui a fait de moi l'homme que je suis
aujourd'hui, pour sa présence constante à mes côtés, son
soutien, ses conseils et ses encouragements.*

*À ma grand-mère, que Dieu la protège et lui accorde une
longue vie.*

*À mes chères sœurs, sources de joie, de bonheur et de
réconfort.*

*À toute ma famille, pour son affection, son soutien et la
motivation qu'elle m'a toujours apportés.*

*À mes trinômes, Ranya et Aya, avec qui j'ai partagé les
efforts, les défis et tous les moments partagés tout au long
de ce projet.*

À tous mes amis, sans exception,

*Enfin, à toute la promo de Génie Civil 2026, à qui je
souhaite un avenir plein de réussite, de bonheur et de
succès.*

Ayoub

Résumé :

Face aux défis croissants liés à la gestion durable des eaux pluviales, à la réduction de l'imperméabilisation des surfaces urbaines et à la limitation de l'impact environnemental des matériaux de construction, le développement de revêtements drainants innovants constitue une solution prometteuse. Les pavés drainants permettent l'infiltration des eaux de pluie vers le sol, réduisant ainsi le ruissellement de surface et les risques d'inondation tout en contribuant à la recharge des nappes phréatiques.

Ce mémoire porte sur l'étude comparative des pavés drainants à base de ciment et des pavés drainants à base de géopolymère. Les géopolymères représentent une alternative écologique aux liants cimentaires traditionnels grâce à leur faible empreinte carbone et à la valorisation de sous-produits industriels riches en aluminosilicates.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'influence du type de liant sur les propriétés physiques, hydrauliques et mécaniques des pavés drainants afin d'identifier la formulation la plus performante et la plus adaptée aux exigences des aménagements urbains durables. Pour atteindre cet objectif, une campagne expérimentale a été menée comprenant la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation des mélanges, la fabrication des pavés ainsi que la réalisation de plusieurs essais normalisés.

Les propriétés étudiées concernent principalement la résistance à la compression, l'absorption d'eau, la porosité et la perméabilité. Les résultats obtenus ont permis de comparer les performances des pavés drainants en ciment et en géopolymère et de mettre en évidence l'influence du liant sur leur comportement. Cette étude montre que les pavés drainants géopolymériques constituent une alternative prometteuse aux pavés traditionnels en ciment, tout en assurant les performances requises pour une gestion efficace des eaux pluviales et une construction plus respectueuse de l'environnement.

Mots-clés : pavés drainants, ciment, géopolymère, perméabilité, porosité, absorption d'eau, résistance à la compression, gestion des eaux pluviales, développement durable.

Absract:

In the context of increasing challenges related to sustainable stormwater management, the reduction of urban surface impermeability, and the mitigation of the environmental impact of conventional construction materials, the development of innovative and environmentally friendly building materials has become essential. Permeable paving blocks represent an effective solution by allowing rainwater to infiltrate into the ground, thereby reducing surface runoff, minimizing flood risks, and contributing to groundwater recharge.

This study focuses on a comparative investigation of permeable paving blocks produced with cement and geopolymer binders. Geopolymers are considered a promising eco-friendly alternative to conventional cementitious binders due to their lower carbon footprint and their ability to utilize aluminosilicate-rich materials.

The main objective of this research is to evaluate the influence of the binder type on the physical, hydraulic, and mechanical properties of permeable paving blocks in order to identify the most efficient and suitable formulation for sustainable urban infrastructure applications. To achieve this objective, an experimental program was conducted, including the characterization of raw materials, mixture design, specimen preparation, and the performance of several standardized tests.

The investigated properties mainly include compressive strength, water absorption, porosity, and permeability. The obtained results enabled a comparison between the performance of cement-based and geopolymer-based permeable paving blocks and highlighted the influence of the binder on their behavior. The findings indicate that geopolymer permeable paving blocks constitute a promising alternative to conventional cement-based paving blocks while providing the required performance for effective stormwater management and environmentally sustainable construction.

Keywords: Permeable paving blocks, cement, geopolymer, permeability, porosity, water absorption, compressive strength, stormwater management, sustainable development.

الملخص

في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بالإدارة المستدامة لمياه الأمطار، والحد من ظاهرة عدم نفاذية الأسطح الحضرية، وتقليل الأثر البيئي لمواد البناء التقليدية، أصبح تطوير مواد بناء مبتكرة وصديقة للبيئة ضرورة ملحة. وتُعد الأرصفة النافذة للمياه من الحلول الفعالة التي تسمح بتسرب مياه الأمطار إلى التربة، مما يساهم في الحد من الجريان السطحي . وتقليل مخاطر الفيضانات، بالإضافة إلى تعزيز تغذية المياه الجوفية .

تتناول هذه المذكرة دراسة مقارنة بين الأرصفة النافذة للمياه المصنوعة بالإسمنت وتلك المصنوعة بالجيوبوليمر. ويُعتبر الجيوبوليمر بديلاً بيئياً واعداً للإسمنت التقليدي، نظراً لانخفاض بصمته الكربونية وإمكانية إنتاجه من مواد غنية بالألومينوسيليكا.

يتمثل الهدف الرئيسي من هذه الدراسة في تقييم تأثير نوع المادة الرابطة على الخصائص الفيزيائية والهيدروليكية والميكانيكية للأرصفة النافذة للمياه، وذلك من أجل تحديد التركيبة الأكثر كفاءة وملاءمة لمتطلبات التهيئة الحضرية المستدامة. ولتحقيق هذا الهدف، تم إنجاز برنامج تجريبي شمل توصيف المواد المستعملة، وتحضير الخلطات المختلفة، وتصنيع النماذج، ثم إجراء مجموعة من الاختبارات المعيارية

وقد ركزت الدراسة على تقييم عدة خصائص، أهمها مقاومة الضغط، وامتصاص الماء، والمسامية، والنفاذية. وأظهرت النتائج المتحصل عليها وجود فروق في أداء الأرصفة تبعاً لنوع المادة الرابطة المستعملة، كما بينت أن الأرصفة المصنوعة بالجيوبوليمر تمثل بديلاً واعداً للأرصفة الإسمنتية التقليدية، مع الحفاظ على الخصائص المطلوبة لضمان تصريف فعال لمياه الأمطار والمساهمة في تحقيق مبادئ التنمية المستدامة

الكلمات المفتاحية: الأرصفة النافذة للمياه، الإسمنت، الجيوبوليمر، النفاذية، المسامية، امتصاص الماء، مقاومة الضغط، إدارة مياه الأمطار، التنمية المستدامة

Liste des tableaux :

Chapitre 1 :

Tableau 1 : Classification des sols selon le coefficient de perméabilité k.....36

Tableau 2 : Matériaux recommandés.....39

Tableau 3 : différences entre Les pavés drainants Halter Classic de la gamme Eco solutions d'Ebema_LivingCity et notre projet.....51

Chapitre 2 :

Tableau 4 : composition chimique élémentaire de ciment Lafarge CEM II 42.5.....55

Tableau 5 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment55

Tableau 6 : Compositions des différents mélanges du pavés drainants (pour 1 cube 10*10*10).....56

Tableau 7 : Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.....59

Tableau 8 : formulation de géopolymère pour une éprouvette de 16*16*461

Tableau 9: Analyse granulométrique du gravier 3/8.....63

Tableau 10: Analyse granulométrique du gravier 8/15.....64

Listes des figures :

Chapitre I :

Figure1 : trottoir pavé-de-rue moitié-du 19^{ème} siècle 24

Figure2 : Ambrussum_voies_marquées_ 10-04-2006 Oppidum romain d'Ambrussum voies pavées.XIIe siècle.....24

Figure3 : Rue-Lafayette-Promenades-dans-Paris-en-1889 photographie-de- Léon-et Lévy	
Les chaussées et trottoirs des rues parisiennes au XIXe siècle	24
Figure4 : Pavés en béton à joints élargis.....	28
Figure5 : Pavés en béton avec ouvertures de drainage.....	28
Figure6 : Dalles-gazon en béton.....	30
Figure7 : Pavés de béton hybrides.....	30
Figure 8 : Pavés en béton poreux	31
Figure 9 : Echantillon d'un ciment.....	31
Figure10 : Echantillon d'un sable.....	32
Figure11 : Echantillon d'un gravier 3/8.....	32
Figure12 : Echantillon d'un gravier 8/15.....	32
Figure13 : photo représente les couches de drainage.....	34
Figure14 : Méthode Open-End (méthode à charge constante).....	34
Figure15 : La méthode de puits.....	35
Figure16 : Conception et évacuation de l'eau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) sol très perméable.....	37
Figure17 : Conception et évacuation de l'eau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) Sol a bonne perméabilité.....	37

Figure18 : Conception et évacuation de leau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) sol modérément voire peu perméable(Moyenne/mauvaise).....	38
Figure19 : Conception et évacuation de leau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008)aucune infiltration possible(Quasiment imperméables).....	38
Figure20 : Processus de géo-polymérisation (Chandrakanth and Koniki 2020).....	45
Figure21 : Transformation de cendres volantes dans le béton géopolymère (Adams 2017).....	46
Figure22 : Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994.....	50
Figure23 : Les pavés drainants Halter Classic de la gamme Eco Solutions d'Ebema_LivingCity.....	51
Chapitre II:	
Figure24 : échantillon d'un gravier3/8.....	56
Figure25 : le lavage du gravier 3/8	56
Figure26 : le malaxeur.....	57
Figure27 : le moulage.....	57
Figure28 : les échantillons démoulésμ.....	58
Figure29 : le bac d'eau.....	58
Figure30 : Silicate de sodium.....	59

Figure31 : préparation de la solution de l'NaOH.....	60
Figure32 : LHF laitier de haut fourneau.....	61
Figure33 : Différents états du mélange géopolymérique.....	62
Figure34 : moule (4*4*16) rempli d'un échantillon de géopolymère.....	62
Figure35 : Courbe granulométrique du gravier 3/8.....	64
Figure36 : Courbe granulométrique du gravier 8/15.....	65
Figure37: résistance à la flexion géopolymère.....	65
Figure38 : résistance à la flexion ciment.....	65
Figure39 : résistance à compression ciment.....	66
Figure40 : résistance à la compression géopolymère.....	66
Figure41 : les échantillons pendant le cycle de gel dégel.....	67
 Chapitre III :	
Figure 42 : Résistance à la compression de différents mélanges.....	70
Figure 43 : Résultat de l'absorption d'eau.....	72
Figure 44 : Résultat de la masse volumique sec.....	73
Figure 45 : Résultats de la résistance à la compression résiduelle.....	74
Figure46 : résultat de la perméabilité	78

Table des matières :

<i>Dédicace</i> :	4
Résumé :	7
Abstrac :	8
المخلص	9
Liste des tableaux :	10
Liste des figures :	10
Introduction général :	19
Chapitre I : État de l'art	22
I.1 Introduction générale :	23
I.2 Historique des pavés et revêtements perméables :	23
I.3 DEFINITION ET TYPES DE PAVÉS :	25
I.3.1 Définition des pavé :	25
I.3.2 Types des pavés :	25
I.4 Types de pavés drainants et matériaux utilisés :	27
I.4.1 Type des pavés drainants :	27
I.4.2 matériaux utilisés :	31
1 Ciment:	31
2 Granulats	32
3 L'eau	33
I.5 Principes de fonctionnement hydrologique	33
I.5.1 Infiltration à travers la structure de pavés :	33

I.5.2 stockage et portance :	33
I.5.3 infiltration dans le sol :	33
I.6 Gestion des eaux pluviales selon la perméabilité du sol :	36
I.6.1 La nature de matériaux utilisée dans la structure de drainage (les couches sous pavé):	39
I.7 Avantages et limites des pavés drainants.....	39
I.7.1 Avantages des pavés drainants :	39
I.7.2 Limites des pavés drainants :	41
II Géopolymère :	43
II.1 Historique des géopolymères :	43
II.2 définition de géopolymer :	44
II.3 Les matériaux de bases de géopolymère :	45
II.3.1 Précurseurs aluminosilicates :	45
II.3.1.1 Différents types de géopolymère :	45
II.3.2 Activateurs alcalins :	47
II.4 Avantages et inconvénients des géopolymère :	48
II.4.1 Avantages des géopolymères:	48
II.4.2 Inconvénients des géopolymères :	49
II.5 Applications des géopolymères :	49
II.6 pavé drainant en geopolymer :	51
Conclusion:	52

Chapitre II: Matériaux et méthode expérimentale	54
II.1.Introduction générale :	54
II.2 Les matériaux utilisés pour le pavé drainant ordinaire :	54
II.3 Formulation du béton drainant :	56
II.4 Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes :	57
II.5 Les matériaux utilisés pour les paves drainants en géopolymère :	58
II.5.1 Activeurs :	58
II.5.2 Précurseurs :	60
II.5.3 Le gravier :	61
II.6 Formulation des géopolymères :	61
II.7 Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes :	61
II.8 Essais expérimentaux :	62
II.8.1 Analyse granulométrique :	62
II.8.2 Résistances mécaniques :	65
II.8.3 Essai de gel/dégel :	67
II.8.4 Perte de masse :	68
II.8.5 Essai d'absorption d'eau :	68
II.8.6 Essai de perméabilité. :	68
Conclusion :	68
Chapitre III : Résultat et discussion.....	70
III.1. Introduction :	Erreur ! Signet non défini.

III.2. Résistance a la comprésion.....	71
III.3. Absorption d'eau :.....	73
III.4. Masse volumique.....	74
III.5. Résistance aux cycle gel dégel	75
III.6.Perméabilité.....	76
III.7. Conclusion :	78
Conclusion générale :	79

Introduction général

Introduction général :

- **Contexte et intérêt des pavés drainants :**

Au cours des dernières décennies, la croissance accélérée de l'urbanisation s'est traduite par une augmentation notable des surfaces imperméabilisées, notamment les voiries, les aires de stationnement et les infrastructures industrielles. Cette transformation des sols perturbe profondément le cycle hydrologique naturel en limitant l'infiltration des eaux pluviales et en favorisant le ruissellement de surface (Fletcher et al., 2015). En conséquence, les réseaux d'assainissement sont davantage sollicités, ce qui accroît le risque de surcharge hydraulique et d'inondations, particulièrement lors d'événements pluvieux intenses. [1]

Par ailleurs, les eaux de ruissellement constituent un vecteur de transport de polluants variés, tels que les hydrocarbures, les métaux lourds et les matières en suspension, contribuant ainsi à la dégradation des écosystèmes aquatiques. La réduction de l'infiltration entraîne également une diminution de la recharge des nappes phréatiques, ce qui représente un enjeu critique dans un contexte marqué par une pression croissante sur les ressources en eau. [2]

Face à ces problématiques, les approches conventionnelles de gestion des eaux pluviales, reposant principalement sur leur collecte et leur évacuation rapide, apparaissent désormais insuffisantes. Il devient alors essentiel de privilégier des stratégies alternatives basées sur la gestion à la source et l'intégration de solutions durables. [3]

Dans ce cadre, les pavés drainants constituent une solution technique pertinente. Ces revêtements perméables se distinguent par leur capacité à permettre l'infiltration de l'eau à travers leur structure poreuse ou leurs joints, contribuant ainsi à restaurer partiellement les fonctions hydrologiques naturelles. L'eau infiltrée peut être temporairement stockée dans les couches de fondation avant de s'infiltrer progressivement dans le sol ou d'être évacuée de manière contrôlée. [4]

Les avantages associés à l'utilisation des pavés drainants sont multiples. Ils permettent notamment de réduire le volume et le débit de ruissellement, de limiter les risques d'inondation et de favoriser la recharge des aquifères. De plus, ils participent à l'amélioration de la qualité des eaux grâce à des mécanismes de filtration physique, chimique et biologique. Par ailleurs, ces dispositifs contribuent à l'atténuation des îlots de chaleur urbains en favorisant les échanges thermiques et l'évaporation. [5]

D'un point de vue environnemental, l'intégration de matériaux alternatifs tels que les géopolymères dans la fabrication des pavés drainants offre des perspectives prometteuses. Ces liants innovants présentent un impact environnemental réduit, notamment en termes d'émissions de CO₂, tout en assurant des performances mécaniques satisfaisantes et une durabilité accrue. [6]

En définitive, les pavés drainants s'inscrivent dans une approche de gestion durable et intégrée des eaux pluviales. Ils constituent une réponse adaptée aux défis contemporains liés à l'urbanisation, au changement climatique et à la préservation des ressources hydriques. [7]

- **Problématique et enjeux environnementaux :**

L'imperméabilisation progressive des sols en milieu urbain représente un enjeu majeur dans la gestion contemporaine des eaux pluviales. En effet, l'extension des surfaces imperméables limite considérablement l'infiltration naturelle des précipitations, entraînant une augmentation significative du ruissellement de surface. Cette dynamique hydrologique modifiée engendre une surcharge des réseaux d'assainissement et accroît la fréquence ainsi que l'intensité des phénomènes d'inondation, notamment lors d'événements pluvieux extrêmes. [1]

En outre, les eaux de ruissellement urbaines constituent un vecteur de transport de nombreux contaminants issus des activités anthropiques, tels que les hydrocarbures, les métaux lourds et les matières en suspension. Ces polluants contribuent à la dégradation de la qualité des milieux récepteurs et des ressources en eau. Par ailleurs, la diminution de l'infiltration compromet la recharge naturelle des nappes phréatiques, ce qui constitue un enjeu critique, en particulier dans les régions confrontées à un stress hydrique croissant. [8]

Dans ce contexte, les enjeux environnementaux associés à la gestion des eaux pluviales sont multiples et interdépendants. Ils incluent notamment la réduction des risques d'inondation, la protection de la qualité des eaux superficielles et souterraines, la gestion durable des ressources hydriques, ainsi que l'adaptation aux effets du changement climatique. [9]

Ainsi, la prise en compte de ces problématiques nécessite le développement et la mise en œuvre de solutions alternatives intégrées, visant à restaurer les fonctions hydrologiques naturelles tout en limitant les impacts environnementaux liés à l'urbanisation. [10]

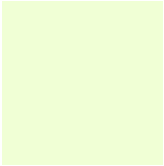
- **Objectifs du mémoire :**

Ce mémoire vise à analyser les pavés drainants comme solution innovante à la problématique de l'imperméabilisation urbaine, en combinant revue théorique, expérimentation et évaluation environnementale, dans le cadre du génie civil durable. Objectifs généraux L'objectif principal est d'évaluer le potentiel des pavés drainants, notamment à base de géopolymères, pour optimiser la gestion des eaux pluviales, en réduisant le ruissellement et en rechargeant les nappes phréatiques locales, face aux risques d'inondations croissants.

Objectifs spécifiques Caractériser les performances hydromécaniques : mesurer la résistance mécanique via essais in situ et laboratoire, en comparaison avec les bétons traditionnels.

1. Étudier l'impact environnemental : Quantifier la réduction des émissions CO₂ (géopolymères : -80% vs Portland).
2. Développer une méthodologie expérimentale : Concevoir des prototypes drainants, tester leur durabilité (cycles gel/dégel).

Ces objectifs guident la structure en trois chapitres : état de l'art (synthèse bibliographique), méthode expérimental (protocoles et données), et résultats discussion.



Chapitre I : État de l'art

Chapitre I : État de l'art.

I.1 Introduction générale :

La gestion durable des eaux pluviales est devenue un enjeu important face à l'urbanisation croissante et à l'imperméabilisation des sols. Les pavés drainants constituent une solution efficace permettant l'infiltration des eaux de pluie tout en assurant la fonctionnalité des surfaces de circulation. Par ailleurs, les géopolymères représentent une alternative écologique aux matériaux cimentaires traditionnels. Ce chapitre présente les principaux concepts liés aux pavés drainants, leur fonctionnement, leurs avantages et leurs limites, ainsi qu'un aperçu des géopolymères, de leurs caractéristiques et de leurs applications dans la fabrication de pavés drainants.

I.2 Historique des pavés et revêtements perméables :

Les revêtements perméables c'est une solution ancienne et naturelle de gestion des eaux pluviales, utilisée dès les premières formes d'urbanisation ou les sols (terre, graviers) permettaient une infiltration directe de l'eau sans recourir à des infrastructures spécifiques. Dès l'Antiquité, les voies romaines illustrent l'utilisation de chaussées pavées, témoignant de la durabilité de ces techniques. Et au moyen âge à partir du XII^e siècle (12^{ème} siècle 1101/1200), l'essor urbain et le développement du trafic commercial conduisent au remplacement progressif des rues en terre battue par des chaussées pavées, mieux adaptées aux contraintes de circulation.

Au XIX^e siècle (19^{ème} siècle 1801/1900), avec la révolution hygiéniste On pensait que les maladies venaient des miasmes (gaz provenant de l'humidité et des sols) Donc, il fallait empêcher l'eau de s'infiltrer dans le sol. En imperméabilisant les surfaces urbaines, Cette évolution a conduit au remplacement progressif des pavés par des revêtements plus modernes, notamment les enrobés bitumineux, en raison du bruit de roulement, de l'inconfort et en raison de leur facilité de mise en œuvre, de leur rapidité d'exécution et de leur coût relativement faible, transformant ainsi la ville en un système étanche où les eaux sont évacuées par des réseaux d'assainissement.

Dans les années 1970 les pays développés, on redécouvre les avantages des surfaces perméables tels que la réduction des inondations, la recharge des nappes phréatiques et la protection de l'environnement. Les premières applications modernes incluent notamment les parkings végétalisés et les dalles alvéolaires en plastique, permettant à la fois l'infiltration de l'eau et la résistance aux charges. Par la suite, les revêtements poreux à

base de liants bitumineux ou de béton, initialement utilisés pour des usages spécifiques comme les terrains de sport, se sont largement développés à la fin du XX^e siècle (20^{ème} siècle), et Au début du XXI^e siècle, les industriels développent des bétons poreux « coulés » en place et une large gamme de pavés avec différents niveaux de porosité de joint, pour répondre à des usages variés (parkings, trottoirs, cours, voies). [11]



Figure 1 : trottoir-pavé-de-rue moitié-du 19^{ème} siècle



Figure 2 : Ambrussum_voies_marquées_ 10-04-2006 Oppidum romain d'Ambrussum
voies pavées.XIIe siècle



Figure 3 : Rue-Lafayette-Promenades-dans-Paris-en-1889 photographie-de- Léon-et
Lévy Les chaussées et trottoirs des rues parisiennes au XIXe siècle

I.3 DEFINITION ET TYPES DE PAVÉS :

I.3.1 Définition des pavé :

Les pavés sont des éléments de construction préfabriqués , destinés à la réalisation de revêtements de surface pour les aménagements urbains et routiers. Ils sont utilisés principalement pour le dallage des trottoirs, des places publiques, des parkings, des allées piétonnes et parfois des voies à trafic léger ou modéré.

Leur conception modulaire permet une mise en œuvre simple et rapide, tout en assurant une bonne répartition des charges grâce à leur assemblage imbriqué. Les pavés sont posés sur une couche de fondation granulaire qui assure la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

I.3.2 Types des pavés :

Du béton au calcaire et au-delà, voici 14 types de pavés fabriqués à partir de différents matériaux, ainsi que les avantages et les considérations de chaque type.

1. Pavés de béton :

Les pavés de béton sont composés d'un mélange de ciment et de granulats qui est moulé, puis séché à l'air. Durables et résistants aux intempéries, les pavés en béton sont idéaux pour plusieurs espaces extérieurs, tels que les entrées de garage, les patios et les allées.

2. Pavés en briques :

Datant de 14,000 XNUMX avant J.-C., l'argile est le matériau de construction le plus ancien connu, et c'est à partir de celui-ci que sont fabriqués les pavés en briques. moulé à partir d'un mélange d'argile naturelle et cuits au four, leur donnant une teinte brune ou rougeâtre.

3. Pavés Calcaires :

À partir de la Grand sphinx de Giza à l'Empire State Building dans la Grosse Pomme, le calcaire est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus largement utilisés à côté de l'argile. Représentant environ un dixième de toutes les roches sédimentaires, ce produit en pierre naturelle est facilement accessible aux États- Unis. Les pavés Calcaire peuvent être polis pour créer une finition lisse et brillante ou ils peuvent conserver une texture naturelle et rugueuse pour un aspect plus rustique.

4. Pavés texturés :

Le pavé texturé est extrait de dépôts de roches sédimentaires et est divisé en pavés minces

et plats. Les pavés texturés sont antidérapants et se présentent sous des formes uniques, parfois irrégulières, qui peuvent s'assembler comme un puzzle. Si vous recherchez des pavés en pierre, Unilock Beacon Hill™ Texturé est un choix populaire que nous proposons.

5. Dalles de pierre bleue :

Exploitée dans le monde entier, la pierre bleue est un grès dense à grain fin composé de particules de quartz et de composés de sable. Très polyvalente, la pierre bleue peut être taillée en différentes tailles et formes pour répondre à un large éventail de besoins en matière d'aménagement paysager.

6. Dalles en marbre :

Connu pour leur beauté et élégance, les pavés et dalles en marbre sont généralement utilisés pour des projets de maison tels que des comptoirs, des murs d'accent et des revêtements de sol de terrasse pour offrir une finition sophistiquée. Le marbre se forme lorsque le calcaire est exposé à une chaleur et une pression extrêmes.

7. Pavés en travertin :

Le travertin est composé de calcaire qui est formé par des gisements minéraux provenant de sources chaudes naturelles. Il est connu pour sa texture unique et poreuse et ses tons chauds et terreux.

8. Pavés en porcelaine :

Les pavés en porcelaine sont des matériaux céramiques conçus pour ressembler à la pierre naturelle, mais ils sont plus durables et résistants aux intempéries et aux taches. Les pavés en porcelaine sont fabriqués par cuisson également connu sous le nom d'argile de Chine, dans un four. [12]

9. Pavés en forme de Galet :

Un choix populaire pour paver les rues européennes, les pavés ont existé depuis des décennies grâce à leur durabilité et leur esthétique. Les pavés en forme de Galet sont généralement en granit, basalte ou calcaire et façonnés en cercles ou en carrés rugueux.

10. Pavés en caoutchouc :

Les pavés en caoutchouc sont appréciés pour leur sécurité et leurs qualités antidérapantes, offrant une surface confortable qui réduit le risque de blessures dues aux chutes. Ils ont aussi des propriétés d'absorption des chocs, ce qui les rend confortables pour marcher et rester debout pendant une période prolongée. Les pavés en caoutchouc sont fabriqués à partir de caoutchouc recyclé, généralement à partir de vieux pneus.

11. Gravier

Le gravier, ou pierre concassée, est composé d'un agrégat de fragments de roche. Construits pour fournir une surface stable et plane pour la circulation des piétons ou des véhicules, les pavés de gravier laissent l'eau s'écouler à travers la surface et dans le sol en dessous.

12. Pavés en granit

Le granite est une roche à grains grossiers et de couleur claire composée de quartz, de plagioclase et de feldspath alcalin. C'est formé lorsque les matériaux fondus refroidissent et se solidifient sous la surface de la terre. Bien que le granit soit couramment utilisé dans les comptoirs, les marches d'escalier et les carreaux de sol intérieurs, il est également utilisé pour des projets extérieurs tels que les allées.

13. Pavés en plastique

Bien que les pavés en plastique ne puissent rivaliser en termes de durabilité, ils constituent une alternative plus rentable aux produits de pavage traditionnels. Ils peuvent être recyclés ou fabriqués et sont disponibles sous plusieurs formes, des répliques de pierres aux pavés même. Les pavés en plastique ne sont généralement qu'une option pour les allées ayant un objectif esthétique, comme une petite allée de jardin.

14. Pavés drainants :

Excellent choix de pavé écologique, le pavé drainant laisse pénétrer l'eau afin de reconstituer plus rapidement les nappes phréatiques et limiter les inondations en cas de forte pluie. Il est tout à fait adapté à une cour ou un jardin [13]

I.4 Types de pavés drainants et matériaux utilisés :

I.4.1 Type des pavés drainants :

1. Pavés en béton à joints élargis:

Les pavés en béton à joints élargis sont des pavés de béton classiques dont les butées latérales ont été modifiées pour créer des joints plus larges, généralement de 5 à 30 mm, représentant au moins 10% de la surface revêtue. L'eau de ruissellement s'écoule ensuite à travers ces joints vers la sous-structure drainante, ce qui limite l'écoulement superficiel et favorise l'infiltration.

PTV 126 ou PTV 122 exigent que la surface des joints corresponde au moins à 10% de la surface totale du pavage perméable. Cette proportion permet d'assurer une capacité d'infiltration suffisante, typiquement au moins 3 240 ml/min/m² de surface brute pour ce type de revêtement drainant. [14]



Figure 4 : Pavés en béton à joints élargis

2. Pavés en béton avec ouvertures de drainage :

Les pavés en béton avec ouvertures de drainage sont des pavés dont la forme intégrée (carrée ou rectangulaire) comporte une ou plusieurs coupes ou découpes sur les côtés ou au centre, créant, une fois en place, des ouvertures dédiées à l'infiltration de l'eau vers la sous-structure. Ces ouvertures peuvent être remplies d'herbe, de gravillons ou de sable grossier, selon le niveau de confort et l'usage souhaité (parking, voirie, cours, etc.) [14]



Figure 5 : Pavés en béton avec ouvertures de drainage

Les prescriptions techniques notamment PTV 126 ou PTV 122 (Probeton, 2023). Exigent que la surface des joints de ces deux types de pavés drainants corresponde au moins à 10% de la surface totale du pavage perméable. Cette proportion permet d'assurer une capacité d'infiltration suffisante “Le matériau de jointoiement nécessaire à l'utilisation de pavés à

joints élargis et à ouverture de drainage doit présenter une perméabilité d'au moins $5,4 \times 10^{-4}$ m/s, afin de garantir une perméabilité de $5,4 \times 10^{-5}$ m/s pour la surface totale, et ce étant donné que les joints représentent seulement 10 % de la surface. Une granulométrie de 2/4 ou 2/6,3 mm suffit amplement” d'après: Editeur responsable : E. Van den Bossche, Boulevard de la Woluwe 42, 1200 Bruxelles. [14]

3. Dalles-gazon en béton :

Les dalles-gazon en béton sont des pavés ou dalles en béton munis de cellules ou alvéoles qui peuvent être utilisées comme pavages drainants, lorsque la dalle est posée sur une structure drainante et que les ouvertures représentent au moins 25% de la surface de la dalle, ce qui permet l'infiltration de l'eau de pluie tout en restant résistante à certaines charges de trafic.

Les ouvertures peuvent être remplies soit :

- d'un mélange de terre végétale, compost, semences de gazon et parfois de lave 3/8, jusqu'à environ 1 cm sous le bord supérieur de la dalle,
- d'un empierrement drainant (gravillons 1/3 ou 2/4 mm) pour un usage purement technico-fonctionnel.

Dans les deux cas, l'eau s'écoule à travers les cellules jusqu'à la sous-couche perméable, limitant fortement le ruissellement

D'après Le PTV 126 Le pourcentage de dispositifs pour la pousse du gazon dans le schéma de pose visé répond aux exigences suivantes :

- Classe 1 – Marquage 20

→ au moins 20% de la surface de la dalle sont des cellules ouvertes (espaces réservés au gazon).

→ le revêtement est peu “gazon”, plutôt béton, avec seulement quelques zones de verdure.

- Classe 2 – Marquage 40

→ au moins 40% de la surface sont des dispositifs pour la pousse du gazon.

→ l'aspect est plus vert : presque la moitié de la dalle laisse passer ou accueille l'herbe.

- Classe 3 – Marquage 60

→ au moins 60% de la surface sont des cellules ouvertes pour le gazon

→ l'effet visuel est majoritairement vert, avec peu de béton apparent. [14]

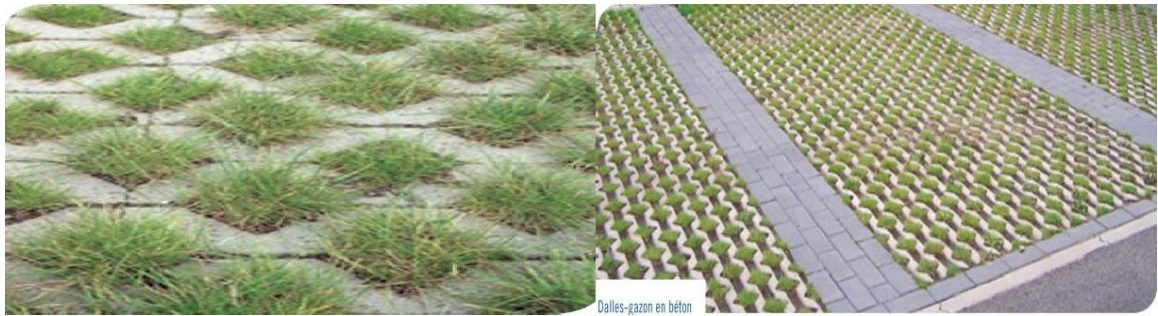


Figure 6 : Dalles-gazon en béton

4. Pavés de béton hybrides:

Les pavés de béton hybrides sont des pavés constitués d'une double structure

Une couche supérieure en béton non poreux et une sous couche en béton poreux (structure ouverte) qui permet l'infiltration de l'eau Grâce au reprofilage sur la partie supérieure des côtés, le revêtement drainant présente des joints localement élargis, ce qui permet à l'eau de pluie de s'infiltrer davantage à travers la sous-couche poreuse; Les prescriptions techniques notamment PTV 126 ou PTV 122 (Probeton, 2023). Exigent La capacité d'infiltration minimale est fixée à au moins 3 240 ml/min/m² de surface brute ($\approx 5,4 \times 10^{-5}$ – $55,4 \times 10^{-5}$ m/s). [14]



Figure 7 : Pavés de béton hybrides

5. Pavés en béton poreux :

un type de revêtement innovant permettant l'infiltration des eaux pluviales à travers sa structure grâce à la composition poreuse du béton vers le sol où les couches de drainage, toute en offrant une meilleure durabilité . Il suffit de remplacer la composition du béton étanche d'un pavé classique par une composition du béton poreuse pour obtenir la capacité d'infiltration requise. La capacité d'infiltration de ce type de pavé doit s'élever en moyenne

à au moins $5,4 \times 10^{-5}$ m/s, conformément aux prescriptions techniques reprises au PTV 126 (Probeton, 2023) [15]. En raison de leur structure ouverte, les pavés en béton poreux possèdent une résistance à la rupture en traction par fendage plus faible ($>2,5$ MPa) que les pavés en béton classiques ($>3,6$ MPa), mais forment une surface continue, ce qui améliore la praticabilité.



Figure 8 : Pavés en béton poreux

I.4.2 matériaux utilisés :

1 Le ciment dans le béton drainant :

Tous les types de ciment standard peuvent être utilisés, mais on recommande souvent le ciment Portland car il donne de bons résultats.

La quantité de ciment n'est pas choisie au hasard, elle dépend de trois éléments principaux :

- la quantité de granulats utilisée.
- le rapport eau/ciment (E/C).
- le niveau de porosité souhaité (pour laisser passer l'eau).



Figure 9 : Echantillon d'un ciment.

2 Granulats :

Le diamètre maximal ne doit pas excéder 15 mm. Les granulats les plus appropriés sont ceux qui possèdent des grains anguleux et qui correspondent aux classes granulaires de 3-8 mm et de 8-15 mm. Ils permettent d'obtenir une structure granulaire stable, idéale pour les pavés drainants. La configuration, la consistance et les dimensions des granulats affecteront l'installation, la compaction aisée ainsi que l'efficacité générale du matériau une fois durci. Il arrive que du sable soit intégré dans la fabrication des pavés drainants. Des études ont prouvé que l'intégration d'un certain taux de sable améliore la durabilité face aux cycles de gel et dégel, ainsi que la résistance à la compression, tout en préservant une porosité appropriée. En général, la quantité de sable utilisée se situe entre 0 et 8% de la masse totale des granulats.



Figure 10 : Echantillon d'un sable.



Figure 11: Echantillon d'un gravier 3/8



Figure 12 : Echantillon d'un gravier 8/15

3 L'eau :

L'eau provenant du réseau public d'eau potable est appropriée pour la production de pavés drainants. Le rapport E/C habituellement appliqué pour la fabrication des pavés drainants se situe entre 0,25 et 0,40. Lors de leur pose, les pavés drainants doivent présenter un aspect à la fois humide et métallique, et la consistance de la pâte doit être suffisamment dense pour envelopper les granulats et assurer une cohésion optimale du mélange. Pour produire des pavés drainants de qualité, la quantité d'eau est primordiale. Un niveau d'eau excessif peut provoquer l'écoulement de la pâte et le remplissage des espaces vides dans le mélange. À l'inverse, un manque d'eau rendra le matériau ardu à travailler et conduira à un développement limité des résistances mécaniques, que le matériau soit frais ou durci.

I.5 Principes de fonctionnement hydrologique

Le principe de fonctionnement général d'un revêtement drainant en pavés en béton est:

I.5.1 Infiltration à travers la structure de pavés :

L'eau de pluie s'infiltré directement à travers son squelette poreux, ainsi que le matériau de jointoiement et la couche de pose vers les couches inférieures.

I.5.2 stockage et portance :

L'eau de pluie est de préférence stockée dans les sous-fondations, et de fondation qui jouent le rôle de réservoirs. La fondation assure également la portance nécessaire pour supporter les charges liées au trafic.

I.5.3 infiltration dans le sol :

L'eau s'infiltré progressivement dans le sol naturel, en fonction de sa capacité de perméabilité si le sol est perméable ($k > 10^{-6}$ m/s) ; sinon, évacuation différée via réducteurs de débit Avec la présence d'un géotextile à placer entre la sous fondation et le sol naturelle pour éviter la migration des fines et préserver la perméabilité du système.



Figure 13 : photo represente les couches de drainage.

La capacité d'infiltration d'eau est indiquée par un coefficient de perméabilité ou un facteur de perméabilité k .

La perméabilité du sol est déterminée sur base des caractéristiques du sol ou de mesures in situ, Il existe différentes méthodes pour déterminer la perméabilité in situ. [14]

1. Méthode Open-End (méthode à charge constante):

Principe :

Dans cette méthode, une colonne d'eau est disposée sur le sol à une hauteur constante de 1 m. Une mesure continue de l'eau ajoutée pendant au moins 20 minutes permet de déterminer la perméabilité du sol

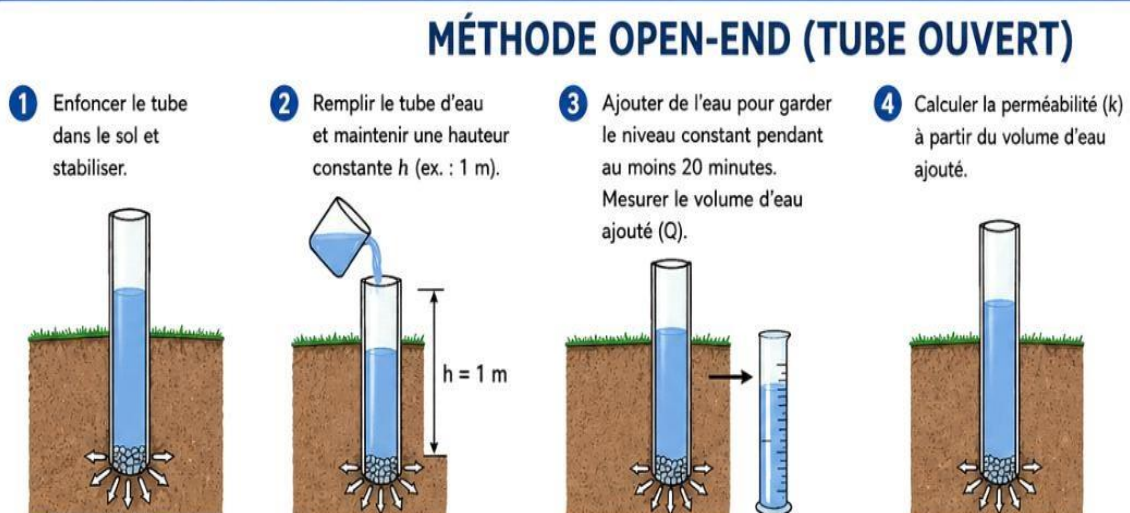


Figure 14 : le méthode open-end.

Formule de calcul :

$$K = \frac{Q}{t.A.h}$$

Ou :

Q : quantité d'eau ajoutée (m^3)

t : temps (s)

A : surface de la section interne du tube (m^2)

h : hauteur de colonne d'eau (m)

2 Méthode du puits (essai simple d'infiltration):

Principe :

On mesure le temps nécessaire pour que une quantité d'eau disparaisse dans un petit puits creusé dans le sol.

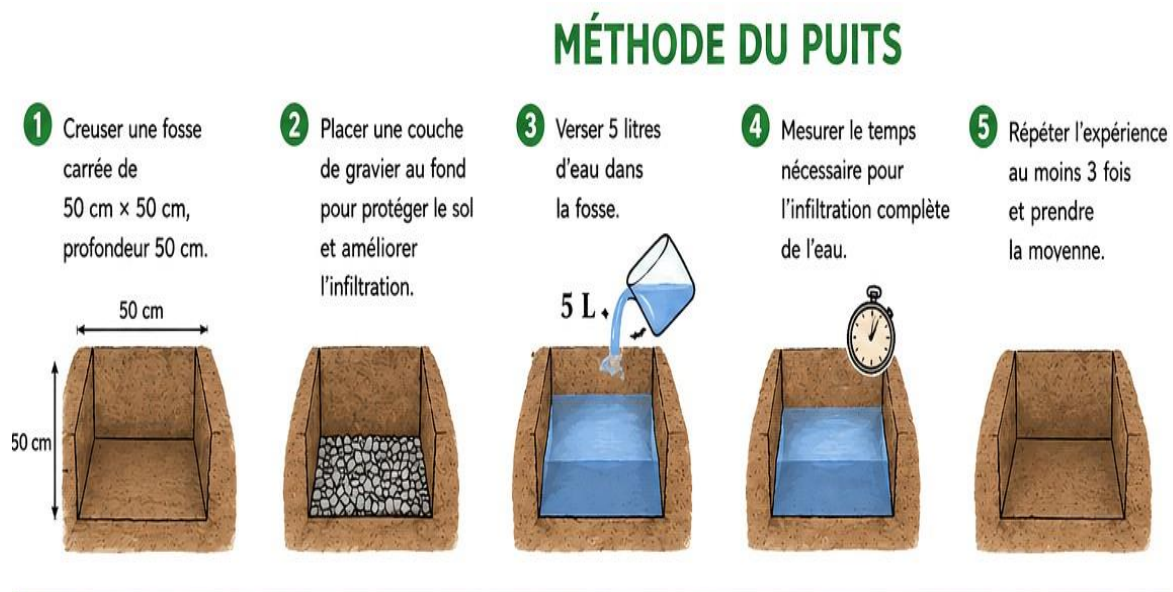


Figure 15 : La méthode de puits.

Formule de calcul :

$$k = \frac{Q}{t.A.1000}$$

ou :

Q : volume d'eau (L)

t : temps (s)

A : surface de la fosse (m^2)

1000 : conversion de litres en m^3 (1 m^3 = 1000 L)

Résultat : k en (m/s)

En fonction du coefficient de perméabilité k, les sols sont répartis dans les catégories suivantes:

Tableau 1 : Classification des sols selon le coefficient de perméabilité k

Catégorie	Coefficient k (m/s)	Exemples sols Algérie
Très perméables	$> 10^{-4}$	Sables/gravier (Ouargla, Sahara)
Bonne perméabilité	$10^{-4} > k > 10^{-6}$	Sables limoneux (Sud-Est)
Moyenne/mauvaise	$10^{-6} > k > 10^{-8}$	Limons sableux, argileux (Sétif, In- Aménas)
Quasiment imperméables	$k < 10^{-8}$	Argiles pures, sols salins (Tell, oasis)

I.6 Gestion des eaux pluviales selon la perméabilité du sol :

Il est préférable que l'eau soit infiltrée dans le sol. Si le sol n'a pas une perméabilité assez élevée, il est nécessaire d'installer un système de drainage additionnel. Il doit assurer une libération différée afin que le tamponnement se fasse toujours sous la fondation, ce qui prévient toute surcharge en aval. [16]

Cas 1: sol très perméable :

Toute l'eau s'infiltré directement dans le sol. Une sous fondation n'est pas nécessaire pour le tamponnement/tamponnage, ni un drainage supplémentaire.

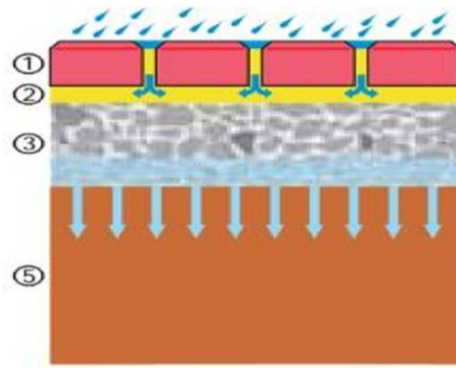


Figure 16 : Conception et évacuation de leau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) sol très perméable

Cas 2: Sol a bonne perméabilité:

L'eau s'infiltré en grande partie dans le sol après le tamponnement dans la sous- fondation. Une évacuation est réalisée entre la fondation et la sous-fondation afin d'éviter toute stagnation prolongée dans la fondation.

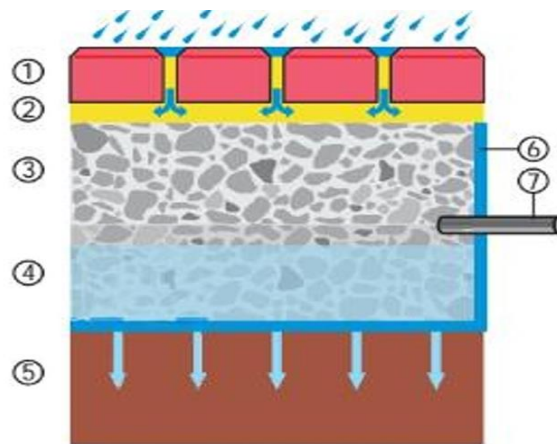


Figure 17 : Conception et évacuation de leau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) bonne perméabilité

Cas 3: sol modérément voire peu perméable(Moyenne/mauvaise):

L'eau s'infiltré seulement de manière très limitée dans le sol. L'eau résiduelle est stockée dans la sous-fondation et évacuée via un dispositif de drainage. Celui-ci passe par un réducteur de débit - principalement nécessaire pour des surfaces plus grandes -, ce qui permet

une évacuation différée vers les fossés, les dispositifs d'infiltration ou les caniveaux situés à proximité. La structure perméable sert surtout de dispositif de tamponnement .

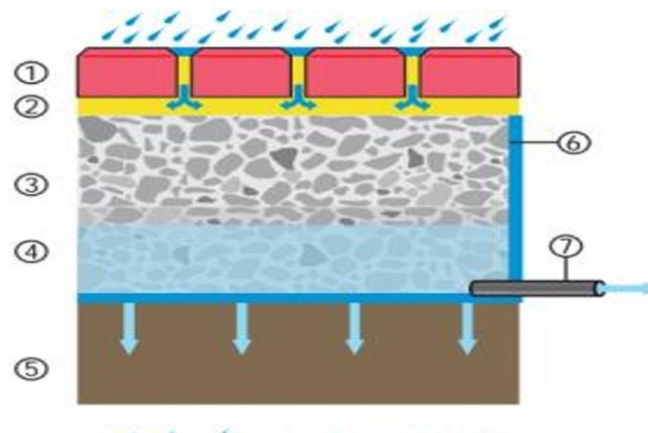


Figure 18 : Conception et évacuation de l'eau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) (Moyenne/mauvaise)

Cas 4: aucune infiltration possible(Quasiment imperméables):

Une membrane imperméable est placée sur le fond du coffre et autour de la structure. L'évacuation différée s'effectue sous la structure. Une pente minimale de 1 % est prévue sous la structure afin que toute l'eau puisse être évacuée. Le stockage de l'eau s'effectue toujours dans la sous-fondation

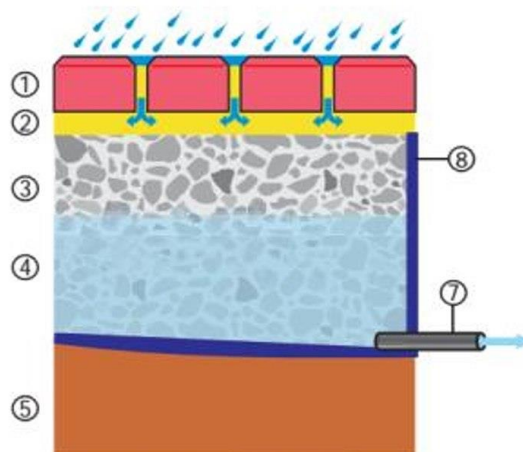


Figure 19 : – Conception et évacuation de l'eau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) imperméables

- | | |
|--------------------|---|
| 1. Pavés drainants | 6. Géotextile non tissé |
| 2. Couche de pose | 7. Tuyau d'évacuation avec réducteur de débit |
| 3. Fondation | 8. Membrane imperméable |
| 4. Sous-fondation | |
| 5. Sol | |

I.6.1 La nature de matériaux utilisée dans la structure de drainage (les couches sous pavé):

Dans le cadre de la conception des pavages drainants, il est nécessaire que l'ensemble des couches structurantes sous-fondation, fondation, couche de pose et éléments de surface – disposent d'une perméabilité uniforme et suffisante pour assurer une infiltration rapide et continue des eaux pluviales même lors d'épisodes pluvieux intenses. En effet, toute discontinuité de perméabilité entre les différentes couches peut entraîner une accumulation d'eau, une saturation locale donc un risque de ruissellement en surface.

Tableau 2 : Matériaux recommandés

Couche	Matériaux recommandés
Couche de pose	Gravillons concassés 2/4 ou 2/6 mm
Fondation	GNT 0/20 _ 0/31.5 mm ou gravillons concassés 4/20 _ 10/30 mm
Sous-fondation	Grave drainante 20/40 _ 30/60 mm (couche réservoir)
Séparation	Géotextile non tissé (entre le sol naturel et la sous-fondation)

I.7 Avantages et limites des pavés drainants

I.7.1 Avantages des pavés drainants :

- **Rendre la ville transparente à l'eau :**

L'un des principaux avantages des revêtements perméables est qu'ils permettent de rétablir un cycle hydrologique similaire à celui d'un environnement non urbanisé [17]. Ces couches rendent la surface du sol « transparente » à l'eau. [18]

- **La réduction du ruissellement et du risque d'inondations.**

Grâce à leur fonction d'absorption de l'eau de surface, les structures à revêtements perméables participent à la diminution du ruissellement en milieu urbain. Ces infrastructures sont conçues pour collecter et retenir l'eau de pluie, ce qui réduit et ralentit les flux de ruissellement [19]. Situées en amont de la zone à risque, ces structures donc aider à réduire le danger d'inondation due au ruissellement ou à surcharge des réseaux.

- **Le renouvellement des nappes phréatiques :**

L'utilisation des revêtements perméables permet la recharge des nappes phréatiques,, limitant ainsi les risques liés à l'affaissement du sol et permettant le renouvellement de la ressource en eau de manière durable [20]. Le renouvellement des nappes permet également de lutter contre les problèmes d'érosion des cours d'eau et d'intrusion d'eau salée dans les nappes.

- **L'augmentation de l'évapotranspiration.**

Souvent oubliée dans l'équilibre de l'eau en milieu urbain, l'évapotranspiration joue un rôle important pour l'eau pluviale stockée dans la structure des revêtements perméables. Plusieurs études ont montré que l'utilisation de revêtements perméables permet l'obtention de taux d'évapotranspiration améliorés par rapport à des pavés classique [17]. GÖBEL présente des résultats sur l'optimisation de la conception des revêtements permettant d'obtenir une évapotranspiration jusqu'à 240 % plus élevée qu'avec un revêtement imperméable traditionnel .Cette amélioration peut s'expliquer, d'une part, par les phénomènes de remontée capillaire au sein des structures perméables permettant d'évacuer par évaporation une partie de l'eau stockée dans structure [21], d'autre part, grâce au soutien de la croissance de la végétation par un meilleur transfert de l'eau et de l'air aux racines des arbres.

- **La réduction des îlots de chaleur :**

L'îlot de chaleur urbain désigne l'élévation des températures dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes, principalement due à l'imperméabilisation des surfaces, à la faible présence de végétation et à la réduction de l'évapotranspiration. Dans ce contexte, les pavés perméables contribuent à augmenter l'évapotranspiration, ce qui permet de réduire l'effet d'îlot de chaleur et d'améliorer le climat urbain. [21] [17]

- **La protection du sol :**

Les résultats de plusieurs recherches montrent que les structures à revêtements perméables ont un effet positif sur la qualité de l'eau et la réduction de la pollution des milieux.[17] [18] [19] [20] Ce bénéfice s'explique par la gestion des polluants à la source permise par la limitation du ruissellement, et par la filtration de l'eau lors de son infiltration dans la structure. En effet, différents résultats montrent que ces structures filtrent les polluants sur les premiers centimètres, protégeant le sol de la pollution [22]. Cette question du rôle filtrant des structures perméables représente encore aujourd'hui un enjeu majeur de recherche. Elle sera volontairement laissée de côté par la suite, ce travail se focalisant seulement sur une approche quantitative et non qualitative.

- **La maîtrise des coûts :**

La pertinence économique des revêtements perméables doit être à la fois comparée à une utilisation traditionnelle de voiries imperméables avec réseau d'assainissement et aux autres techniques alternatives existantes. Concernant la comparaison avec les revêtements classiques, la littérature fait état d'un surcoût initial pour la réalisation du revêtement qui est compensé par l'absence (ou la forte réduction) d'avaloirs, de caniveaux et de réseaux permettant d'arriver à un prix du même ordre, voire à un gain [23]. Ce gain pouvant aller de l'ordre de 2 % sur le poste VRD(voirie et réseaux divers) [24] jusqu'à un gain de 15 à 80 % d'après une étude de l'EPA(environnemental protection agency) [18]. Certaines études prennent également en compte la durée de vie, la maintenance et la potentielle réutilisation du sol et montrent alors que les revêtements perméables permettent un gain économique important [21].

I.7.2 Limites des pavés drainants :

- **La pollution des eaux souterraines et du sol :**

Le risque est que l'ouvrage n'assure pas une filtration satisfaisante de l'eau et que son infiltration dans le sol entraîne une pollution du site voire une pollution du sol et des nappes souterraines [20][25]. Les méthodes de prévention et de réduction de ce risque mises en avant dans la littérature se concentrent sur la prise en compte de l'environnement de l'ouvrage, la proximité de la nappe la profondeur de la nappe (généralement supérieure à 1 m), la distance aux sources potentielles de pollution (station-service, trafic routier, etc.) [24]. Ce risque est probablement l'un des enjeux de recherche majeurs pour favoriser et sécuriser la diffusion de l'utilisation des structures à revêtements perméables.

- Le colmatage des structures perméables :

Le colmatage de la couche de surface ou en profondeur représente l'une des principales limites des revêtements perméables [25]. Il est causé par l'accumulation de particules fines et de polluants, réduisant progressivement la perméabilité et la capacité d'infiltration [18] [19].

Une Maintenance préventive régulière, et un dimensionnement adéquat de la porosité permettent de limiter ce phénomène et l'utilisation des géotextiles du rôle filtrant de la structure, en retenant les polluants.

- La perturbation du sous-sol :

Dans certains contextes géologiques, l'infiltration peut provoquer : Des phénomènes de gonflement/retrait (sols argileux), et Des risques d'affaissement. Qui pourraient déstabiliser l'ouvrage et/ou les ouvrages à proximité [19].

Un usage de structures à revêtements perméables peut alors être envisagé à la condition d'empêcher l'infiltration par l'usage d'une membrane imperméable. Cette solution offre toujours certains avantages (stockages, évaporation).

- L'impact de la présence d'eau sur les propriétés mécaniques :

Le drainage est considéré comme l'un des éléments les plus importants pour le bon fonctionnement mécanique d'une voirie. En effet, l'eau présente dans un milieu poreux réduit sa capacité de portance [21]. Contrairement aux chaussées classiques où l'eau est rapidement évacuée, les structures perméables favorisent son stockage.

Pour éviter que ce stockage soit préjudiciable aux propriétés mécaniques de la structure, le stockage de l'eau doit s'effectuer seulement dans la partie basse de la fondation, souvent appelée sous-fondation [16].

- Le surcoût de ces structures :

Certains avantages économiques apportés par ces structures (réduction du coût de gestion du ruissellement et de la dépollution de l'eau, etc. Qui viennent compenser leur surcoût initial peuvent être difficiles à quantifier.

- Les contraintes d'usages :

Les revêtements perméables ne sont pas adaptés aux zones à fort trafic, aux giratoires, aux zones fortement exposées à la pollution soumis à des contraintes de cisaillement élevées Les

structures perméables restent principalement des solutions pour les zones de circulation apaisée ou les espaces publics. [26]

II Géopolymér :

II.1 Historique des géopolymères :

Les géopolymères constituent une famille de matériaux inorganiques appartenant aux matériaux alcali-activés. Bien que leur identification scientifique soit récente, certains chercheurs estiment que des matériaux similaires auraient été utilisés depuis l'Antiquité dans la construction de monuments historiques tels que les pyramides d'Égypte, les Ziggourats de Mésopotamie ou encore certaines constructions romaines. Ces ouvrages ont démontré une remarquable durabilité face aux conditions climatiques extrêmes et à l'érosion, ce qui a conduit plusieurs scientifiques à s'intéresser à la nature des liants utilisés. [27]

Les premières recherches scientifiques sur les matériaux alcali-activés remontent au début du XX^e siècle. En 1908, Kühl déposa un brevet concernant un ciment obtenu à partir de laitier de haut fourneau activé par des composés alcalins [28]. Plus tard, dans les années 1940, l'ingénieur Purdon étudia la réaction de matériaux silico-alumineux avec des solutions alcalines et observa que les résistances mécaniques obtenues étaient comparables à celles du ciment Portland. [29] [30]

Dans les années 1950, le chercheur ukrainien Glukhovsky développa des ciments à base de laitiers et de déchets industriels alcalins afin de répondre à la pénurie de ciment Portland en Union soviétique. Ses travaux sur les aluminosilicates activés alcalinement constituent une étape essentielle dans le développement des géopolymères modernes. Il démontra que ces matériaux présentaient une bonne durabilité ainsi qu'une résistance mécanique élevée. [31] Le véritable développement des géopolymères débuta dans les années 1970 grâce aux travaux du scientifique français Joseph Davidovits. À la suite des incendies catastrophiques survenus en France entre 1970 et 1973, provoqués notamment par des matériaux plastiques inflammables, Davidovits orienta ses recherches vers la mise au point de matériaux inorganiques résistants au feu et non combustibles [27]. En 1979, il introduisit le terme « géopolymère » pour désigner ces polymères minéraux obtenus par activation alcaline de matériaux riches en silice et en alumine. Il développa également une théorie générale du mécanisme de géopolymérisation et déposa plusieurs brevets entre 1972 et 1996.

Au cours des années 1980, les géopolymères commencèrent à susciter un intérêt industriel. La société Lone Star Industries commercialisa un ciment appelé « Pyrament », utilisé notamment dans des infrastructures militaires américaines. Grâce à leur excellente résistance thermique (résistance au feu) et leur caractère incombustible, les géopolymères furent également employés dans les domaines de l'automobile et de l'aérospatiale.

Au début des années 2000, des produits commerciaux à base de géopolymères ont été introduits, tels que les joints Geofug de BASF. Zeobond a également mis en place une production industrielle de son ciment E-crete, utilisant des sous-produits industriels comme les cendres volantes et les laitiers. Ces dernières années, on a observé une augmentation significative du nombre de publications scientifiques sur les géopolymères. Cette tendance, surtout depuis les années 2000, peut être attribuée à la nécessité croissante de réduire les émissions de CO₂, en particulier dans le secteur du bâtiment, ainsi qu'à la demande croissante des gouvernements de prendre en compte les problématiques environnementales.

"(Impact des fines recyclées sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers géopolymères Par Abdessalam Bouchibi et Wahid Benfredj. Soutenu le : 2 juillet 2023 univ bba) [32]

II.2 définition de géopolymer :

Les géopolymères sont des matériaux inorganiques obtenus par la réaction chimique entre des précurseurs riches en silice (SiO₂) et en alumine (Al₂O₃) avec une solution alcaline activatrice généralement une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) ou d'hydroxyde de potassium (KOH). Ce processus, appelé géopolymérisation; la géopolymérisation; est une réaction chimique complexe qui implique la dissolution des précurseurs inorganiques dans l'activateur alcalin, conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel aluminosilicaté présentant de bonnes propriétés mécaniques, une excellente durabilité et une résistance élevée aux agressions chimiques et thermiques.

Les précurseurs utilisés sont généralement des matériaux naturels ou des sous-produits industriels tels que les cendres volantes, le métakaolin ou les laitiers de haut fourneau. Grâce à leur faible empreinte carbone par rapport au ciment Portland traditionnel, les géopolymères sont considérés comme une alternative durable et écologique dans le domaine de la construction. [33]

II.3 Les matériaux de bases de géopolymère :

- **Des sources d'aluminosilicate de sous-produits (Précurseurs aluminosilicates) :** comme la boue rouge, cendre de balle de riz, laitiers de haut-fourneau broyés, cendres volantes, fumée de silice, et granulats fins et grossiers.
- **Des solutions alcalines :** comme le silicate de sodium (Na_2SiO_3), l'hydroxyde de sodium (NaOH), le silicate de potassium (K_2SiO_3) et l'hydroxyde de potassium (KOH)

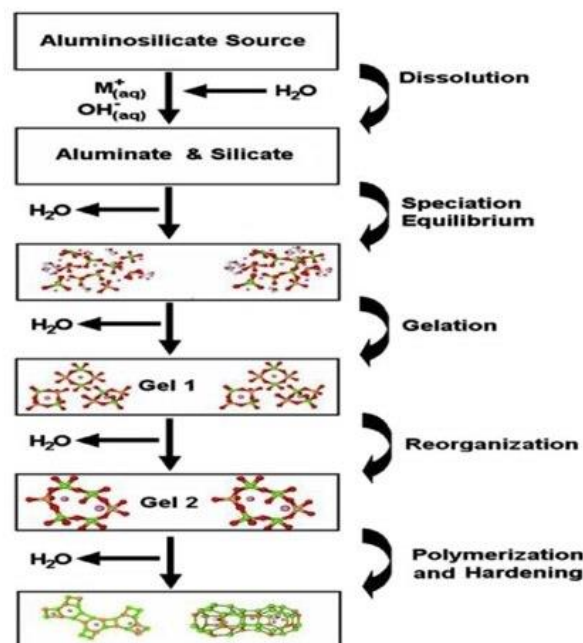


Figure 20 : Processus de géo-polymérisation (Chandrakanth and Koniki 2020).

II.3.1 Précurseurs aluminosilicates :

Les précurseurs aluminosilicatés constituent les matières premières essentielles à la fabrication des géopolymères. Tout matériau riche en silicium (Si) et en aluminium (Al) sous forme amorphe peut être utilisé comme source d'aluminosilicates pour la géopolymérisation.

en décrit certains types dans le titre suivants :

II.3.1.1 Différents types de géopolymère :

1 Ciment géopolymère à base de cendres volantes :

le ciment géopolymère à base de cendres volantes est élaboré à partir de cendres volantes issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques. Lorsque le charbon est brûlé pour produire de l'électricité, les cendres volantes sont générées et capturées à partir des gaz de combustion; Riches en silice et en alumine, ces cendres constituent une matière première idéale pour la synthèse des géopolymères après activation alcaline [34]. L'utilisation des cendres volantes présente un intérêt environnemental majeur puisqu'elle permet la valorisation d'un sous-produit industriel qui serait autrement considéré comme un déchet.

De plus, la fabrication des géopolymères à base de cendres volantes requiert généralement moins d'énergie que celle du ciment Portland traditionnel, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂ et à la préservation des ressources naturelles. [35]

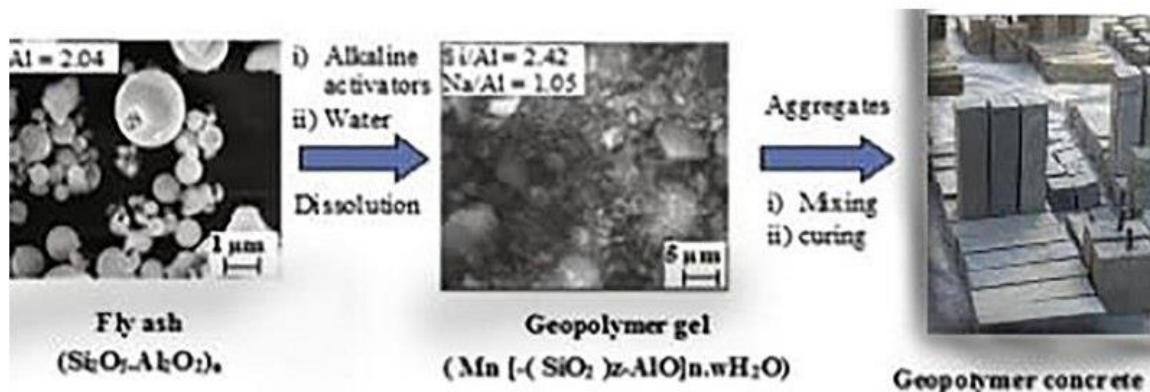


Figure 21 :Transformation de cendres volantes dans le béton géopolymère.(Adams 2017)

2 .Géopolymère à base de laitier :

les géopolymères à base de laitier sont fabriqués en utilisant du laitier de haut fourneau, un sous-produit résultant de la production de fonte dans l'industrie sidérurgique. Ce matériau est souvent considéré comme un déchet, mais il peut être valorisé en tant que matière première pour la fabrication de géopolymères.

Ces géopolymères à base de laitier sont largement utilisés dans l'industrie de la construction en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur résistance aux produits chimiques. Lorsqu'ils sont mélangés avec des activateurs alcalins, le laitier réagit

chimiquement pour former une matrice solide et liée, qui présente des performances supérieures à celles des matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. [36]

Les géopolymères à base de laitier offrent une résistance mécanique élevée, ce qui les rend adaptés à une utilisation dans des applications structurales. Ils peuvent être utilisés pour la construction de fondations, de murs, de dalles et d'autres éléments de structure nécessitant une résistance et une durabilité élevées. De plus, ils présentent une excellente résistance aux produits chimiques, ce qui les rend appropriés pour des environnements agressifs où la corrosion ou la détérioration chimique peuvent être un problème, tels que les installations industrielles, les stations d'épuration ou les structures en contact avec des agents chimiques corrosifs. [38]

3. Géopolymère à base de métakaolin:

Les géopolymères à base de métakaolin sont obtenus à partir du métakaolin, un matériau produit par la calcination du kaolin à des températures comprises entre 600 et 800 °C.

Cette opération thermique permet d'éliminer l'eau de constitution de l'argile et d'augmenter sa réactivité chimique ce qui permet de former des géopolymères lorsqu'il est mélangé à des activateurs alcalins.

Ces géopolymères à base de métakaolin sont utilisés dans diverses applications en raison de leurs propriétés uniques. L'une des utilisations courantes est la réparation des structures, où les géopolymères à base de métakaolin sont utilisés comme matériaux de réparation pour restaurer l'intégrité structurelle des éléments endommagés tels que les murs, les piliers ou les planchers. Ils peuvent être utilisés pour renforcer les zones faibles, réparer les fissures et les défauts, et améliorer la durabilité globale des structures. Ils sont également employés comme revêtements de protection pour améliorer la résistance à l'usure, à la corrosion et aux environnements agressifs. [39] [40]

II.3.2 Activateurs alcalins :

Les activateurs alcalins sont les matériaux qui initient la réaction géopolymère, dissolvant d'abord le silicium et l'aluminium dans la matière première, puis aidant à les réassembler en un réseau solide tridimensionnel 3D qui confère au géopolymère sa résistance et sa durabilité. L'hydroxyde de sodium et le silicate de sodium comptent parmi les plus douloureux. [42]

1 NaOH /KOH : L'hydroxyde de sodium reste l'activateur alcalin le plus couramment utilisé dans la synthèse des géopolymères en raison de son efficacité, de son faible coût et de sa disponibilité sur le marché., les cations Na^+ sont connus pour accroître la dissolution de la phase amorphe par association avec des monomères de silicate, et les cations K^+ sont connus pour augmenter la croissance du gel par association avec de plus gros anions aluminosilicates. Van Jaarsveld et Van Deventer [43] ont démontré une meilleure dissolution des précurseurs aluminosilicates en présence du cation Na^+ qu'en présence de cations K^+ . Par contre, le potassium permet d'obtenir un meilleur degré de formation de gel dans les géopolymères. [44]

2 Silicates alcalins ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{K}_2\text{SiO}_3$) : Comme pour les hydroxydes, les silicates alcalins les plus utilisés sont à base de sodium et moins fréquemment de potassium. Ils jouent un rôle très important dans la réaction de géopolymérisation. En effet, plusieurs travaux ont montré que cette réaction est plus rapide lorsque la solution alcaline contient du silicate de sodium ou de potassium, en comparaison avec celle ne contenant que de l'hydroxyde alcalin [45][46]

La formation des matériaux de type géopolymères repose sur la dissolution des matières minérales solides initialement présentes dans le mélange. La solubilité de la silice amorphe est très faible en solution neutre mais augmente rapidement avec la concentration en ions alcalins. [42] [46]

II.4 Avantages et inconvénients des géopolymère :

II.4.1 Avantages des géopolymères:

- **Durabilité :** Les géopolymères sont connus pour leur durabilité exceptionnelle. Ils offrent une résistance élevée aux attaques chimiques, à la chaleur, à l'abrasion et aux intempéries, ce qui en fait des matériaux adaptés aux environnements difficiles.
- **Résistance mécanique :** Les géopolymères peuvent présenter une résistance mécanique élevée, ce qui les rend adaptés à des applications nécessitant une bonne stabilité structurelle, telles que la construction d'ouvrages d'art et de bâtiments.
- **Faible empreinte carbone :** Les géopolymères peuvent être fabriqués à partir de sous-produits industriels, tels que le laitier de haut fourneau ou les cendres volantes, ce qui réduit leur empreinte carbone par rapport aux matériaux traditionnels. Ils peuvent également contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre lors de leur fabrication.

- **Utilisation de déchets :** Les géopolymères offrent la possibilité d'utiliser des déchets industriels comme matières premières, tels que les cendres volantes, contribuant ainsi à la gestion des déchets et à la promotion de l'économie circulaire.
- **Isolation thermique :** Certains géopolymères présentent de bonnes propriétés d'isolation thermique, ce qui les rend utiles pour l'isolation des bâtiments et la réduction des pertes d'énergie.

II.4.2 Inconvénients des géopolymères :

- **Coût initial plus élevé :** Les géopolymères peuvent être plus coûteux à produire que les matériaux traditionnels tels que le ciment Portland. Cela est dû à la nécessité de matières premières spécifiques et d'un processus de fabrication plus complexe.
- **Sensibilité à l'humidité :** Certains géopolymères peuvent être sensibles à l'humidité pendant leur durcissement, ce qui nécessite des conditions de séchage et de durcissement contrôlées.
- **Variabilité des propriétés :** Les propriétés des géopolymères peuvent varier en fonction de leur formulation et de leur processus de fabrication, ce qui nécessite une expertise et un contrôle stricts pour assurer une performance cohérente.

II.5 Applications des géopolymères :

dans le domaine de GC "les applications pratiques des géopolymères peuvent être regroupées en trois catégories distinctes. Tout d'abord, ils sont utilisés dans la construction de bâtiments et d'éléments préfabriqués pour des ouvrages d'art, offrant des avantages tels qu'une meilleure résistance aux intempéries, une durabilité accrue et une réduction de l'empreinte carbone par rapport aux matériaux traditionnels.

Ensuite, les géopolymères sont utilisés dans la production d'éléments de maçonnerie tels que des blocs, des pavés, des corps creux, etc. Ces produits offrent des performances supérieures en termes de résistance mécanique, d'isolation thermique et acoustique, et de résistance aux produits chimiques, contribuant ainsi à des constructions durables et de haute qualité. Enfin, les géopolymères sont utilisés dans la construction de routes et de canalisations dans les travaux publics. Ils offrent une excellente résistance à la fatigue, une meilleure durabilité et une résistance chimique élevée, ce qui en fait des choix attrayants pour les infrastructures routières et les [systèmes de drainage](#).

"Un exemple de réalisation notable dans l'utilisation des bétons géopolymères à base de laitier remonte à 1986-1994, lorsque la société russe Tsentrmetallurgremonta a réussi à

construire une série de bâtiments en utilisant ces matériaux. Ces bétons géopolymères à base de laitier ont démontré leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance aux produits chimiques, offrant ainsi une alternative durable et performante aux bétons traditionnels.

"(Contribution à l'analyse de l'impact des déchets sur le comportement et la durabilité des matériaux géopolymère par Mati Salah Eddine Soutenu le : 30 juin 2025 page 25. [47]



Figure 22 :Premier immeuble en béton géopolymère à Lipetsk, Russie, 1994

Donc le présent projet s'oriente vers le développement de pavés drainants à base de géopolymère. Ce choix vise à combiner les bénéfices environnementaux des liants géopolymériques avec les avantages hydrauliques des revêtements perméables, permettant ainsi une meilleure gestion des eaux pluviales tout en contribuant à la valorisation de sous-produits industriels et à la réduction de l'empreinte carbone dans le secteur de la construction. pavé drainant en géopolymère: Les pavés drainants en géopolymère représentent une solution innovante et durable pour l'aménagement urbain et la gestion des eaux pluviales. Ils combinent les avantages environnementaux des liants géopolymériques avec les propriétés hydrauliques des revêtements perméables. Grâce à leur structure poreuse, ces pavés permettent l'infiltration de l'eau de pluie vers les couches d'inférieur, réduisant

ainsi le ruissellement de surface, les risques d'inondation et la surcharge des réseaux d'assainissement. Par ailleurs, l'utilisation de géopolymères élaborés à partir de sous-produits industriels tels que les cendres volantes, les laitiers de haut fourneau ou le métakaolin contribue à la réduction de la consommation de ciment Portland et des émissions de dioxyde de carbone (CO₂). En raison de leur bonne résistance mécanique, de leur durabilité élevée et de leur résistance aux agressions chimiques, les pavés drainants en géopolymère constituent une alternative prometteuse aux pavés conventionnels dans les projets de construction durable et de gestion intégrée des eaux pluviales.

II.6 pavé drainant en geopolymer :

le pavés drainants en geopolymer existe déjà dans le marché européen : pavés Halter Classics (Ebema/URBCON, Belgique) en béton géopolymère drainant. [48]



Figure 23 : Les pavés drainants Halter Classic de la gamme Eco Solutions d'Ebema_LivingCity

Tableau 3 : différences entre Les pavés drainants Halter Classic de la gamme Eco solutions d'Ebema_LivingCity et notre projet.

Halter classic (Ebema)	Notre projet
Pavé Drainant : joints larges, pavé plein	Pavé poreux : porosité interne l'eau traverse la matrice géopolymère

Solution éprouvée : joints drainants standards	Innovation max : géopolymère poreux = brevetable
Usage : parkings, trafic voitures	Usage : trottoirs, cours, zones piétonnes

Conclusion:

Les géopolymères représentent une alternative durable et écologique aux matériaux cimentaires traditionnels grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques et à leur faible impact environnemental. Leur utilisation dans la fabrication de pavés drainants permet de combiner résistance, durabilité et gestion efficace des eaux pluviales. Ainsi, les pavés drainants en géopolymère constituent une solution prometteuse pour le développement d'infrastructures urbaines durables et respectueuses de l'environnement.

Chapitre II :

Matériaux et méthode expérimentale

Chapitre II : Matériaux et méthode expérimentale

II.1.Introduction générale :

La qualité et les performances des pavés drainants en géopolymère et en ciment dépendent largement des matériaux utilisés dans leur formulation. Ainsi, il est essentiel de caractériser les matières premières et de réaliser les essais conformément aux normes en vigueur afin d'obtenir des résultats fiables et comparables à ceux rapportés dans la littérature scientifique. Ce chapitre présente les différents matériaux employés pour la fabrication des pavés drainants ordinaire et en géopolymère ainsi que les essais expérimentaux réalisés selon les normes et les pratiques en vigueur.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont des matériaux locaux, dont les propriétés physiques, chimiques et mécaniques ont été évaluées expérimentalement au Laboratoire de Chimie et Génie Civil de l'Université El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj.

II.2 Les matériaux utilisés pour le pavé drainant ordinaire :

1 Ciment :

Dans le cadre de cette étude, un ciment Portland composé de type CEM II 42.5 de la marque Lafarge a été utilisé comme liant principal pour la fabrication des pavés drainants. Ce ciment se caractérise par la présence d'ajouts minéraux en complément du clinker, ce qui lui confère de bonnes propriétés hydrauliques, une durabilité satisfaisante ainsi qu'un impact environnemental réduit par rapport au ciment Portland ordinaire. La classe de résistance 42.5 garantit une résistance mécanique minimale de 42,5 MPa à 28 jours, répondant ainsi aux exigences des matériaux de construction. La composition chimique du ciment, exprimée par les pourcentages des principaux oxydes tels que CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , influence directement les réactions d'hydratation ainsi que les propriétés physicomécaniques des matériaux étudiés. Grâce à ses performances mécaniques, sa durabilité et sa large utilisation dans le domaine du génie civil, le ciment Lafarge CEM II 42.5 constitue un choix adapté à la réalisation des bétons drainants.

Les résultats de l'analyse chimique du ciment employé sont présentés dans le Tableau :

Tableau 4 : composition chimique élémentaire de ciment Lafarge CEM II 42.5

Oxyde	Symbole	OPC (Référence %)
Silice	SiO ₂	17 – 22 %
Alumine	Al ₂ O ₃	4 – 7%
Oxyde de Calcium (Chaux)	CaO	58 – 65 %
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	2 – 4%
Oxyde de magnésium	MgO	0.5 – 3%
Trioxyde de soufre	SO ₃	1.5 – 3%

Tableau 5 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

Propriété	Valeur
Classe de résistance	42.5 MPa à 28 jours min
Résistance à 2jrs	≥ 12.5MPa
Début de prise	≥ 60 min
Fin de prise	150 à 250 min
Finesse Blaine	330 à 400 (m ² /kg)

2 Gravier :

Dans notre cas les graviers utilisés sont prélevés de la carrière Mechri Belimour localité située à environ 15 Km au sud de la ville de Bordj Bou Arreridj. Deux classes granulaires de gravier ont été sélectionnées en fonction de leurs dimensions, à savoir les fractions **3/8 mm** et **8/15 mm**.

Avant leur utilisation dans la fabrication des pavés drainants, les graviers ont été lavés afin d'éliminer les particules fines et les la poussière présentes à leur surface. Cette opération est essentielle, car l'excès de fines peut boucher les vides entre les granulats et réduire ainsi la porosité ainsi que la capacité de drainage des pavés. Le lavage des granulats permet donc de préserver une structure poreuse favorable à l'infiltration de l'eau et d'améliorer les performances hydrauliques des pavés drainants.



Figure 24 : échantillon d'un gravier 8/15



Figure 25 : le lavage du gravier 3/8

2 Eau :

L'eau utilisée dans la confection des éprouvettes est une eau potable du robinet, propre et exempte d'impuretés susceptibles d'influencer les propriétés du mélange.

II.3 Formulation du béton drainant :

Tableau 6 : Compositions des différents mélanges du pavés drainants

(pour 1 cube 10*10*10)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
E/C	0.3	0.3	0.3	0.35	0.35	0.35	0.4
g/G	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2
G3/8 (g)	1080	945	810	1080	945	810	1080
G8/15(g)	270	405	540	270	405	540	270

Eau (g)	135	135	135	157.5	157.5	157.5	180
Ciment(g)	450	450	450	450	450	450	450

II.4 Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes :

- Tout d'abord on a mélangé les deux classes de gravier 3/8 et 8/15 avec le laitier de haut Fournaux à l'état sec afin d'assurer une bonne répartition des constituants.
- l'eau a été ajoutée progressivement pendant le malaxage afin de faciliter l'hydratation du ciment et d'obtenir un mélange cohérent.
- Le malaxage a été poursuivi jusqu'à obtention d'un béton frais homogène et sans ségrégation.



Figure 26 : le malaxeur

- Le moulage : Le mélange a été versé dans les moules puis compacté légèrement.



Figure 27 : le moulage.

- Le démoulage : Le démoulage doit être après 24 heures depuis le coulage.



Figure 28 : les échantillons démoulés.

- Les échantillons ont été placés dans un bac d'eau.

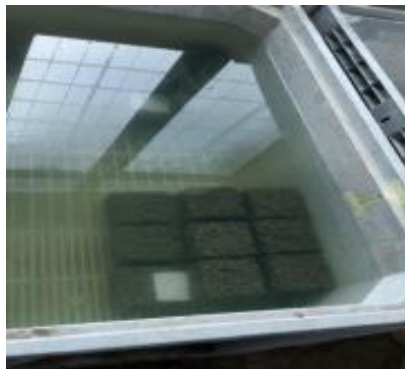


Figure 29 : le bac d'eau.

II.5 Les matériaux utilisés pour le paves drainants en géopolymère :

II.5.1 Activateurs :

1 Silicate de sodium liquide :

Le fournisseur du silicate de sodium utilisé dans cette étude est ARES, situé à SIDI AISSA M'SILA. Les propriétés physico-chimiques de ce produit sont présentées dans le tableau.

Tableau 7 : Caractéristiques chimiques du silicate de sodium.

Compositions chimiques	Valeur
SiO ₂	29,8
Na ₂ O	14,43
PH	13,01
Densité à 20° C (en g/cm ³)	1,53
Concentration (%)	45
R=(SiO ₂) /Na ₂ O	2,06
Degré Baume	50,2

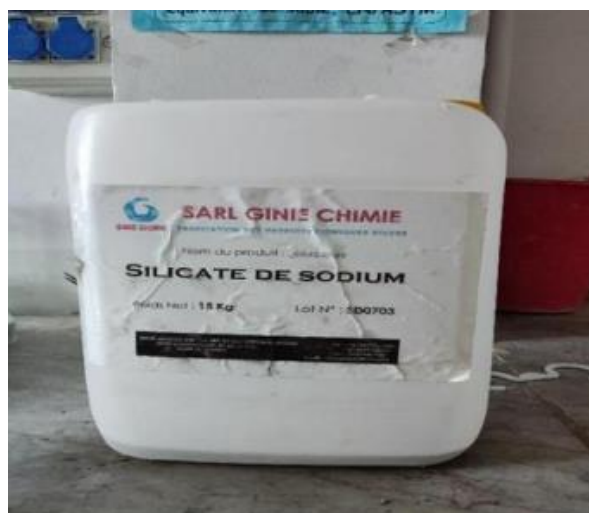


Figure 30 : Silicate de sodium.

2 NaOH:

Le laboratoire SPECILAB a fourni le NaOH utilisé dans cette étude. Ce produit est distribué par la société PROCHIMA SIGMA, qui est basée à Tlemcen en Algérie.



Figure 31 : préparation de la solution de l' NaOH .

Pour préparer une solution de 1 L d'hydroxyde de sodium (NaOH) à une concentration de 10 M, 400 g de NaOH en perles ont été pesés avec précision puis ajoutés progressivement à de l'eau distillée. La solution a ensuite été agitée jusqu'à dissolution complète du solide. Cette opération a été réalisée avec soin, car la dissolution du NaOH dans l'eau est une réaction exothermique qui dégage une quantité importante de chaleur. Après dissolution complète, la solution a été laissée à refroidir à température ambiante avant son utilisation. Enfin, la solution préparée a été conservée dans un récipient hermétique et correctement étiqueté jusqu'à son emploi.

II.5.2 Précurseurs :

1 Laitier granulé de haut fourneau:

Le laitier granulé utilisé dans cette étude est un sous-produit de la fonderie d'El-Hadjar Annaba. Il a été broyé pendant 1h et 30 min au laboratoire de la cimenterie de Ain Elkabira/Sétif à l'aide d'un broyeur horizontal à boulets de type BURBERS.



Figure 32 : LHF laitier de haut fourneau.

II.5.3 Le gravier :

Comme mentionné précédemment dans la section 2.2 relative aux graviers, deux classes granulaires ont été retenues : 3/8 mm et 8/15 mm ; L'analyse granulométrique a été réalisée dans les mêmes conditions expérimentales pour les deux types de gravier afin d'évaluer leur distribution granulaire.

II.6 Formulation des géopolymères :

Tableau 8 : formulation de géopolymère pour une éprouvette de 16*16*4

	F1	F2	F3	F4
Laitier	82.74g	82.74g	82.74g	82.74g
NaOH	15g	15g	15g	15g
Selicate	45g	45g	45g	45g
Gravier8/15	176g	120g	192g	137g
Gravier3/8	120g	176g	176g	200g
Sable	50g	86g	0g	0g

II.7 Malaxage et mise en œuvre des éprouvettes :

- Tout d'abord on a mélangé les deux classes de gravier 3/8 et 8/15 avec le laitier de haut Fournaux à l'état sec afin d'assurer une bonne répartition des constituants.

- En ajoutant la solution chimique (NaOH et NaSiO₄), qui été déjà préparé.
- En mélange les composants jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et uniforme.



Figure 33 : Différents états du mélange géopolymérique.

- En préparées les éprouvettes de forme rectangulaire (40 mm × 40 mm × 160 mm).
- Les moules ont été huilés avant le coulage afin de faciliter le démoulage.
- Le mélange géopolymérique a été versé dans les moules puis compacté légèrement.
- Le démoulage doit être après 24 heures depuis le coulage.



Figure 34 : moule (4*4*16) rempli d'un échantillon de géopolymère.

II.8 Essais expérimentaux :

II.8.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a été réalisée sur deux classes de graviers de dimensions 3/8 mm et 8/15 mm Cet essai permet de déterminer la répartition des grains en fonction de leur taille ainsi que les pourcentages pondéraux correspondants de chaque fraction granulaire

constituant l'échantillon. L'analyse granulométrique est effectuée par tamisage conformément aux normes en vigueur et s'applique aux granulats dont la dimension maximale est supérieure à 0,063 mm. Les résultats obtenus permettent d'évaluer la distribution granulométrique des granulats et de vérifier leur conformité aux exigences de formulation des géopolymères.

- On prend 600g gravier 3/8 sèche M1
- L'échantillon est lavé sur un tamis de **0,063 mm** pour éliminer les particules fines (< 0,063 mm)
- L'échantillon lavé est séché à 110 ± 5°C refroidi à température ambiante
Masse après séchage : M2 = 0,592kg = 592g
- L'échantillon est ensuite tamisé à travers la série : (**8; 6; 3; 2; 1; 0,5; 0,315; 0,25; 0,125; 0,063 mm**)
- On pèse le refus sur chaque tamis
- La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond doit coïncider avec M2
- La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage doit être < 1% de poids totale de l'échantillon
- Calculer le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 0,063 mm

$$f(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Tableau 9: Analyse granulométrique du gravier 3/8

Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus Ri(kg)	Masse de refus cumulés Rn(kg)	Pourcentages des refus cumulés (Rn/m1) x100 (%)	Pourcentages cumulés de tamisât (%)
8,0	0,014	0,014	2,33	97
6,3	0,187	0,201	33,5	67
4,0	0,381	0,519	86,5	14
2,0	0,068	0,587	97,8	2
Matériaux dans le réceptacle P=0,001		ΣRi=0,587		

La perte éventuelle inférieure à 1%

=0,67

Teneur de fines (%) = 2%

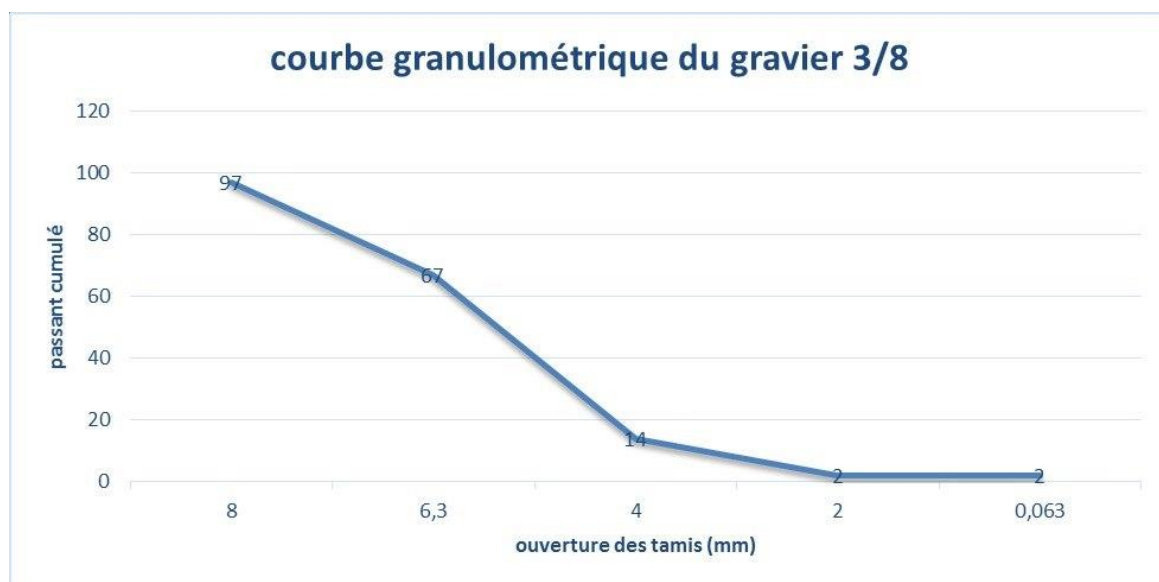


Figure 35 : Courbe granulométrique du gravier 3/8.

Même principe pour le gravier 8/15

M1=2,6Kg ; M2=2,562Kg

Tableau 10: Analyse granulométrique du gravier 8/15

Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus Ri(kg)	Masse de refus cumulés Rn(kg)	Pourcentages des refus cumulés (Rn/m1) x100 (%)	Pourcentages cumulés de tamisât (%)
16	0,152	0,152	5,84	94
14	0,409	0,561	21,57	78
10	1,618	2,17	83,46	17
8	0,361	2,53	97,30	3
6.3	0,029	2,56	98	2
Matériaux dans le réceptacle P=0,001		ΣRi=2,56		

La perte éventuelle < 1%
=0.04

Teneur de fines (%) =2%

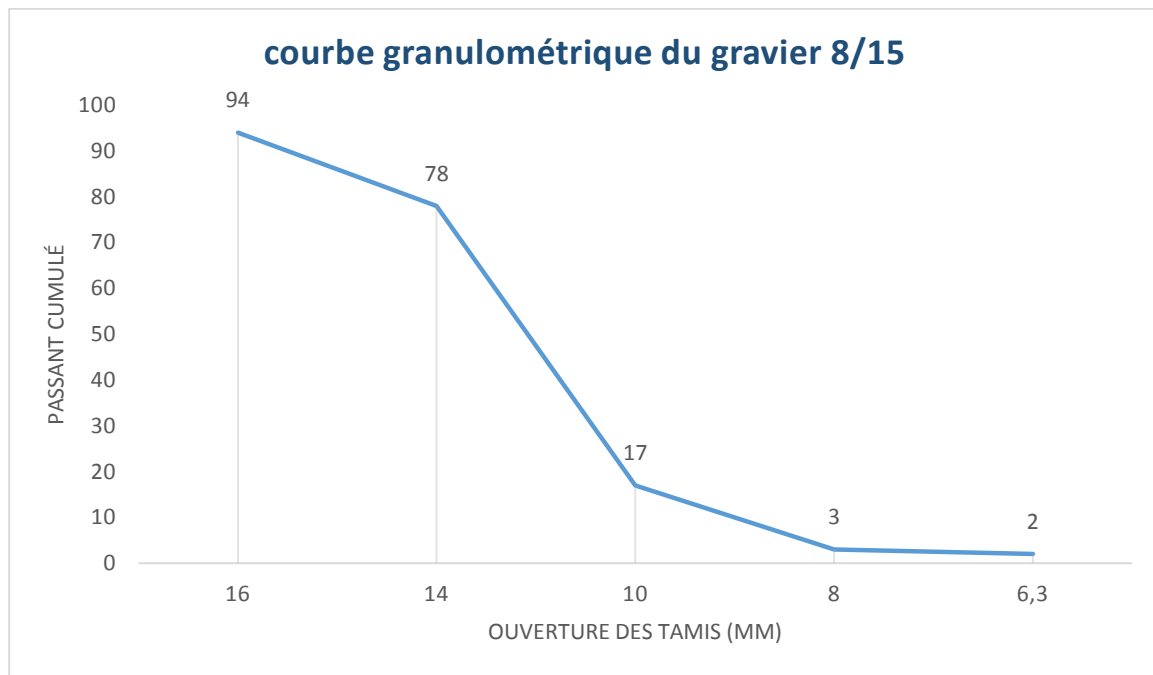


Figure 36 : Courbe granulométrique du gravier 8/15

II.8.2 Résistances mécaniques :

Les performances mécaniques des matériaux ont été évaluées à travers des essais de résistance à la flexion et à la compression. Ces essais ont été réalisés à différents âges de durcissement, à savoir après **1 jour, 7 jours, 15 jours et 28 jours**.

1 Résistance à la flexion : Pour évaluer la résistance à la flexion par traction des échantillons, nous avons utilisé une presse hydraulique MATEST, conformément à la norme

NF EN 196-1. Pour chaque composition, Après un durcissement de 28 jours, les échantillons ont été soumis à un essai de flexion., comme indiqué dans la figure correspondante.

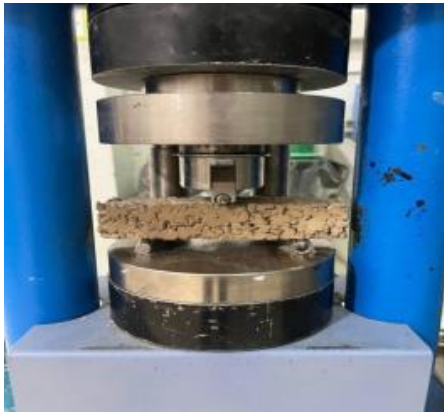


Figure 37 : résistance à la flexion géopolymère

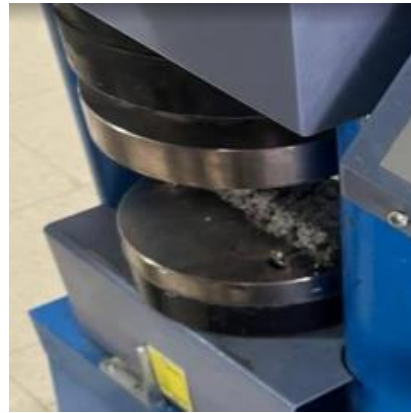


Figure 38 : résistance à la flexion ciment

2 Résistance à la compression :

La résistance à la compression a été déterminée avec la presse MATEST. Une charge de compression a ensuite été appliquée à une vitesse constante jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La charge maximale d'écrasement a été enregistrée, puis la résistance à la compression a été déterminée et exprimée en MPa.



Figure 39: résistance à compression ciment



Figure 40 : résistance à la compression

Géopolymer

II.8.3 Essai de gel/dégel :

La durabilité des pavés drainants vis-à-vis des cycles de gel et de dégel a été évaluée conformément à la norme ASTM C666, Procédure A. Cet essai permet de déterminer la résistance des matériaux soumis à des variations répétées de température en conditions de saturation.

Les échantillons ont été immergés dans l'eau pendant toute la durée de l'essai afin de reproduire les conditions les plus défavorables. Chaque cycle de gel/dégel, d'une durée totale de 5 heures, comprenait les étapes suivantes :

- Refroidissement jusqu'à une température de -18°C pendant 2 heures.
- Maintien à -18°C pendant 30 minutes.
- Dégivrage jusqu'à une température de $+4^{\circ}\text{C}$ pendant 2 heures.
- Maintien à $+4^{\circ}\text{C}$ pendant 30 minutes.

À l'issue du nombre de cycles prévu, les éprouvettes ont été examinées afin d'évaluer l'effet des cycles de gel/dégel sur leurs propriétés physiques et mécaniques. Les variations de masse ainsi que les éventuelles dégradations visibles ont été relevées et analysées afin d'apprécier la durabilité des formulations étudiées.



Figure 41 : les échantillons pendant le cycle de gel dégel

II.8.4 Perte de masse :

La perte de masse des éprouvettes a été déterminée avant et après les cycles de gel/dégel. Les échantillons ont été pesés à l'aide d'une balance de précision, puis la variation de masse a été calculée afin d'évaluer le degré de dégradation engendré par les cycles thermiques. Une faible perte de masse traduit une meilleure résistance du matériau aux sollicitations de gel et de dégel.

II.8.5 Essai d'absorption d'eau :

- Après 28 jours de cure, les éprouvettes cubiques sont séchées dans une étuve à une température de 105 ± 5 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
- Les éprouvettes sont ensuite refroidies à température ambiante.
- La masse sèche de chaque éprouvette (**Ms**) est déterminée à l'aide d'une balance de précision.
- Les éprouvettes sont immergées dans l'eau pendant **24 heures**.
- Après immersion, elles sont retirées de l'eau et essuyées superficiellement afin d'éliminer l'excès d'eau présent à leur surface.
- La masse saturée (**Mh**) de chaque éprouvette est alors mesurée à l'aide d'une balance de précision.

II.8.6 Essai de perméabilité :

Chaque échantillon a été placé dans un tube en PVC en assurant une bonne étanchéité sur les côtés afin d'éviter les fuites d'eau. Une hauteur d'eau constante de 5 cm a été maintenue au-dessus de la surface du pavé. Un volume d'eau de 1500 cm³ a ensuite été versé dans le tube et le temps nécessaire au passage complet de l'eau à travers le pavé a été mesuré à l'aide d'un chronomètre.

Conclusion :

Dans ce chapitre, les matériaux utilisés pour la fabrication des pavés drainants en béton et en géopolymère ont été présentés ainsi que le protocole expérimental adopté. Les différentes formulations et méthodes d'essai mises en œuvre constituent une base essentielle pour l'évaluation et la comparaison des performances physiques et mécaniques des pavés élaborés. Les résultats obtenus seront analysés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Résultat et discussion

Chapitre III : Résultat et discussion

III.1. Introduction :

Ce chapitre présente et analyse les performances des différentes formulations étudiées, comprenant le géopolymère à base de laitier (MGP) et les bétons drainants à base de ciment M1 à M6. L'étude vise à évaluer l'influence de la composition des mélanges, notamment du rapport eau/ciment et de la proportion entre les granulats 3/8 et 8/15, sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des bétons drainants. Les paramètres examinés sont la résistance à la compression à différents âges de conservation, l'absorption d'eau, la masse volumique sèche ainsi que la résistance résiduelle après 15 cycles de gel-dégel. Le MGP est considéré comme une formulation de référence indépendante des rapports eau/ciment appliqués aux bétons drainants cimentaires. L'analyse conjointe de ces résultats permet d'identifier les formulations offrant le meilleur compromis entre résistance mécanique, porosité, absorption d'eau, compacité et comportement face aux sollicitations climatiques, tout en préservant la fonction principale du béton drainant, qui est de permettre l'infiltration et l'évacuation des eaux. Les résultats présentés dans ce chapitre permettent ainsi de comparer l'efficacité du liant géopolymérique à celle des formulations cimentaires et de déterminer la composition la plus favorable pour une utilisation durable des bétons drainants.

III. 2. Résistance à la compression

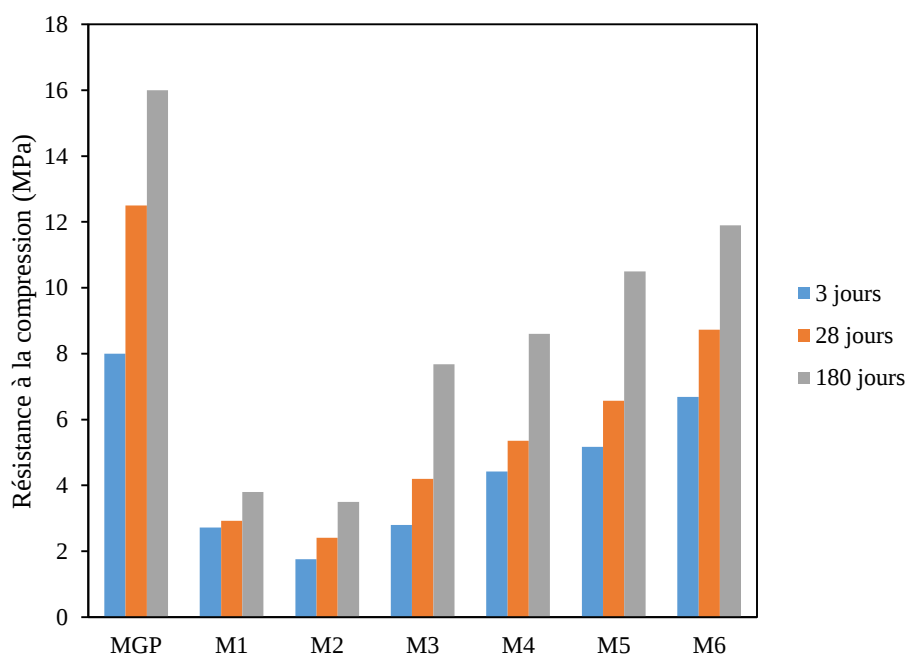


Figure 42 : Résistance à la compression de différents mélanges.

Les résultats de résistance à la compression mettent en évidence une évolution différente entre le MGP, qui est un géopolymère à base de laitier utilisé comme référence indépendante des formulations de béton drainant, et les mélanges M1 à M6, qui sont des bétons drainants à base de ciment composés uniquement de granulats, de ciment et d'eau. Le MGP développe les résistances les plus élevées à tous les âges, passant de 8 MPa à 3 jours à 12,5 MPa à 28 jours puis à 16 MPa à 180 jours, ce qui traduit une progression régulière et importante de la réaction géopolymérique du laitier ; cette évolution ne doit donc pas être interprétée en fonction du rapport E/c ou de la répartition des granulats étudiés pour les bétons cimentaires. Pour les bétons drainants M1 à M6, toutes les formulations présentent une augmentation de la résistance avec l'âge, confirmant la poursuite de l'hydratation du ciment et le renforcement progressif des liaisons entre les granulats, mais les niveaux de résistance restent inférieurs à ceux du MGP en raison de leur porosité élevée et de l'absence de sable, caractéristiques essentielles du béton drainant. À rapport E/c = 0,30, les formulations M1, M2 et M3 atteignent respectivement 3,8 MPa, 3,5 MPa et 7,68 MPa à 180 jours ; M3, ayant la proportion la plus élevée de gravier 3/8 par rapport au gravier 8/15, donne les meilleurs résultats de ce groupe, ce qui suggère que l'augmentation de la fraction de petits granulats améliore le contact entre les grains et la continuité du squelette granulaire. À rapport E/c = 0,35, les résistances sont globalement plus élevées, avec 8,6 MPa pour M4, 10,5 MPa pour M5 et 11,9 MPa pour M6 à 180 jours, indiquant qu'un rapport E/c de 0,35 assure dans ces conditions une quantité d'eau plus favorable à l'enrobage des granulats et à l'hydratation du ciment, sans provoquer une diminution excessive de la cohésion du mélange.

La meilleure formulation cimentaire est donc M6, caractérisée par E/c = 0,35 et un rapport gravier 3/8 sur gravier 8/15 de 0,4, car elle atteint les résistances les plus élevées à 3, 28 et 180 jours, tandis que M2 constitue la formulation la moins résistante ; l'ensemble des résultats montre ainsi que, pour ce béton drainant cimentaire, l'augmentation de la fraction de gravier 3/8 et le passage de E/c = 0,30 à E/c = 0,35 améliorent globalement la résistance à la compression, tout en conservant le caractère poreux requis pour assurer le drainage.

III.3. Absorption d'eau :

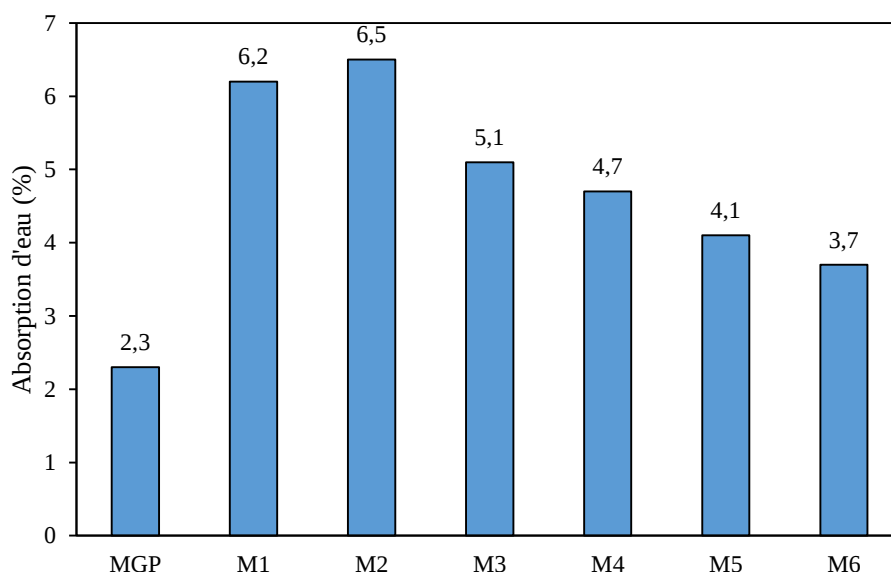


Figure 43 : Résultat de l'absorption d'eau.

Les résultats d'absorption d'eau montrent une différence nette entre le MGP et les bétons drainants à base de ciment. Le MGP présente l'absorption la plus faible, égale à 2,3 %, ce qui indique une matrice géopolymérique à base de laitier relativement dense, avec une porosité accessible à l'eau limitée et une meilleure continuité du liant. À l'inverse, les formulations cimentaires M1 à M6 présentent des absorptions plus élevées, comprises entre 3,7 % et 6,5 %, ce qui est cohérent avec la nature poreuse des bétons drainants, conçus sans sable afin de conserver des vides interconnectés permettant le passage de l'eau. M2 possède l'absorption la plus élevée, soit 6,5 %, suivie de M1 avec 6,2 %, ce qui traduit une structure plus ouverte et une quantité plus importante de pores accessibles ; ces formulations peuvent donc présenter une capacité de drainage plus élevée, mais une sensibilité potentiellement plus importante à l'humidité, au gel-dégel et à la dégradation de la pâte de ciment. L'absorption diminue ensuite progressivement de M3 à M6, avec 5,1 % pour M3, 4,7 % pour M4, 4,1 % pour M5 et 3,7 % pour M6. Cette diminution suggère que les formulations M3 à M6 possèdent un meilleur remplissage des vides entre les granulats et une pâte liante plus continue, ce qui réduit la quantité d'eau pouvant être absorbée. Parmi les bétons drainants cimentaires, M6 présente donc le comportement le plus favorable du point de vue

de l'absorption d'eau, tandis que M2 est la formulation la plus absorbante. Ces résultats indiquent ainsi qu'une absorption faible est associée à une meilleure compacité et à une durabilité potentiellement supérieure, mais elle doit rester compatible avec l'objectif principal du béton drainant, qui est de maintenir une porosité ouverte suffisante pour assurer l'infiltration et l'évacuation de l'eau.

III.4. Masse volumique

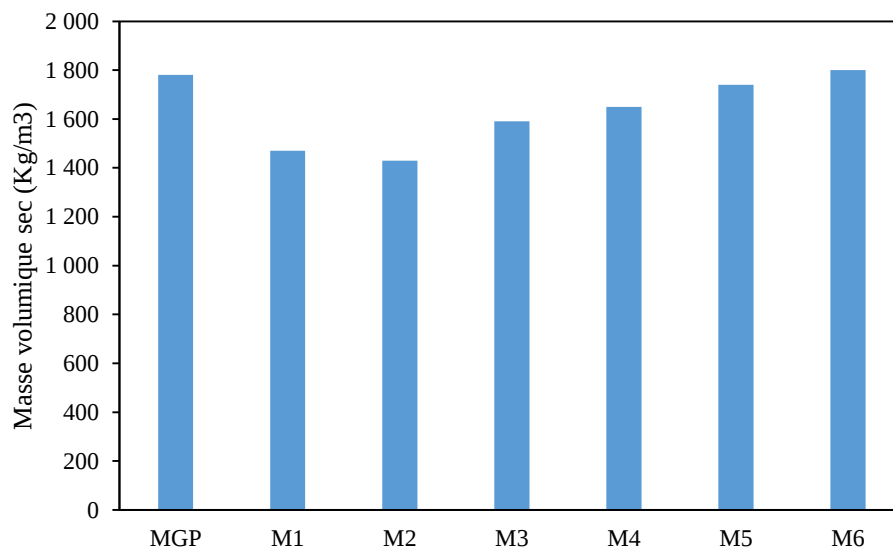


Figure 44 : Résultat de la masse volumique sec.

Les résultats de densité apparente montrent une variation importante entre les formulations, allant de 1 430 kg/m³ pour M2 à 1 800 kg/m³ pour M6, ce qui traduit des différences de compacité, de porosité et d'arrangement des granulats dans les bétons étudiés. La formulation M2 présente la densité la plus faible, suivie de M1 avec 1 470 kg/m³ ; ces faibles densités indiquent une structure plus poreuse et une quantité de vides plus importante, ce qui est cohérent avec leurs absorptions d'eau élevées et leurs faibles résistances à la compression. M3 présente une densité intermédiaire de 1 590 kg/m³, traduisant une amélioration du remplissage entre les granulats et une diminution relative de la porosité, ce qui explique l'augmentation de sa résistance par rapport à M1 et M2. Les formulations M4, M5 et M6 présentent les densités les plus élevées parmi les bétons drainants à base de ciment, avec respectivement 1 650, 1 740 et 1 800 kg/m³ ; cette progression indique une structure granulaire de plus en plus compacte, une meilleure continuité de la pâte de ciment et une réduction des vides internes, ce qui est en accord avec la baisse progressive de l'absorption d'eau et l'augmentation de la résistance à la compression observées pour ces formulations. M6 constitue ainsi la formulation cimentaire la plus dense et la plus compacte, ce qui explique sa résistance élevée et sa faible absorption d'eau, tandis que M5 présente également un comportement favorable. Le MGP possède

une densité apparente de 1 780 kg/m³, proche de celle de M6, tout en ayant une résistance à la compression plus élevée ; cela indique que sa matrice géopolymérique à base de laitier développe une efficacité mécanique importante, avec une bonne cohésion interne et une porosité limitée. Globalement, les résultats confirment qu'une densité apparente plus élevée est généralement associée à une meilleure résistance mécanique et à une absorption d'eau plus faible ; toutefois, dans le cas du béton drainant, cette densification doit rester contrôlée afin de préserver une porosité ouverte suffisante pour assurer la fonction de drainage.

III.5. Résistance aux cycle gel dégel

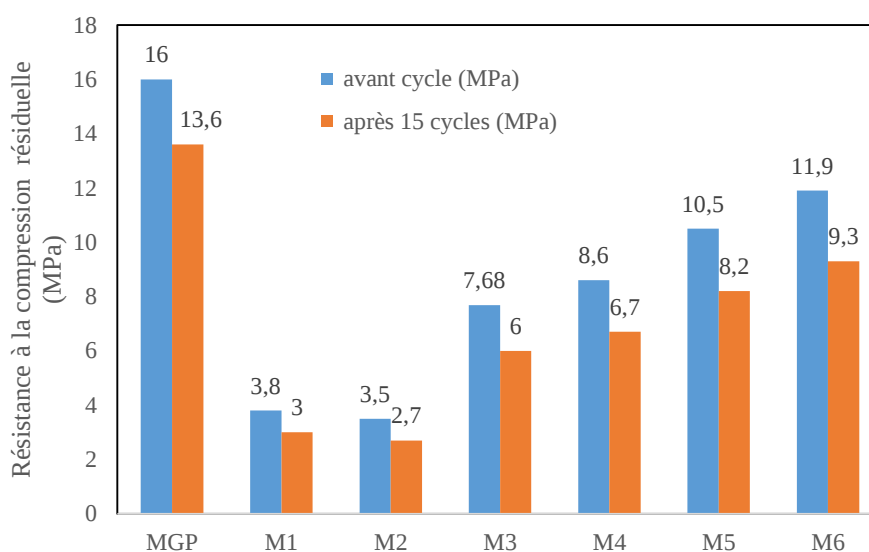


Figure 45 : Résultats de la résistance à la compression résiduelle.

Les résultats après 15 cycles de gel-dégel montrent que toutes les formulations subissent une diminution de leur résistance à la compression, ce qui confirme l'effet défavorable des cycles thermiques sur la durabilité des matériaux cimentaires et géopolymériques. Cette baisse est liée à la pénétration de l'eau dans les pores, puis à son augmentation de volume lors du gel, qui provoque des pressions internes, des microfissures et une dégradation progressive de l'adhérence entre le liant et les granulats. Le MGP présente le meilleur comportement face au gel-dégel, avec une résistance passant de 16,00 MPa à 13,60 MPa, soit une perte limitée à 15 %, ce qui indique une matrice géopolymérique à base de laitier relativement dense et plus résistante aux sollicitations répétées. Les bétons drainants à base de ciment, M1 à M6, présentent des pertes plus importantes, comprises entre 21,1 % et 22,9 %, ce qui s'explique par leur porosité élevée et l'absence de sable : ces caractéristiques favorisent le drainage de l'eau, mais peuvent aussi permettre une plus grande exposition des pores et des zones de liaison aux effets du gel-dégel. Parmi les formulations cimentaires, M2 est la plus sensible

avec une perte de 22,9 % et une résistance finale de seulement 2,70 MPa, tandis que M1 atteint 3,00 MPa après cycles ; ces faibles valeurs montrent que les formulations ayant une faible résistance initiale sont plus vulnérables à la dégradation. À l'inverse, M6 conserve la résistance la plus élevée parmi les bétons drainants cimentaires, soit 9,30 MPa après 15 cycles, suivie de M5 avec 8,20 MPa et de M4 avec 6,70 MPa. Même si M6 présente la perte absolue la plus élevée, égale à 2,60 MPa, son taux de perte reste voisin de celui des autres bétons cimentaires, ce qui signifie que cette diminution est principalement liée à sa résistance initiale plus élevée et non nécessairement à une durabilité inférieure. Globalement, les résultats indiquent que le rapport E/c de 0,35 et l'augmentation de la proportion de gravier 3/8 améliorent la résistance résiduelle après gel-dégel, particulièrement pour M5 et M6, tandis que le MGP reste la formulation la plus performante et la plus durable dans les conditions considérées.

III.6.perméabilité :

Afin d'évaluer les performances hydrauliques des pavés drainants, seules les deux meilleures formulations à base de ciment (M5 et M6), sélectionnées sur la base des résultats des essais précédents (résistance à la compression, absorption d'eau et porosité), ont été retenues pour l'essai de perméabilité. Ces formulations ont ensuite été comparées à la formulation géopolymérique (MGP) afin d'évaluer l'influence du type de liant sur le comportement hydraulique des pavés.

Les résultats du coefficient de perméabilité mettent en évidence des différences significatives entre les trois formulations étudiées. La formulation géopolymérique (MGP) présente la perméabilité la plus élevée, avec un coefficient de 0,268 cm/s, suivie de la formulation M6 avec 0,223 cm/s, tandis que la formulation M5 enregistre la valeur la plus faible, soit 0,167 cm/s. Ces résultats montrent que la formulation MGP favorise davantage l'infiltration de l'eau, ce qui traduit la présence d'un réseau de pores ouverts plus efficace et mieux connecté.

La formulation M5 présente le coefficient de perméabilité le plus faible. Cette diminution peut être attribuée à une structure interne plus compacte ou à une porosité ouverte moins développée, ce qui ralentit l'écoulement de l'eau à travers le pavé. Bien que cette formulation puisse offrir une meilleure compacité, elle est moins performante du point de vue de la fonction drainante.

La formulation M6 présente un comportement intermédiaire, avec une perméabilité supérieure à celle de M5 mais inférieure à celle du géopolymère. Cette amélioration traduit une structure poreuse plus favorable à l'infiltration de l'eau tout en conservant une bonne cohésion interne.

La formulation MGP enregistre le meilleur coefficient de perméabilité (0,268 cm/s), ce qui confirme l'efficacité de la matrice géopolymérique à base de laitier dans le développement d'une porosité ouverte favorisant le drainage des eaux pluviales. Cette performance est particulièrement intéressante pour les applications en pavés drainants, où une infiltration rapide de l'eau constitue une exigence essentielle.

Globalement, les résultats montrent que la perméabilité dépend directement de la structure poreuse des formulations. Une augmentation de la porosité ouverte favorise l'écoulement de l'eau et améliore les performances hydrauliques du pavé. Dans cette étude, la formulation MGP apparaît comme la plus performante en termes de perméabilité, suivie de M6, alors que M5 présente les performances hydrauliques les plus faibles parmi les formulations étudiées

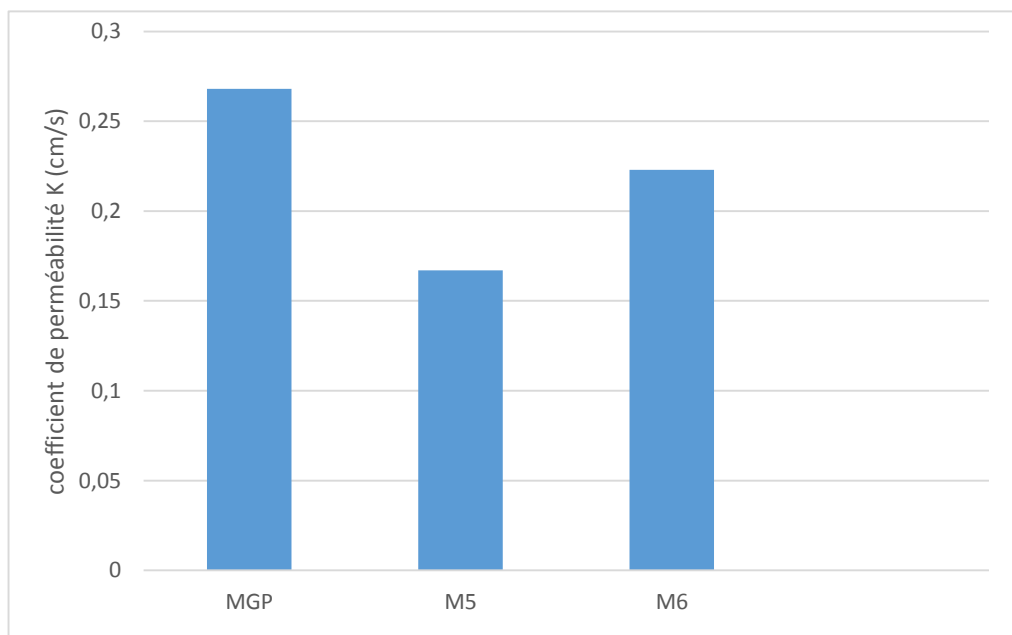


Figure46 : résultat de la perméabilité

III.7. Conclusion :

Les résultats obtenus montrent que les propriétés des bétons drainants sont fortement influencées par la composition granulaire et par le rapport eau/ciment des formulations à base de ciment. Le MGP à base de laitier présente les meilleures performances globales, avec une résistance à la compression de 16 MPa à 180 jours, une faible absorption d'eau de 2,3 %, une masse volumique sèche de 1 780 kg/m³ et une résistance résiduelle de 13,6 MPa après 15 cycles de gel-dégel, correspondant à une perte limitée de 15 %. Ces résultats indiquent que la matrice géopolymérique possède une bonne cohésion, une porosité accessible réduite et une meilleure résistance aux sollicitations de gel-dégel. Pour les bétons drainants à base de ciment, les formulations M1 et M2 présentent les performances les plus faibles, caractérisées par de faibles résistances, des absorptions d'eau élevées et des masses volumiques plus faibles, ce qui traduit une structure plus poreuse et moins compacte. À l'inverse, les formulations M4, M5 et surtout M6 présentent une amélioration progressive de la résistance à la compression, une diminution de l'absorption d'eau et une augmentation de la masse volumique, indiquant une meilleure organisation du squelette granulaire et un enrobage plus efficace des granulats par la pâte de ciment. La formulation M6 constitue la meilleure formulation cimentaire, avec une résistance de 11,9 MPa à 180 jours, une absorption d'eau de 3,7 %, une masse volumique de 1 800 kg/m³ et une résistance résiduelle de 9,3 MPa après gel-dégel. Ainsi, l'augmentation de la fraction de gravier 3/8 et l'utilisation d'un rapport E/c de 0,35 améliorent globalement les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons drainants cimentaires. Toutefois, cette densification doit être maîtrisée afin de conserver une porosité ouverte suffisante pour assurer le drainage.

Conclusion générale :

Ce travail de recherche a permis d'étudier les pavés drainants comme une solution durable pour répondre aux problématiques engendrées par l'imperméabilisation croissante des surfaces urbaines et les difficultés de gestion des eaux pluviales. À travers une analyse bibliographique et une étude expérimentale, l'intérêt de ces revêtements perméables a été mis en évidence tant sur le plan hydraulique qu'environnemental. L'étude a porté sur la comparaison de pavés drainants élaborés à base de ciment et de géopolymère. Les différents essais réalisés ont permis d'évaluer leurs propriétés physiques, hydrauliques et mécaniques, notamment la résistance à la compression, l'absorption d'eau, la porosité et la perméabilité. Les résultats obtenus ont montré que les pavés drainants possèdent une capacité significative

d'infiltration des eaux pluviales, contribuant ainsi à la réduction du ruissellement de surface et à l'amélioration de la gestion des eaux en milieu urbain. Par ailleurs, l'utilisation des géopolymères comme liant alternatif au ciment présente des avantages environnementaux importants grâce à la réduction des émissions de dioxyde de carbone et à la valorisation de matériaux riches en aluminosilicates. Les performances observées démontrent que les pavés drainants géopolymériques peuvent constituer une alternative prometteuse aux pavés traditionnels tout en répondant aux exigences techniques des aménagements urbains. En définitive, les pavés drainants représentent une solution innovante et durable permettant de concilier gestion efficace des eaux pluviales, protection de l'environnement et développement urbain durable. Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives intéressantes pour l'utilisation à plus grande échelle des matériaux géopolymériques dans les infrastructures urbaines et encouragent la poursuite des recherches sur leur durabilité à long terme et leur comportement dans différentes conditions d'exploitation.

Références

- [1] cerema,integrer la gestion des eaux pluviales dans urbanisme le zonage pluvial, 23 décembre 2021 .
- [2] Bruxelles Environnement, Évaluation du pouvoir dépolluant de structures drainantes (Présentation « PAVA »), mars 2019.
- [3] FranceEnvironnement, *Les enjeux de la gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain
- [4] ECOVEGETAL, *Pavage drainant : comment le réussir ?*.
- [5] DBM Énergie, *Pavage drainant : guide complet pour réussir votre projet*.
- [6] Université Gustave Eiffel, *Une économie circulaire avec des liants alternatifs et innovants
- [7] VAILLANCOURT, Catherine. Impact hydrologique du pavage perméable en milieu urbain au Québec. Mémoire de maîtrise (M.Sc.) en sciences de l'eau, Institut national de la recherche scientifique (INRS), Centre Eau Terre Environnement, Université du Québec, août 2018.
- [8] Wikipédia, *Surface imperméabilisée*.
- [9] France Nature Environnement, *Artificialisation des terres : enjeux et solutions*
- [10] France Nature Environnement Occitanie Méditerranée, *Guide de l'imperméabilisation des sols
- [11] Wikipédia, *Pavé*
- [12] Encyclopaedia Britannica, *Kaolin*.
- [13] Unilock,
- [14] Editeur responsable: E. Van den Bossche, Boulevard de la Woluwe 42, 1200 Bruxelles. (www.febe.be) centre des recherches routière;Revêtements drainants en pavés de béton.
- [15] PTV 126 ou PTV 122 (Probeton, 2023).
- [16] Beeldens et al., 2008.

- [17] Hollenbeck et Göbel, 2013.
- [18] Agouridis, et al., 2011.
- [19] (Bean et Bidelsbach, 2004 ; Jayasuriya et Kadurupokune, 2008.
- [20] Abdo, 2007.
- [21] Dawson, 2009.
- [22] Huang et al., 2016; Jayasuriya et Kadurupokune, 2008; Legret et Colandini, 1999.
- [23] Garrigues, 2013.
- [24] CERTU, 2006.
- [25] Fletcher et al., 2013.
- [26] [Barraud et al., 2010.
- [27] .J. Davidovits, « Geopolymer chemistry and applications: Saint-Quentin » 2011.
- [28] H. Kuehl, « Slag cement and process of making the same », Brevet US A, vol. 900939, p. 1907, 1907.
- [29] M. Lizcano, H. S. Kim, S. Basu, et M. Radovic, « Mechanical properties of sodium and potassium activated metakaolin-based geopolymers », Journal of Materials Science, vol. 47, p. 26072616, 2012.
- [30] F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, A. Camões, M. Jamshidi, et Y. Ding, « Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue? », Construction and Building Materials, vol. 30, p.400405,2012.
- [31] V. D. Glukhovsky, “Soil silicates: their properties, technology and manufacturing and fields of application,” Doct. Tech. Sc. Degree Thesis, Civil Engineering Institute, Kiev, Ukraine,1965.
- [32] Impact des fines recyclées sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers géopolymères Par Abdessalam Bouchibi et Wahid Benfredj. Soutenu le : 2 juillet 2023 univ bba.
- [33] Saloni, Parveen, Y. Y. Lim, T. M. Pham, Jatin, and J. Kumar, “Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies,” Constr Build Mater, vol. 283, May 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122795.

- [34] R. M. Kalombe, V. T. Ojumu, C. P. Eze, S. M. Nyale, J. Kevern, and L. F. Petrik, "Fly ash-based geopolymer building materials for green and sustainable development," *Materials*, vol. 13, no. 24, pp. 1–17, Dec. 2020, doi: 10.3390/ma13245699 .
- [35] S. Puligilla and P. Mondal, "Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer," *Cem Concr Res*, vol. 43, pp. 70–80, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.004>.
- [36] E. H. Alakara, Ö. Sevim, İ. Demir, and G. Günel, "Effect of waste concrete powder on slag based sustainable geopolymer composite mortars," *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, vol. 13, no. 3, 2022, doi: 10.20528/cjcr.2022.03.003.
- [37] X. Liang and Y. Ji, "Mechanical properties and permeability of red mud-blast furnace slag-based geopolymer concrete," *SN Appl Sci*, vol. 3, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1007/s42452-020-03985-4.
- [38] Ş. Bingöl, C. Bilim, C. D. Atiş, and U. Durak, "Durability Properties of Geopolymer Mortars Containing Slag," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 44, pp. 561–569, Oct. 2020, doi: 10.1007/s40996-019-00337-0.
- [39] M. Liu, R. Hu, Y. Zhang, C. Wang, and Z. Ma, "Effect of ground concrete waste as green binder on the micro-macro properties of eco-friendly metakaolin-based geopolymer mortar," *Journal of Building Engineering*, vol. 68, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106191
- [40] N. H. Jamil, Mohd. M. A. B. Abdullah, F. Che Pa, H. Mohamad, W. M. A. W. Ibrahim, and J. Chaiprapa, "Influences of SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 10, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.045>.
- [41] M. Zerzouri, « Faisabilité d'élaboration des poudres pré-géopolymères par mécanosynthèse: caractérisation physico-chimique et application aux pâtes, mortiers et enrobés bitumineux », 2021.
- [42] A. Gharzouni, « Contrôle de l'attaque des sources aluminosilicates par la compréhension des solutions alcalines », 2016.
- [43] Jgs. van Jaarsveld et J. Van Deventer, « Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers », *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 38, no 10, p. 3932-3941, 1999.

- [44] S. Hanjitsuwan, S. Hunpratub, P. Thongbai, S. Maensiri, V. Sata, et P. Chindaprasirt, « Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste », *Cement and Concrete Composites*, vol. 45, p. 914, 2014.
- [45] A. C. El Idrissi, « Géopolymérisation et activation alcaline des coulis d'injection: structuration, micromécanique et résistance aux sollicitations physicochimiques », 2016.
- [46] J. Aupoil, « Etude des mécanismes de dissolution/polycondensation lors de la géopolymérisation: réactivité du métakaolin et influence de la solution d'activation 2019 .
- [47] Contribution à l'analyse de l'impact des déchets sur le comportement et la durabilité des matériaux géopolymère par Mati Salah Eddine Soutenu le : 30 juin 2025 page 25.
- [48] Ebema_et_URBCON_pavés drainants_en_béton_géopolymère.html.