

Université Saad Dahlab – Blida1
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Laboratoire de Géo-Matériaux et Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT
Spécialité Génie Civil
Option : Géotechnique

**CARACTERISATION ET ÉTUDE DE
COMPORTEMENT D'UN POLYSTYRÈNE RENFORCÉ
PAR GÉOMEMBRANE POLYGLASSE DANS LA
CONSTRUCTION DES REMBLAIS ROUTIERS**

Par
M^r METTAI Mohamed

Devant le jury composé de :

YAHIAOUI Walid	MCA. Université de Blida1	Président
DEBIEB Farid	Prof. Université de Médéa	Examineur
KEBAILI Nabil	MCA Université d'Ouragla	Examineur
HADJ SADOK Ahmed	Prof. ENSH- Blida	Examineur
HAZOUT Leila	M.C.A Université de Blida1	Examinatrice
ABDESSEMED Mouloud	Prof. Université de Blida1	Rapporteur

Blida1- 2024

DEDICACES

À mes parents qui ont toujours été une source d'inspiration et de soutien, et qui ont prié pour que je réussisse dans mes études, je leur suis infiniment reconnaissant. Leur amour inconditionnel et leur bienveillance ont été les piliers de ma réussite académique.

Je suis également redevable à ma tendre épouse, qui m'a accompagné tout au long de ce parcours, me prodiguant des encouragements et un soutien moral inébranlable dans toutes les circonstances.

Je ne saurais oublier mes chers enfants, Mohammed Barae, Walae, Fidae, Haneen et la petite Ibae, qui ont été une source constante de joie et de motivation pour moi. Leur présence et leur amour m'ont donné l'envie de travailler encore plus dur pour atteindre mes objectifs.

Enfin, à tous mes amis les plus chers, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu dans ma vie, je leur adresse mes plus sincères remerciements. Leur amitié et leur confiance en moi m'ont permis de continuer à avancer malgré les obstacles rencontrés sur ma route vers le succès.

Mohammed

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, Je tiens à remercier Le Bon Dieu, pour m'avoir donné le courage et la volonté, qui m'ont aidé à terminer à temps ce travail de thèse de doctorat.

Mes sincères remerciements à mon Directeur de thèse, Professeur **Mouloud ABDESSEMED**, Enseignant-Chercheur à l'Université Blida1, de m'avoir proposé ce sujet et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens scientifiques et technologiques, ainsi que son expérience, son savoir-faire pour la réalisation de ce travail.

Je présente mes sincères remerciements et respects à tous les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'accepter, de lire, d'analyser et d'examiner le contenu de ma thèse, en l'occurrence, le Président de jury, Dr YAHIOAUI Walid(Université de Blida1), les membres (examineurs) de jury : Pr DEBIEB Farid (université de Médéa) et Dr KEBAILI Nabil, (Université d'Ouargla), PrHADJ SADOK Ahmed(ENSH- Blida) et Dr HAZOUT Leila (Université de Blida1).

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Directeur de l'usine "OUASIS", située à Khemis-Khachena et à tous les membres de leur équipe, pour leur accueil chaleureux et leur contribution essentielle à la réussite de cette étude en mettant à ma disposition les produits nécessaires.

Je souhaite également remercier Monsieur le Directeur de l'entreprise Turque "MAPA", ainsi que tous les responsables de la société, pour leur générosité en mettant à ma disposition tout le matériel nécessaire et en fournissant des conseils précieux tout au long de ma campagne expérimentale.

Sans oublier, je tiens à exprimer mes sincères remerciements au directeur du laboratoire de l'Organisme de contrôle "CTTP" et à toute son équipe de m'avoir permis de réaliser une partie de mon travail expérimental chez eux.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Mme la Cheffe de Département de Génie Civil, ainsi que tout le corps enseignant et le personnel administratif de l'Université Saad Dahlab de Blida1, ainsi que toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin dans l'accomplissement de cette thèse.

Enfin, je tiens à remercier tous mes amis et collègues de l'agence "ADA" pour leur soutien matériel et moral tout au long de mes travaux expérimentaux.

Merci beaucoup à tous d'avoir contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

ملخص

إن مواد الردم التقليدية التي تستخدم غالباً في إنشاء طبقات الطرق، غالباً ما تكون غير مناسبة للحفاظ على استقرار الطرق بشكل دائم، حيث تتدهور و تهترئ بسرعة مع مرور الوقت. يبدو أن تقنية الردم الخفيف بالبوليستيرين الممدد يمكن أن تكون حلاً بديلاً، حيث تمكن من علاج وتأخير بدء هذا التدهور، بفضل خصائصه الميكانيكية العالية (قوة الضغط، قوة القص، ومعامل الصلابة). سيقوم هذا المشروع بدراسة السلوك الميكانيكي لنوع من البوليستيرين المصنوع في الجزائر، تحت ظروف حمل متغيرة. ستركز الدراسة كذلك على تحديد قوة قص مادة البوليستيران لوحده و سطح البوليستيران مع سطح الجيوممبران المسمى (البوليفلاس). تم تطوير برنامج تجريبي من خلال إجراء اختبارات على عدد 147 عينة، وتم إجراء هذه الاختبارات عند كتل حجمية مختلفة (15 كغ/م³، 20 كغ/م³، و 25 كغ/م³)

تشير النتائج إلى أن مقاومة الانضغاط القصتناثر مباشرة بقيمة الكتلة الحجمية المستخدمة. كما أن هناك عوامل أخرى، مثل حجم العينة، والانغمار في الماء، والتعبئة بمادة الجيوممبران من نوع البوليفلاس. علماً بأن قيمة مقاومة (ومعامل الصلابة تراوح بين 1.6 ل و 169.5 كيلو باسكال للضغط المتحصل عليها تراوحت بين (45.2 كيلو باسكال). كما أظهرت النتائج أيضاً أن تجارب القص المدعم أعطى نتائج جيدة وهذا ل إلى 7.9 ميغا باسكال/ميغا باسكال راجع ربما إلى الخشونة العالية التي تميز سطح البوليفلاس معطية الفوارق التالية بين القص المباشر للبولستيران و القص المباشر بين سطحي البولستيران و البوليفلاس ب: (8.42%، 20.2%، و 24.65%) بالنسبة لمقاومة القص، (19.15%، 34.5%، و 16.2%) بالنسبة للتماسك، و (8.4%، 23%، و العمودية (50 كيلوباسكال، 100 كيلوباسكال و 150) ت 24.6%) بالنسبة لمعامل القص، تحت تأثير الاجتهاد كيلوباسكالو للكتل الحجمية (15 كغ/م³، 20 كغ/م³، و 25 كغ/م³) على التوالي. كما أن هذه الفوارق تعود إلى خشونة سطح البوليفلاس.

الكلمات المفتاحية

طريق، ردم خفيف، بولستيرين، غشاء جيوممبرين بوليفلاس، جيوفوم، تجريبي، تقوية، أحادي الاتجاه، ثلاثي الاتجاه، قص، ضغط، مقاومة.

Résumé

L'utilisation des matériaux de remblai traditionnels ne favorise pas la stabilité permanente des chaussées routières, car la dégradation se produit et se développe rapidement dans le temps. La technique du remblai léger en polystyrènes expansés apparaît comme une solution alternative, qui permet de réduire et de retarder l'apparition de ces dégradations, grâce à leurs caractéristiques mécaniques élevées (résistance à la compression et au cisaillement, module de rigidité). Ce travail portera sur l'étude du comportement mécanique d'un type de polystyrène fabriqué en Algérie, sous des conditions de chargement uni-axial et triaxial. L'étude portera sur l'évolution de la résistance au cisaillement directe d'EPS et renforcé par la géo-membrane (type Polyglass). Un programme expérimental a été développé en réalisant des essais sur un nombre de 147 échantillons, confectionnés à différentes masses volumiques (15Kg/m^3 , 20Kg/m^3 et 25Kg/m^3).

Les résultats montrent que la résistance (compression ou cisaillement), dépend directement de la masse volumique utilisée. D'autres paramètres, tels que la taille de l'échantillon, l'immersion dans l'eau et le renforcement par la géo-membrane Polyglasse, augmentent cette résistance et le module de rigidité, sachant que la résistance à la compression $\sigma_{10\%}$ est comprise entre (45,2 KPa et 169,5 KPa) et le module de rigidité E est compris entre (1.6MPa à 7.9MPa). Les résultats ont montré aussi, que le cisaillement direct avec ce renforcement a donné de bons résultats en raison de la forte rugosité du Polyglass. Les paramètres obtenus par cisaillement direct interagissant avec la Geomembrane Polyglasse donnent de meilleurs résultats que le cisaillement direct de momobloc EPS avec différence de (8.42%, 20.2%, et 24.65%) pour la résistance au cisaillement, (19.15%, 34.5%, et 16.2%) pour la cohésion et (8.4 %, 23.0 % et 24.6 %), pour le facteur de cisaillement G, respectivement pour les contraintes normales 50KPa, 100KPa et 150KPa et les masses volumiques de 15Kg/m^3 , 20Kg/m^3 et 25Kg/m^3 , et ce en raison de la forte rugosité de ce type de géo- membrane utilisée.

Mots-clés : Chaussée, remblai léger, polystyrène, Géo-membrane Polyglass, Géomousse, expérimental, renforcement, uni-axial, triaxial, cisaillement, compression, résistance.

Abstract

The use of traditional backfill materials is not conducive to the permanent stability of road pavements, as deterioration occurs and develops rapidly over time. The technique of lightweight expanded polystyrene backfill appears to be an alternative solution, making it possible to reduce and delay the onset of this deterioration, thanks to its high mechanical properties (compressive strength, shear strength and modulus of rigidity). This project will study the mechanical behaviour of a type of polystyrene manufactured in Algeria, under uniaxial and triaxial loading conditions. The study will focus on the evolution of the direct shear resistance of EPS and reinforced by geo-membrane (Polyglass type). An experimental programme was developed by carrying out tests on a number of 147 samples, and carried out at different densities (15Kg/m^3 , 20Kg/m^3 and 25Kg/m^3).

The results show that the resistance (compression or shear), depends directly on the density used. Other parameters, such as the sample size, immersion in water and reinforcement by the Polyglass geomembrane, increase this resistance and the rigidity modulus, knowing that the compressive strength $\sigma_{10\%}$ is between (45.2 KPa and 169.5 KPa) and the rigidity modulus E is between (1.6MPa to 7.9MPa). The results also showed that direct shear with this reinforcement gave good results due to the high roughness of the Polyglass. The parameters obtained by direct shear interacting with the Polyglass Geomembrane give better results than the direct shear of EPS momo-bloc with difference of (8.42%, 20.2%, and 24.65%) for the shear resistance, (19.15%, 34.5%, and 16.2%) for the cohesion and (8.4%, 23.0% and 24.6%), for the shear factor G , respectively for the normal stresses 50KPa, 100KPa and 150KPa and the densities of 15 Kg/m^3 , 20 Kg/m^3 and 25 Kg/m^3 , and this due to the high roughness of this type of geomembrane used.

Keywords: Pavement, light embankment, EPS polystyrene, Polyglass Geo-membrane, Geofoam, experimental, reinforcement, uniaxial, triaxial, shear, compression, strength.

Tables des Matières

Dédicaces

Remerciements

Résumés (Arabe, Français, Anglais)

Tables des Matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Symboles et Abréviations

Introduction Générale..... (14)

CHAPITRE I : Les Remblais Légers Généralité et Historique

I.1. Introduction.....	(19)
I.2. Evolution historique du polystyrène expansé.....	(19)
I.3 Fabrication et moulage de blocs polystyrène.....	(22)
I.4 Problématique et méthodes de traitement des sols compressible.....	(23)
I.5 Remblais légers.....	(24)
I.5.1 Matériaux des remblais léger.....	(24)
I.5.2 Remblais légers en polystyrène expansé (EPS).....	(25)
I.6 Avantages de l'utilisation du polystyrène expansé.....	(27)
I.6.1 Réduction des charges.....	(28)
I.6.2 Absorption d'énergie.....	(28)
I.6.3 Résistance aux effets sismiques.....	(29)
I.6.4 Rapidité et faciliter de construction.....	(30)
I.7 Applications diverses du polystyrène expansé.....	(31)
I.8 Utilisation de l'EPS 'géomouss	(32)
I.8.1 Application de l'EPS dans divers secteurs.....	(32)
I.8.2 Autres applications dans les projets des travaux publics.....	(34)
I.8.2a/ Projet de remblai néerlandais (A4) avec tramways en EPSgéomouss	(35)
I.8.2b/ Projet de remblai en géomouss EPS derrière la culée du pont E18 Farris.....	(35)
I.8.2c/ Le premier remblai routier en géomouss en Turquie.....	(35)
I.8.2 d/ Élargissement de l'autoroute néerlandaise A76.....	(35)
I.8.2 e/ Évaluation post-utilisation des caractéristiques des blocs EPS en Finlande.....	(35)
I.9 Objectifs de performance des géomouss.....	(35)
Conclusion.....	(36)

CHAPITRE II : Caractéristiques et Comportement mécanique

II.1 Introduction.....	(38)
II.2 Propriétés et défis physiques.....	(38)
II.2.1 Masse volumique	(39)
II.2.2 lafusion	(41)
II.2.3 Inflammabilité.....	(41)
II.2.4 Durabilité.....	(41)
II.2.5 Eeffets environnementaux.....	(42)

II.2.6	Résistance thermique et chimique.....	(43)
II.3	Caractérisations et étude de comportement.....	(43)
II.3.1	Comportement contrainte-déformation en compression uni-axial.....	(43)
II.3.1.1	Le module de Young.....	(47)
II.3.1.2	Coefficient de Poisson.....	(49)
II.4.	Comportement sous charges cycliques.....	(50)
II.5.	Comportement dépendant du temps (fluage).....	(51)
II.5.1.	Comportement au fluage sous charge statique.....	(52)
II.5.2.	Comportement au fluage sous charge dynamique.....	(53)
II.5.3.	Procédure recommandée pour considérer les contraintes de fluage	(53)
II.5.4.	Température – Comportement au fluage	(53)
II.6.	Comportement de retrait.....	(53)
II.7.	Comportement sous compression confinée (triaxial).....	(54)
II.8.	Comportement au cisaillement.....	(55)
II.8.1.	Comportement au cisaillement direct de monoblocs géomouss.....	(55)
II.8.2.	Comportement de l'EPS géomouss en termes de cisaillement directe renforcé.....	(56)
II.8.2.1	Interface EPS/EPS.	(56)
II.8.2.2	Interfaces EPS/matériaux dissemblables.....	(57)
II.9.	Tension et Flexion.....	(59)
	Conclusion.....	(59)

CHAPITRE III : Principes et Méthodologies de Conception et de Construction

III.1.	Introduction	(61)
III.2	Lignes directrices d'application et spécifications	(61)
III.2.1.	NPRA (l'Administration Norvégienne des Routes Publiques).....	(61)
III.2.2	L'Organisation de Développement de la Méthode d'EPS (EDO Japon).....	(62)
III.2.3	Normes Européennes.....	(62)
III.2.4.	Autres spécifications	(63)
III.3.	Considérations de conception et de construction.....	(65)
III.3.1	La capacité portante.....	(66)
III.3.2	Flottabilité	(68)
III.3.3	Chargement sismique.....	(69)
III.4.	Conception des remblais légers en polystyrène expansé	(71)
III.4.1	Considérations relatives à la composition des remblais légers	(71)
III.4.2	Investigation pour la conception	(71)
III.4.3	Méthodologies de conception	(72)
III.4.4	Procédure de conception	(72)
III.4.5	Phases de conception du remblai avec des blocs EPS	(73)
III.4.6	Paramètres influençant dans la conception.....	(74)
III.4.6.1	L'eau.....	(74)
III.4.6.2	Sismicité et vent.....	(75)
III.5	Dimensionnement et dispositions constructives	(76)
	Conclusion.....	(78)

CHAPITRE IV: Matériaux Utilisés, Confection des Eprouvettes et Procédures d'Essai

IV.1 Principe de l'étude.....	(81)
IV.2 Programme expérimental.....	(81)
IV.2.1 Choix et prospectifs.....	(81)
IV.2.2. Matériaux utilisés et propriétés.....	(82)
IV.2.2.1 Polystyrène Géomousse EPS.....	(82)
IV.2.2.2. Polyglasse Elastoflexe HP	(84)
IV.3.Confection des éprouvettes	(85)
IV.3.1. Principe et conduite.....	(85)
IV.3.2. Compression uni-axiale	(86)
IV.3.3. Cisaillement direct d'un monobloc en EPS et renforcé par Polyglasse.....	(87)
IV.4. Procédures.....	(88)
IV.4.1 Compression simple uni-axiale.....	(88)
IV.4.2. Cisaillement Direct d'EPS et Renforcé EPS-Polyglasse.....	(90)
IV.4. 3. Les essais triaxiaux.....	(91)
IV.4.4. Essais de fluage	(93)

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

V.1 Introduction.....	(96)
V.2. Compression uni-axiale sans renforcement.....	(96)
V.2.1. Comportement en contrainte – déformation.....	(96)
V.2.2. Influence de l'immersion du polystyrène dans l'eau.....	(98)
V.2.3 Effet du renforcement par géo-membran Polyglasse sur le comportement du polystyrène.....	(99)
V.2.4 Evolution du module d'élasticité pour l'ensemble des cas étudiés.....	(102)
V.2.5 Influence de la forme d'éprouvettes sur résistances à la compression ($\sigma 1\%$, $\sigma 5\%$, et $\sigma 10\%$).....	(104)
V.2.6 Comparaison du comportement contrainte- déformation entre état sec et après immersion.....	(105)
V.2.7 Étude comparative de la résistance à la compression entre l'état sec et après immersion à différents niveaux de déformation.....	(106)
V.3 Étude du comportement au fluage sous charge statique.....	(107)
V.4. Etude de comportement triaxial.....	(109)
V.4.1 Discussion des résultats.....	(109)
V.5 Evolution de la résistance au cisaillement directe.....	(116)
V.5.1 Introduction.....	(116)
V.5.2 Cisaillement directe de monobloc d'EPS	(116)
V.5.3Cisaillement directe renforcé EPS/ Polyglasse).....	(119)
V.5.4 Relation entre cisaillement directe et renforcé EPS/Polyglasse.....	(122)
Conclusion.....	(124)
Conclusion Générale et Recommandations.....	(126)
Références bibliographiques.....	(128)
Publication Internationale.....	(143)

LISTE DES FIGURES

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

Figure I.1. La Polymérisation du styrène en polystyrène	(20)
Figure I.2. Polystyrène Expansé (PSE).....	(21)
Figure I.3. Procédé de fabrication de géo-mousse EPS	(22)
Figure I.4 Coupe transversale de la construction de routes à l'aide d'une géo-mousse EPS. (25)	
Figure I.5 Culée de pont fondée directement sur des blocs de géomousse.....	(28)
Figure I.6 Configuration pour le test de la table vibrante sur la structure en geomousse... (29)	
Figure I.7 Chargement sismique à grande échelle sur table vibrante (EDO, Japon).....	(30)
Figure I.8 Principaux composants de conception de remblai EPS (Pont ferroviaire).....	(31)
Figure I.9 (a,b) Coupe transversale et pose d'un remblai allégé en géo-mousse EPS.....	(32)
Figure I.10(a,b) Coupe transversale et design d'un remblai (culée) allégé par géo-mousse (32)	
Figure I.11 Utilisation des blocs de géomousse EPS en génie civil au Japon (EDO).....	(33)
Figure I.12 Utilisation des blocs de géomousse au Japon dans divers domaines (EDO)....	(33)

CHAPITRE II

Figure II.1 Echantillonnage des éprouvettes pour les tests de compression axial.....	(44)
Figure II.2 Contrainte-déformation d'un bloc EPS sous compression axiale.....	(45)
Figure II.3 : Définition de la résistance à la compression	(46)
Figure II.4 : Les équations (1, 2, 3, 4) établissent des relations empiriques entre la limite D'élasticité et la densité des blocs d'EPS	(47)
Figure II.5 Corrélation entre la densité et le module de Young tangent de l'EPS en bloc... (48)	
Figure II.6 : Comportement de charge cyclique pour EPS moulé en blocs	(50)
Figure II.7. Régions de comportement en fluage	(51)
Figure II.8. Courbes isochrones contrainte-déformation pour l'EPS moulé en blocs	(52)
Figure II.9 : EPS géomouss Résistance à la traction	(59)

CHAPITRE III

Figure III.1 Défaillance portante des blocs EPS entraînant une déformation excessive.....	(66)
Figure III.2 Principaux composants d'un remblai en bloc EPS	(67)
Figure III.3 Configuration du bloc de géo-mousse de type remblai	(69)
Figure III.4 Configuration de test (table vibrante) sur structure en blocs de géomousse....	(70)
Figure III.5 Coupe transversale d'un remblai de route avec des blocs de géomousse	(71)
Figure III.6 Le « système » géotechnique (BWC = BuildWithConfidence).....	(72)
Figure III.7 Force de l'eau déséquilibrée agissant sur le côté d'un remblai en géomousse..	(75)
Figure III.8 Définition des paramètres pour l'analyse des charges de vent.....	(76)

COMPAGNE EXPERIMENTAL

CHAPITRE IV

Figure IV.1 Blocs Polystyrène EPS utilisés	(83)
Figure IV.2 Rouleau de Géo-membrane PolyglasseElastoflexe HP.....	(85)
Figure IV.3 Préparation des éprouvettes à différentes MV pour les essais	(86)
Figure IV.4 Préparation les éprouvettes non renforcées pour l'écrasement.....	(87)
Figure IV.5 Préparation les éprouvettes renforcées pour l'écrasement.	(87)
Figure IV.6 Préparation les éprouvettes pour l'essai de cisaillement directe.....	(88)
Figure IV.7 Appareillage et essais de compression directe	(89)
Figure IV.8 Système d'acquisition Graphics TFT BC 100	(90)
Figure IV.9 Machine à cisailier automatique UTS-2060	(91)
Figure IV.10. Configuration du test pour les tests triaxiaux	(92)
Figure IV.11. Appareillage et procédures pour l'essai triaxial.....	(93)
Figure IV.12 : Appareillage Oedométrique pour les essais de fluage.....	(94)

CHAPITRE V

Figure V.1 (a,b,c) : Courbes Contrainte –déformation (50, 100, 150) mm ³	(97)
Figure V.2 Variation de la résistance à la compression $\sigma_{10\%}$ avec la masse volumique...	(98)
Figure V.3. Influence de la densité sur la résistance à la compression $\sigma_{10\%}$	(99)
Figure V.4 (a,b,c) : Contrainte- déformation (D15, D20, D25) renforcé par polyglasse	(100)
Figure V.5 : L'évolution de la résistance en fonction du renforcement avec MV.....	(101)
Figure V.6: Etat comparatif de la résistance à la compression avec MV.....	(101)
Figure V.7: Évolution du module élastique en fonction de la masse volumique	(103)
Figure V.8 : Eprouvettes cylindriques pour trois masses volumiques.....	(104)
Figure V.9 : Représentation graphique de résistances à la compression ($\sigma_{1\%}$, $\sigma_{5\%}$ et $\sigma_{10\%}$) pour des éprouvettes prismatique et cylindrique à différentes densités.....	(105)
Figure V.10: Courbes contraintes – déformation (état sec et après immersion).....	(106)
Figure V.11 : Évolution de la contrainte de compression à différents niveaux de déformation (1%, 5% et 10%) en état sec et état immergé pour trois valeurs de MV.....	(107)
Figure V.12 : Comportement déformation – temps à différentes taux de chargement.....	(108)
Figure V.13 : Déformation globale pour chaque parentage de chargement	(108)
Figure V.14 : Etat d'écrasement des éprouvettes sous compression triaxial	(109)
Figure V.15: Relation contrainte-déformation d'EPS sous chargement triaxial à MV....	(110)
Figure V.16: Paramètres de résistance à partir des cercles de Mohr	(112)
Figure V.17 : a/ Relation contrainte déviatoire ($\sigma_1 - \sigma_3$) avec la contrainte de confinement (σ_3). b/ Relation de la cohésion avec la masse volumique.....	(114)
Figure V.18 : Variation du module E_{ti} de l'EPS géomoussavec la contrainte σ_3	(114)
Figure V.19. Représentation des essais de cisaillement direct et renforcé en Polyglass...	(116)
Figure V.20 : Etats des échantillons après cisaillement directe de monobloc EPS.....	(117)
Figure V.21: Courbes de cisaillement-déplacement d'EPS monobloc à différentes MV.(118)	(118)
Figure V.22 : L'influence de la contrainte normale sur : a/ le facteur de cisaillement G et b/ la résistance au cisaillement τ (KPa)	(119)
Figure V.23 : Cisaillement-déplacement d'interface EPS/ Polyglasse (EPS25).....	(121)
Figure V.24: Influence de la contrainte normale sur le facteur de cisaillement G/ (b): Influence de la contrainte normale sur la résistance au cisaillement τ	(122)
Figure V.25 : Comparaison paramétrique (C (KPa), τ (KPa) et G) entre le cisaillement directe d'EPS et cisaillement d'interface EPS/Polyglasse	(123)

LISTE DES TABLEAUX

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

Tableau I.1 Types de matériaux légers.....	(24)
--	------

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Masses volumiques de Géomousse EPS [69].....	(39)
Tableau II.2 Classification des masses volumiques du polystyrène expansé EPS	(39)
Tableau II.3 Exigences minimales de résistance à la compression et à la flexion.....	(41)
Tableau II.4 Variations des valeurs du coefficient de Poisson de l'EPS selon différentes études et chercheurs	(50)
Tableau II.5 Valeurs de coefficient de frottement par cisaillement directe renforcé.....	(58)

CHAPITRE III

Tableau III.1 Poids unitaire et résistance à la compression pour EDO géomouss.....	(62)
Tableau III.2 Qualité du polystyrène produit en France (NF T 56.201)	(64)
Tableau III.3 Propriétés physiques requises du polystyrène géomouss(ASTM D6817).....	(64)
Tableau III.4 Propriétés typiques d'EPS.....	(65)

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 Caractéristiques techniques du Polyglass Elastoflexe HP [124].....	(85)
Tableau IV.2 Identification des types d'éprouvettes et essais	(86)
Tableau VI.3 Identification des échantillons réalisés pour les essais de cisaillement	(88)

CHAPITRE V

Tableau V.1 Valeurs de résistance à la compression à différents taux de déformation	(97)
Tableau V.2 Evolution du module E pour l'ensemble des essais.....	(102)
Tableau V.3. Les résultats des essais triaxiaux pour la masse volumique 15 kg/m ³	(111)
Tableau V.4 les résultats des essais triaxiaux pour la masse volumique 20 kg/m ³	(111)
Tableau V.5 les résultats des essais triaxiaux pour la masse volumique 25 kg/m ³	(111)
Tableau V.6 Paramètres de cisaillement obtenus par essai de cisaillement direct.....	(117)
Tableau V.7 Paramètres de cisaillement obtenus par essai de cisaillement d'interface	(120)
Tableau V.8 Comparaison (paramètres) : Essais cisaillement direct et cisaillement directe renforcé	(122)

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

PS : Le polystyrène

EPS : Le polystyrène expansé

EPS-M : le polystyrène expansé moulé

EPS-E : polystyrène expansé extrudé

XPS : (Extruded Polystyrene Foam).

ASTM: L'American Society for Testing and Materials

UDOT : département des transports de l'Utah

NNI : l'organisation néerlandaise de normalisation

AASHTO : l'American Association of State Highway and Transportation Officials

(NPRA) : l'administration norvégienne des routes publiques

EDO : L'organisation de développement de la méthode EPS

UE : l'Union européenne

OI : L'indice d'oxygène

MV : masse volumique

UTA : l'Utah Transit Authority

Eti : le module de Young de la tangente initiale,

$\sigma_{1\%}$: Résistance à la compression à 1% de déformation

$\sigma_{5\%}$: Résistance à la compression à 5% de déformation

$\sigma_{10\%}$: Résistance à la compression à 10% de déformation

σ_y : limite élastique » (σ_y)

ρ : masse volumique

σ : contrainte limite élastique

ε : déformation

V : vitesse de transmission

ν : coefficient de Poisson

Cs : charges statiques (cs)

Cc : charges cycliques (cc)

τ : résistance au cisaillement,

σ_n : contrainte normale

μ : coefficient de frottement

δ : l'angle de frottement

Rc : Résistance à la compression de

D15, D20, et D25 : termes correspondant les valeurs des masses volumiques (15, 20 et 25) kg/m³

G : facteur de cisaillement (sans unité)

L : Légère

SL : Super léger

M : Moyenne

H : Haute

HV : Très Haute

INTRODUCTION GENERALE

Dans les tracés des projets routiers, on est souvent contraint de traverser des reliefs médiocres de faibles portances et surtout dans les zones à climats de grandes pluviométries, ce qui engendrent lors de leur exploitation, des problèmes géotechniques (tassements, glissements dangereux). En plus, l'utilisation des matériaux de remblais traditionnels, ne favorisent pas la stabilité permanente de la chaussée routière et les dégradations naissent et se développent rapidement. La technique des remblais légers en polystyrène expansé semble être une solution alternative, qui permet de réduire (voire éliminer) ces dégradations et ce, en raison de ses caractéristiques mécaniques élevées, surtout les résistances à la compression et au cisaillement, en plus du module de rigidité. La construction de remblais d'autoroute sur des sites à sol meuble à l'aide de blocs de polystyrène expansé (EPS) (bloc de géo-mousse) pour atténuer le tassement de consolidation est une technologie mature et a été mise en œuvre par divers pays à travers le monde [1-3].

Aujourd'hui, des projets utilisant des blocs en polystyrène expansé sont connus pour avoir été réalisés dans de nombreux pays européens [4, 5], comme la République Tchèque, Royaume-Uni, Aleman, Danemark, Irlande, France, Grèce, Pays-Bas, Finlande, Norvège, Pologne, Russie, Serbie, et Suède. En Asie, le Japon est considéré comme le principal utilisateur, mais la Chine, la Malaisie, la Thaïlande, les Philippines, la Corée du Sud et Taïwan sont également connus pour avoir utilisé des blocs géomouss[6]. L'Inde a récemment manifesté son intérêt et plusieurs autres pays asiatiques sont probablement des utilisateurs potentiels et le premier remblai routier avec des blocs géomouss a été récemment achevé en Turquie [7]. En Amérique, la méthode est adoptée aux États-Unis, au Canada, en Argentine ainsi qu'en Colombie, où des projets de génie civil impliquant des blocs géomouss ont été signalés à Victoria, en Nouvelle-Galles du Sud et dans le Queensland en Australie. Bien que jusqu'à présent, peu de projets en Afrique ont montré l'utilisation des blocs géomouss, comme ce fut au Kenya [8], en Tanzani [9] ou au Nigéria [10], entre autres, il est possible que dans le futur des situations se présentent plus, l'utilisation de cette technique pourrait offrir des avantages significatifs.

Des blocs de polystyrène expansé super léger (blocs EPS), ont été utilisés dans la construction des remblais routière comme matériau léger pendant près de soixante-dix (70) ans. La littérature indique que le laboratoire Norvégien de recherche routière a utilisé avec succès l'EPS-géomouss sur plus de 100 projets. L'une de ses principales applications est la construction de chaussées pour contrer le problème des sols de fondation à faible capacité portante, une application qui a eu beaucoup de succès et qui a été largement adoptée et utilisée pendant plus de quatre décennies[11]. Le polystyrène expansé est un matériau plastique/polymère ayant une composition chimique de C_8H_8 . Ainsi, il est un polymère géosynthétique, avec structure cellulaire fermée.

Sa fabrication implique le chauffage de billes expansibles de polystyrène avec la vapeur, et la mise en place de ces billes de polystyrène expansé chauffées dans des moules pour créer

des blocs prismatiques d'EPS [12]. Ces blocs sont fabriqués pour l'utilisation dans des applications de génie civil. Le polystyrène expansé (EPS) est un type de mousse plastique "rigide" et leur utilisation dans les applications géotechniques est grâce à sa faible densité qui est seulement environ 1% de la densité du sol. Ainsi qu'une compressibilité potentiellement élevée, une bonne résistance à la compression et une résistance à la rupture élevée en cisaillement.

Le polystyrène expansé (EPS) offre des solutions à de nombreux problèmes de génie civil associés à la construction de chaussées tels que : la construction de chaussées sur des sols de fondation à faible capacité portante (comme les tourbes et les argiles) ou dans les régions où les saisons hivernales sont rigoureuses. Plusieurs domaines d'amélioration et de recherches potentielles, portent principalement sur l'amélioration des applications actuelles et le développement de nouvelles applications pour le matériau dans la construction de la chaussée et la préparation de ressources pour aider les concepteurs dans leur processus de conception. Ceci est essentiel pour développer davantage l'utilisation de ce matériau dans la construction des chaussées, pour développer des solutions plus innovantes à certains problèmes majeurs de construction des chaussées et pour s'assurer que les concepteurs sont confiants et capables de préparer des conceptions sûres [13].

Dans la période actuelle l'Algérie a relancé plusieurs projets et infrastructures autoroutières traversant des reliefs médiocres de faible portance dans certaines zones et en particulier dans les zones "Nord et le Nord-Est" du pays, dans lesquelles, la réalisation par les matériaux de remblais traditionnels, n'assure pas l'intégrité permanente de la chaussée et les dégradations issues des problèmes géotechniques (tassement et glissement), qui se développent en se propageant rapidement. Pour résoudre ces problèmes, il est devenu indispensable d'utiliser la technique des remblais légers selon les recommandations de [11]. Parmi les matériaux géosynthétiques, qui sont largement disponibles pour ce but, le polystyrène expansé (EPS) qui a fermement établi sa position et connaît une croissance rapide depuis plus de demi-siècle.

Le comportement sous compressions confinées et non confinées du polystyrène EPS, dépend de nombreux facteurs tels que la taille, la forme, l'état hydrique (sec ou immergée), la densité, l'ampleur de la charge appliquée, le processus de fabrication et les facteurs environnementaux qui affectent son cheminement contrainte-déformation [15]. Ainsi que la compression est le mode de chargement prédominant dans les applications géotechniques; par conséquent, la résistance à la compression est un paramètre extrêmement important. Les 1%, 5% et 10% sont des déformations de référence communes, au niveau desquelles la contrainte est considérée comme la résistance de référence à la compression du polystyrène expansé [16]. Dans certains cas, les blocs d'EPS peuvent être installés à une faible profondeur, proche de la surface ou même au-dessus des niveaux d'eau souterraine. Cependant, lorsqu'ils sont installés à des profondeurs plus importantes, tels que sous les eaux souterraines ou à des niveaux d'inondation extrêmes, les blocs peuvent être soumis à des pressions de confinement importantes, comme indiqué dans l'étude effectuée par [17].

Afin de mieux comprendre le comportement mécanique des blocs d'EPS dans des conditions environnementales spécifiques, notre étude se concentrera sur l'analyse du comportement mécanique d'un type de polystyrène, nouvellement produit en Algérie. Des tests seront effectués sous différentes conditions de charge, notamment uni-axiale et triaxiale. Cette étude visera, en outre, l'évolution de sa résistance au cisaillement et l'étude du cisaillement de l'interface en contact avec une nappe de géo-membrane (type Polyglasse). Ce type de géo-membrane a été choisie pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il offre une qualité imputrescible qui garantit sa durabilité dans le temps, de plus, cette géo-membrane présente d'excellentes caractéristiques mécaniques, notamment une grande capacité d'allongement avant rupture et une résistance élevée au poinçonnement. Ces propriétés sont essentielles pour assurer une bonne performance du système géotechnique et prévenir les défaillances potentielles. Un programme expérimental a été élaboré en faisant des essais sur un nombre de 147 éprouvettes, confectionnées à différentes masses volumiques (15Kg/m^3 , 20Kg/m^3 et 25Kg/m^3).

Le manuscrit de cette thèse est subdivisé en trois parties contenant cinq chapitres, avec une conclusion générale et des recommandations. Après une introduction générale, définissant l'état des lieux et la problématique posée, ainsi que l'objectif du travail élaboré, la première partie est concernée à une synthèse bibliographique sur la genèse d'application des polystyrènes comme matériau de remblai léger et les recherches antérieurs pour cela, qui comportent trois chapitres : le chapitre I, définissant les remblais légers en termes de généralités et historique. Dans le chapitre II, on donnera un aperçu sur caractéristiques mécaniques et le comportement du polystyrène, suivi du chapitre III, qui concerne les principes et méthodologies de conception et de construction pour les polystyrènes EPS.

La deuxième partie sera dédiée à la campagne expérimentale et comprendra deux chapitres. Dans le chapitre IV, une description des matériaux utilisés sera présentée, suivie de la procédure d'essai pour la compression uni-axiale, le cisaillement direct, le cisaillement d'interface, ainsi que les différentes phases des essais réalisés en laboratoire. Dans la deuxième partie de la campagne expérimentale, (chapitre V), on présentera les résultats obtenus expérimentalement, avec des commentaires et discussions, en faisant allusion aux résultats trouvés par d'autres travaux de recherches antérieurs similaires.

Nous terminons, le contenu de cette thèse par une conclusion générale, résumant les résultats trouvés, quantitativement et qualitativement, avec les recommandations pour futurs travaux de recherches.

Partie I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

Les Remblais Légers Généralités et Historique

LES REMLAIS LEGERS- GENERALITES ET HISTORIQUES

I.1 Introduction

Un remblai léger, est un remblai constitué d'un matériau léger, généralement du polystyrène expansé, afin de limiter les surcharges lors de la traversée de zones compressibles. Un remblai allégé (terme couramment utilisé), permet de réduire la charge et les poussées verticales ou horizontales appliquées au support ou au confinement du remblai, du sol, des canalisations, ou des ouvrages enterrés. L'utilisation de matériaux légers permet de réduire les contraintes verticales ou horizontales, ce qui est devenue pratique courante à l'occasion de la construction de remblais routiers, ferroviaires et paysagers neufs ou de la correction de remblais existants [18].

L'utilisation de blocs en polystyrène expansé (EPS Géomouss) dans les projets de génie civil est désormais répandue dans de nombreux pays, pour diverses applications. Lorsque ces blocs ont été utilisés pour la première fois comme matériau de remblai léger pour la construction de routes en Norvège en 1972 [19]. Il avait déjà été prouvé par une étude sur l'action du gel dans les sols que les panneaux d'EPS étaient capables de supporter des charges répétitives dans un revêtement routier, et que leurs propriétés ne se détérioraient pas avec le temps. Cela, a permis d'établir la fiabilité et la durabilité de ce matériau, contribuant ainsi à sa popularité dans les projets de génie civil. Les blocs en polystyrène expansé sont principalement utilisés comme matériau de remblai léger, principalement dans la construction de routes. Ils sont également utilisés dans d'autres projets de génie civil, tels que les chemins de fer, les aérodromes, etc. Les blocs d'EPS sont souvent utilisés pour réduire la charge de construction sur les sols de faible portance ou compressible, afin d'assurer la stabilité et d'éviter le tassement excessif du sol. Cette méthode permet également de réduire les coûts de construction et de minimiser l'impact sur l'environnement [20, 21].

I.2. Evolution historique du polystyrène expansé

Le polystyrène a été découvert en 1839, mais sa production à grande échelle a débuté en 1933 en Allemagne et aux États-Unis. Le premier procédé utilisé était la suspension aqueuse, mais dès les années 1940, des procédés de polymérisation continue et discontinus dits "en masse" ont été développés. Cependant, c'est le procédé de polymérisation en masse continu qui a triomphé dans les années 1960 grâce aux avancées technologiques permettant de dissiper la chaleur produite pendant la réaction (710 kJ/kg) [22]. Ray Mc Intire (1919-1996) a mis au point le polystyrène expansé en 1944, alors qu'il travaillait pour Dow Chemical. Ce matériau rigide à faible densité a été découvert par hasard et commercialisé sous le nom de "Styrofoam".

Il a été principalement utilisé comme isolant thermique dans la construction. Sa formule chimique est (C₈H₈) et les seuls éléments chimiques présents dans cette substance sont le

carbone et l'hydrogène [23]. Le polystyrène est un polymère obtenu à partir de monomères de styrène. Il est solide à 20°C et fond entre 150°C et 170°C. Le polystyrène est inflammable et se dégrade à 350°C, avec une auto-inflammation vers 490°C. Sa densité réelle est de 1,03 à 1,05 et il est soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques. Le polystyrène (PS) est un polymère fabriqué en polymérisant du styrène (C₈H₈), qui est obtenu à partir de l'éthylbenzène produit à partir de la combinaison de benzène et d'éthylène. Le PS est composé exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène dans sa formule chimique, ce qui en fait un matériau organique pur (Figure I.1) [24].

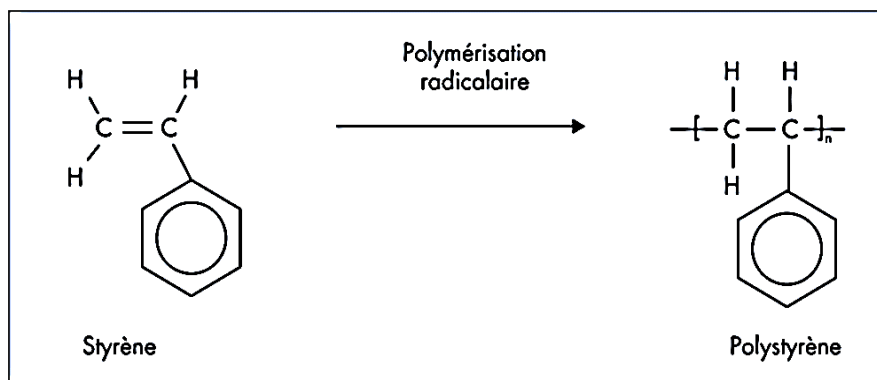


Figure I.1. La polymérisation du styrène en polystyrène [24]

Le polystyrène (PS) peut adopter différentes formes, notamment le PS cristal, le PS choc et le PS expansé. Le PS cristal, qui est un matériau amorphe, se caractérise par sa rigidité, sa transparence, sa fragilité et la possibilité de le colorer. Il est couramment utilisé pour la fabrication de gobelets transparents ainsi que de boîtiers de DVD. Le PS choc est obtenu en ajoutant un élastomère renforçant, généralement du polybutadiène, ce qui lui confère des propriétés mécaniques et thermiques différentes. Le PS expansé se présente sous forme de mousse et peut être moulé ou extrudé à partir de perles de polystyrène expansible. Afin de faciliter la lecture et d'utiliser les termes adéquats, il est recommandé d'utiliser les abréviations suivantes lors de la discussion sur le polystyrène expansé :

- EPS : désigne les mousses de polystyrène expansé en général (Figure I.2);
- EPS-M : se réfère aux mousses de polystyrène expansé moulé, produites à partir de perles de polystyrène expansible par le procédé d'expansion-moulage ;
- EPS-E : quant à elle, se rapporte aux mousses de polystyrène expansé extrudé.



Figure I.2. Polystyrène expansé (EPS) [24]

Le polystyrène expansé (EPS) est un matériau alvéolaire rigide et peu dense, principalement utilisé pour l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage de produits industriels ou alimentaires. Il existe deux types d'EPS : le polystyrène expansé moulé (EPS-M) et le polystyrène expansé extrudé (EPS-E), également appelé XPS. L'EPS-M est produit en faisant expanser des perles de polystyrène qui sont ensuite moulées, tandis que l'EPS-E est fabriqué par extrusion de billes de polystyrène expansible. Pour fabriquer le EPS-M, on ajoute un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12}) au polystyrène cristallin lors de la polymérisation. La fabrication d'EPS-E implique l'injection sous pression d'un gaz d'expansion, en l'occurrence le pentane, dans le polymère cristallin fondu pendant l'extrusion. Le polystyrène expansé présente diverses caractéristiques remarquables, notamment une faible densité, une isolation thermique efficace, une grande résistance mécanique à la compression, une capacité d'amortissement des chocs, une résistance à l'eau, une facilité de mise en forme (moulage, découpage) et une capacité de recyclage [25].

En Algérie, la production des polystyrènes est réalisée par environ une dizaine d'entreprises spécialisées dans la production de plastiques et de produits chimiques. Les matières premières utilisées pour la production du polystyrène sont principalement importées, notamment le styrène, l'éthyle-benzène et le benzène[26]. Bien que la production de polystyrène en Algérie soit encore faible par rapport à la demande intérieure, des investissements ont été récemment réalisés pour augmenter la capacité de production locale de ce matériau [27]. Cette augmentation de la production pourrait réduire la dépendance aux importations et renforcer la capacité industrielle du pays. Le polystyrène produit en Algérie est essentiellement utilisé dans l'industrie de l'emballage pour les produits alimentaires et industriels, ainsi que dans l'isolation thermique des bâtiments. Il est également utilisé pour la production de produits jetables tels que les gobelets, les assiettes et les couverts en plastique [28].

I.3 Fabrication et moulage de blocs polystyrène

La fabrication de la géo-mousse ‘‘EPS’’, implique deux étapes majeures : la pré-expansion et le moulage. Tout d'abord, les billes de polystyrène sont placées dans un récipient et chauffées à la vapeur à une température comprise entre 80°C et 110°C. Ce processus permet aux billes de se dilater en sphères plus grandes, appelées « pré-bouffées », qui sont environ 50 fois plus grandes que les billes de polystyrène d'origine. Ces pré-bouffées sont ensuite refroidies pour stabiliser leur forme avant d'être placées dans un moule chauffé à la vapeur. Cette étape permet aux pré-bouffées de se ramollir et de se dilater davantage pour former des blocs EPS. Les blocs sont ensuite retirés du moule et laissés pendant plusieurs jours pour « saisonner », c'est-à-dire pour permettre le dégazage de l'agent gonflant utilisé dans la fabrication et pour permettre que le gonflement et les changements dimensionnels associés au processus de refroidissement soient complets. L'ensemble du processus est illustré à la figure I.3. Ce processus est soigneusement contrôlé pour garantir la qualité et les propriétés des blocs EPS produits[29].

Après la production des blocs de géo-mousse EPS, deux processus sont nécessaires pour garantir leur conformité aux tolérances dimensionnelles spécifiées avant le transport : la coupe et le rognage, effectués en usine. Le rognage implique le découpage de fines couches de matériau sur une ou plusieurs faces des blocs pour s'assurer qu'ils sont plats, droits, de la bonne longueur, largeur et épaisseur[30]. Cela est nécessaire car des défauts de moulage peuvent causer des déformations des blocs, ce qui peut entraîner des contacts insuffisants entre les blocs lorsqu'ils sont posés, ainsi que des contraintes réelles sous-estimées. Ces problèmes peuvent entraîner des défaillances de service, notamment un tassement excessif et différentiel[31]. Un autre problème potentiel est la concavité, où l'eau peut s'accumuler sur les blocs et entraîner une augmentation du poids unitaire et de la pression, ce qui peut également causer un tassement et un reconditionnement de la chaussée[32].

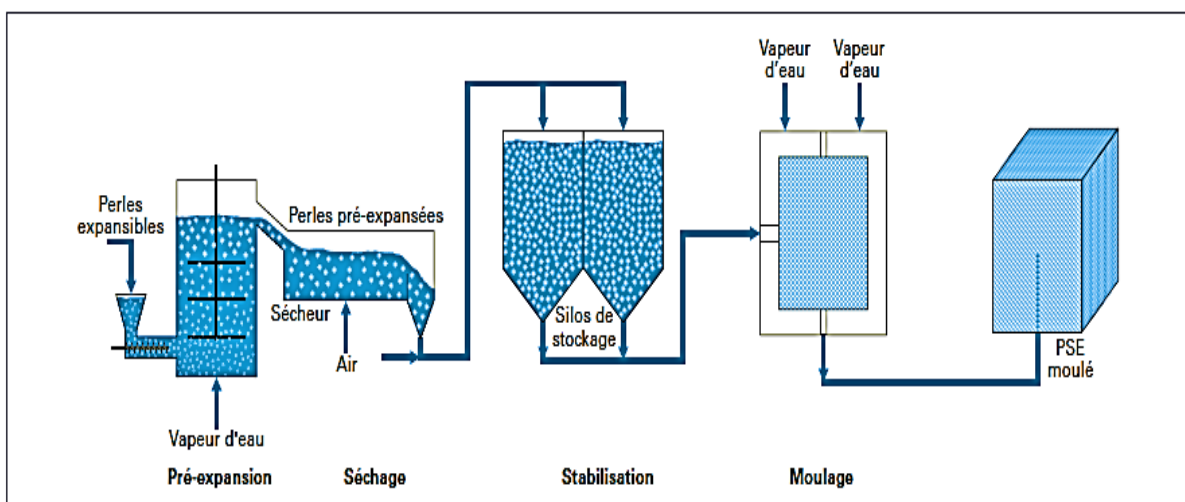


Figure I.3. Procédé de fabrication de géo-mousse EPS [29]

Le processus de fabrication de l'EPS comprend deux étapes distinctes. Tout d'abord, la matière première, appelée polystyrène expansible ou résine, est produite par un fabricant appelé fournisseur de résine. Cette résine est constituée de petites billes de polystyrène solide mélangées avec un agent gonflant tel que le pentane, ainsi que d'autres additifs éventuels. Les fournisseurs de résine sont souvent des sociétés chimiques multinationales. Ensuite, un fabricant appelé mouleur achète la résine et la transforme en EPS par un processus en plusieurs étapes. Les produits finaux d'EPS sont généralement sous forme de blocs prismatiques ou de formes personnalisées. Pour garantir une qualité optimale, les blocs doivent être laissés à reposer pendant au moins 72 heures à température ambiante, bien que cela puisse être accéléré en les stockant temporairement dans une pièce chauffée.

I.4 Problématique et méthodes de traitement de sols compressible

Lorsque le sol de fondation ne répond pas aux exigences de capacité portante ou de tassement pour le remblai proposé, l'ingénieur géotechnicien doit envisager des solutions telles que l'amélioration du sol ou la construction d'une structure surélevée. La construction de chaussées sur sol meuble est une pratique ancienne datant de plusieurs milliers d'années. En effet, les premières routes construites sur des sols organiques ont été découvertes en Angleterre et étaient composées de planches. Ces routes sont estimées avoir entre 4000 et 4800 ans [33, 34].

Il existe plusieurs options de traitement des sols mous et qui ont été utilisées pour les remblais d'autoroutes au Japon et aux États-Unis[35]. Le choix de la méthode de traitement appropriée dépend de nombreux facteurs, notamment de la nature du sol, du niveau de la nappe phréatique, de la géométrie du projet et des contraintes budgétaires.

Deux philosophies de conception peuvent être identifiées avec les différentes méthodes de traitement des sols meubles. La première approche consiste à utiliser un sol conventionnel pour le remblai et à améliorer la résistance au cisaillement et limiter la compressibilité du sol mou sous la fondation. La deuxième méthode implique l'utilisation d'un remblai léger pour réduire la charge appliquée au sol meuble et éviter une surcharge qui pourrait entraîner une défaillance de la capacité portante ou un tassement inacceptable.

Contrairement aux méthodes traditionnelles d'amélioration des fondations, les remblais légers artificiels, tels que la géo-mousse, offrent des propriétés et une géométrie bien définies, réduisant ainsi les incertitudes lors de leur utilisation. Grâce à leur densité nettement inférieure à celle des sols et des roches, ces matériaux représentent une solution efficace, avec des densités variant de 0,1 à 17 kN/m³. Cette différence de densité signifie que les forces gravitationnelles et sismiques exercées par les remblais légers sont nettement inférieures à celles des matériaux de remblai conventionnels.

I.5 Remblais légers

I.5.1 Matériaux des remblais légers

Il existe une grande variété de matériaux de remblai légers disponibles, avec des densités pouvant varier de 1% à 70% de la densité du sol ou de la roche. Les coûts, les propriétés techniques et les coûts de construction varient également considérablement. Les avantages économiques et techniques de l'utilisation de ces matériaux peuvent donc être très différents. Dans la plupart des projets, il est plus avantageux d'utiliser soit des techniques d'amélioration du sol, soit des matériaux de remblai légers, plutôt que les deux en combinaison. Cependant, dans certains cas, les deux peuvent être utilisés conjointement pour obtenir les meilleurs résultats possibles [36]. Différentes catégories ont été utilisées pour classer les matériaux de remplissage légers dans diverses études. Les catégories utilisées, comprennent les matériaux de remblai légers avec une résistance à la compression inhérente (tels que la géo-mousse en blocs EPS et la géo-mousse en béton cellulaire) et les matériaux de remblai légers granulaires (tels que la fibre de bois, le laitier de haut fourneau, les cendres volantes, le laitier de chaudière, l'argile ou le schiste expansé, les pneus déchiquetés). Aussi donc, les catégories de remblais légers utilisées, comprennent les remblais artificiels (tels que les plastiques en mousse et la géomousse en béton cellulaire) et les déchets (tels que les pneus déchiquetés et les copeaux de bois). Les remblais légers sont classés en matériaux légers traditionnels (tels que les déchets de l'industrie du bois tels que la sciure et l'écorce, les déchets de la production de blocs de construction en béton cellulaire et d'agrégats d'argile expansée) et en remblai super léger (tels que la géomousse en blocs EPS). Le tableau 1.1, présente un résumé des types courants de remblais légers[37].

Tableaux I.1 : Types de matériaux légers[42].

Type de remplissage léger	Gamme en masse volumiques (Kg/m ³)	Plage de gravité spécifique
EPS Polystyrène expansé (bloc géomousse)	12 à 31	0.01 à 0.03
Géomousse en béton de ciment portland expansé	33 à 76	0.3 à 0.8
fibre de bois	54 à 94	0.6 à 1.0
pneus déchiquetés	59 à 88	0.6 à 0.9
schiste expansé et argile	59 à 102	0.6 à 1.0
laitier de chaudière	98 à 1.2	1.0 à 1.8
laitier de haut fourneau refroidi par air	108 à 147	1.1 à 1.5
cendres volantes	110 à 141	1.1 à 1.4

I.5.2 Remblai légers en polystyrène expansé EPS

Le "Geofoam" est un matériau manufacturé produit en utilisant soit une usine fixe, soit un processus d'expansion in situ. Il est composé de polystyrène cellulaire rigide (RCPS), également connu sous le nom de polystyrène expansé (EPS), qui est une mousse polymère avec une texture de nombreuses cellules fermées remplies de gaz. L'EPS est intrinsèquement de couleur blanche et est couramment utilisé dans les produits de consommation tels que les tasses à café et les emballages de coussins [38]. L'American Society for Testing and Materials (ASTM) D 578, définit le RCPS comme "polystyrène cellulaire rigide" [39]. Bien que le terme générique "géo-mousse" soit relativement nouveau et ait été utilisé pour la première fois pour désigner un produit EPS exclusif en Alaska dans les années 1970, les matériaux en mousse ont été utilisés pour des applications géotechniques depuis le début des années 1960 aux États-Unis et dans d'autres pays.

Aussi, le polystyrène expansé (EPS) est un matériau novateur, créé pour la première fois par la compagnie "BASF" en Allemagne en 1950 [40]. Depuis sa création, les conférences internationales ont joué un rôle important dans la diffusion des informations relatives aux propriétés et à l'utilisation des blocs géomousses en EPS. La première conférence a eu lieu à Oslo, Norvège en 1985, et elle a rassemblé 150 participants provenant de 11 pays différents [41]. Depuis, ces conférences ont permis de partager les connaissances et les expériences des professionnels de l'ingénierie géotechnique à travers le monde. Les blocs Geofoam en EPS ont été largement utilisés avec succès dans diverses applications d'ingénierie géotechnique. Ils sont souvent utilisés comme matériau de remblai léger pour remplacer les matériaux conventionnels, mais ils sont également utilisés comme barrière antivibratoire ou tampon sismique pour les structures rigides. Les blocs géomousses offrent de nombreux avantages, notamment leur faible poids, leur facilité d'installation, leur capacité à résister aux contraintes et leur durabilité dans le temps (Figure I.4).

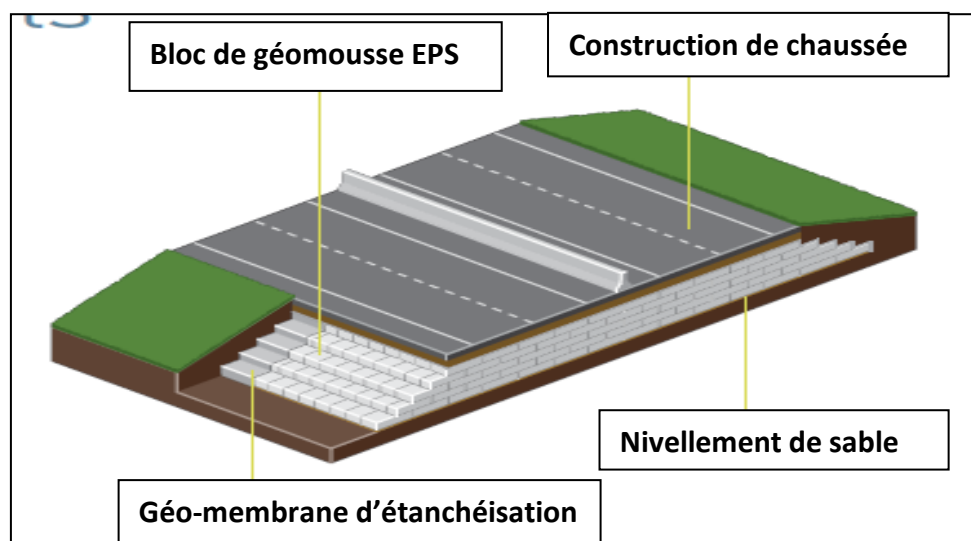


Figure I.4 : Coupe transversale de la construction de routes à l'aide d'une géo-mousse [82].

Les blocs géomouss sont fabriqués en expansant des billes granulaires de polystyrène ou de résine sachant que la densité de ces blocs varie entre $11,2 \text{ kg/m}^3$ et $45,7 \text{ kg/m}^3$. Grâce à leur légèreté et à leur rapport résistance/densité élevé (conformément à la norme ASTM D6817 de 2007), les blocs géomouss ont trouvé de nombreuses applications en ingénierie civile. Parmi les utilisations les plus courantes, on peut citer le remblai léger, les inclusions compressibles, l'isolation thermique et le drainage, pour autant que ces blocs soient utilisés de manière appropriée. En effet, la légèreté des blocs géomouss facilite leur manipulation et leur transport sur le chantier, tandis que leur résistance et leur capacité à résister à la compression permettent d'utiliser ces blocs dans des applications exigeantes. Par exemple, les blocs géomouss sont souvent utilisés comme matériau de remblai pour les ponts et les routes, où ils offrent une alternative plus économique et plus durable aux matériaux de remblai traditionnels tels que la terre et la roche. De plus, les blocs géomouss peuvent être utilisés comme inclusions compressibles pour compenser les mouvements différentiels du sol et réduire les dommages structurels, ou encore comme isolant thermique pour réduire les pertes de chaleur dans les bâtiments. Enfin, lorsque les blocs sont correctement formés, ils peuvent également servir de matériau de drainage pour évacuer l'eau dans le sol saturé. En somme, grâce à leurs propriétés uniques et à leur polyvalence, les blocs géomouss constituent un matériau de choix pour de nombreuses applications en ingénierie géotechnique.

Le polystyrène géomouss est utilisé en géotechnique routière depuis les années 1960, d'abord pour sa fonction d'isolation thermique, puis comme remblai léger en construction. Bien que des brevets pour l'utilisation de mousses plastiques comme matériau de remblai léger dans les travaux de terrassement aux États-Unis soient connus depuis les années 1970, l'utilisation du géomouss comme remblai léger n'a connu un essor important qu'à partir des années 1990. Cette croissance a été en grande partie due aux initiatives de transfert de technologie du professeur John S. Horvath, Ph.D., P.E. du Manhattan College de New York, ainsi qu'à des présentations de conférences de marketing et de génie géotechnique par des mouleurs d'EPS à partir de 1993[42].

Des projets, en génie civil utilisant des blocs géomouss sont en cours de réalisation dans plusieurs pays à travers le monde. Le premier remblai routier avec des blocs géomouss a été récemment achevé en Turquie [27], tandis que les États-Unis, le Canada, l'Argentine et la Colombie sont également des utilisateurs de cette méthode en Amérique[43]. En Australie, des projets de génie civil impliquant des blocs géomouss ont été signalés dans plusieurs régions, dont Victoria, en Nouvelle-Galles du Sud et dans le Queensland. Le Japon a été le précurseur de l'utilisation des blocs Geofoam dans les projets de remblai léger dès 1985, et une évaluation indépendante 10 ans plus tard a montré que l'utilisation de polystyrène géomouss dans ce pays représentait environ la moitié de l'utilisation mondiale. Le laboratoire norvégien (NRRL) a également largement utilisé les blocs de polystyrène dans des centaines de projets, suivi d'importants travaux de recherche et développement pour des applications de remblai léger. Le département des transports de l'Utah (UDOT) a également adopté cette méthode, en utilisant largement les blocs en polystyrène expansé (EPS) pour plusieurs remblais importants dans la vallée de Salt Lake, où environ $100\,000 \text{ m}^3$ de blocs ont été

utilisés pour minimiser le tassement post-construction des dépôts lacustres profonds et compressibles [44].

Plusieurs pays ont développé des lignes directrices et des manuels de conception pour faciliter la conception de remblais sur sol mou utilisant des blocs en polystyrène géomouss EPS. Ces pays comprennent la France, l'Allemagne, le Japon, la Norvège et le Royaume-Uni. D'autres initiatives ont été entreprises au niveau national pour élaborer des documents de référence, tels que les "Lignes directrices pour la conception et l'installation d'EPS en tant que géofoam", établies par l'organisation néerlandaise de normalisation NNI, via CROW, une organisation de normalisation néerlandaise spécifiquement dédiée au génie civil. Ces efforts visent à encourager les concepteurs à utiliser plus largement et de manière plus cohérente la mousse de polystyrène expansé dans les remblais, pour une optimisation des performances techniques et des coûts.

I.6 Avantages de l'utilisation du polystyrène expansé

Au fil des années, l'utilisation de matériaux légers pour la construction de remblais a connu une augmentation significative en tant qu'alternative aux méthodes traditionnelles d'amélioration des sols. Parmi ces matériaux, les blocs de polystyrène expansé, tels que l'EPS géomouss, ont connu un engouement particulier pour certaines raisons majeures[45, 46], qui sont :

- L'utilisation de remblais légers permet de réduire considérablement le temps de construction global, tout en minimisant l'incertitude. Cette efficacité est due à la simplicité du processus de pose des blocs, ainsi qu'à la possibilité de les utiliser dans des conditions difficiles.
- Contrairement aux méthodologies traditionnelles d'amélioration des sols, telles que le pré-chargement, les remblais légers produisent des tassements non drainés initiaux et de consolidation relativement faibles. Ceci est un avantage majeur, car cela permet de limiter les impacts sur les structures environnantes, ainsi que les dommages causés par les tassements.
- Les remblais légers réduisent le coût de maintenance en raison de leur capacité à limiter les tassements. Cela signifie que les coûts de réparation et d'entretien des structures environnantes sont considérablement réduits.
- La durabilité des blocs de polystyrène expansé a été prouvée par des projets achevés depuis les années 1970 jusqu'à ce jour. Ce matériau offre une résistance exceptionnelle face aux intempéries, à la corrosion et aux chocs, ce qui le positionne comme une solution privilégiée pour les projets de construction durables et à long terme.
- La géo-mousse à blocs EPS est un matériau de remplissage léger et unique en son genre, offrant une densité qui n'est que d'environ 1% de celle des matériaux de remplissage traditionnels. Malgré cette légèreté, elle est suffisamment résistante pour supporter les charges de véhicules à moteur, de trains, de bâtiments légèrement chargés et de culées de petits ponts. Cette densité extraordinairement faible permet une réduction significative des contraintes de gravité sur les fondations du sol sous-jacent, ainsi qu'une diminution des forces d'inertie lors des secousses sismiques.

I.6.1. Réduction des charges

Les blocs géomouss peuvent être utilisés pour réduire la charge sur les sols meubles, en particulier lorsque leur capacité portante est limitée. En général, les blocs peuvent également aider à améliorer la capacité portante du sous-sol, réduire les risques de tassement excessif et renforcer la stabilité. Cette méthode peut être particulièrement utile dans les zones où les charges lourdes posent un problème pour les fondations, telles que les routes, les chemins de fer, les aéroports et les bâtiments. Les blocs géomouss ont également été utilisés dans la conception de ponts, notamment en Europe et aux États-Unis, pour améliorer les conditions de sol meuble et réduire les risques de tassement. Dans certains projets, les culées de pont ont été directement appuyées sur des blocs géomouss, comme cela a été le cas pour un pont en acier temporaire de type Acrow en Norvège. Dans cet exemple, les fondations reposent sur des remblais en EPS géomouss de 5m de haut pour améliorer la stabilité sur un sol d'argile molle (figure I.5). Le Geofoam a été utilisé comme une alternative pour le système de fondation d'un pont à poutres en acier à une travée dans le nord de l'État de New York. Le site était situé dans une large vallée de sédiments mous profonds. Pour compenser le poids du pont et du système de fondation, le sol excavé a été remplacé par des blocs de géo-mousse EPS. Des solutions similaires ont également été appliquées aux ponts en béton permanents en Norvège (figure I.5 (b)). En outre, étant donné que les remblais à base de blocs de géo-mousse peuvent être complétés par des murs verticaux, aucune force horizontale, ou seulement une force horizontale minimale, ne sera transmise à une structure adjacente ou connectée au remblai.

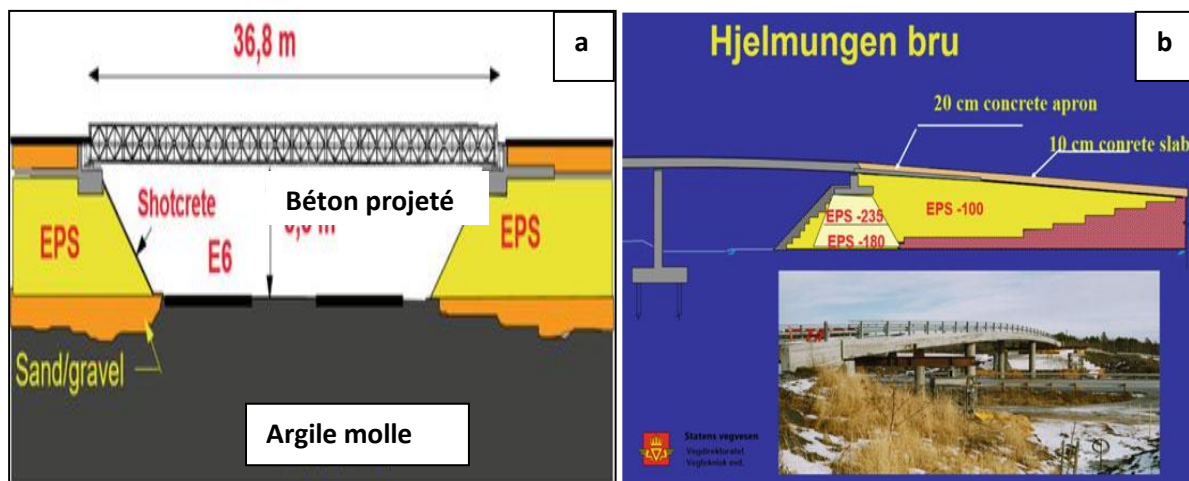


Figure I.5: Culée de pont fondée directement sur des blocs de géo-mousse (4)

I.6.2. Absorption d'énergie

Les pare-avalanches sont souvent construits le long des routes dans les zones montagneuses pour protéger les usagers de la route contre les risques d'avalanche. Pour absorber une partie des forces d'impact des chutes de pierres, ces hangars sont généralement recouverts de matériaux absorbants d'énergie sur le toit.

Cependant, pour réduire encore davantage les charges d'impact, les blocs de géomouss peuvent être placés sur le toit en combinaison avec une dalle de béton et une couverture de sol. Lorsque des rochers ou des pierres de grande taille frappent la structure, le matériau EPS (polystyrène expansé) se déforme et absorbe une grande partie de l'énergie dynamique, ce qui réduit considérablement les charges dynamiques transférées à la remise. Cette méthode a été introduite et testée pour la première fois au Japon[48]. Elle peut également être appliquée pour protéger d'autres types de structures contre les impacts dynamiques. L'utilisation de matériaux absorbants d'énergie comme le Geofoam peut aider à réduire les charges d'impact, ce qui peut protéger les structures et les personnes contre les dommages en cas d'impact.

I.6.3. Résistance aux effets sismiques

Des préoccupations ont été soulevées concernant le comportement et la stabilité des remblais en EPS soumis à des charges sismiques. Des études approfondies ont été menées sur ce sujet, notamment par H. Riad et al. en 2004 [49], SF. Bartlett et al. en 2011 [50] et les recherches de Ö. Yildiz [51]. Ces études ont examiné la stabilité des remblais EPS normaux, des remblais sur les pentes, des structures EPS autoportantes terminées par des murs verticaux, ainsi que des remblais adjacents aux culées de pont et aux murs de soutènement. La figure I.6 montre une configuration de test d'une table vibrante à échelle réduite, tandis que la figure I.7 montre une configuration de test d'une structure "Geofoam" sur une grande table vibrante au Japon.

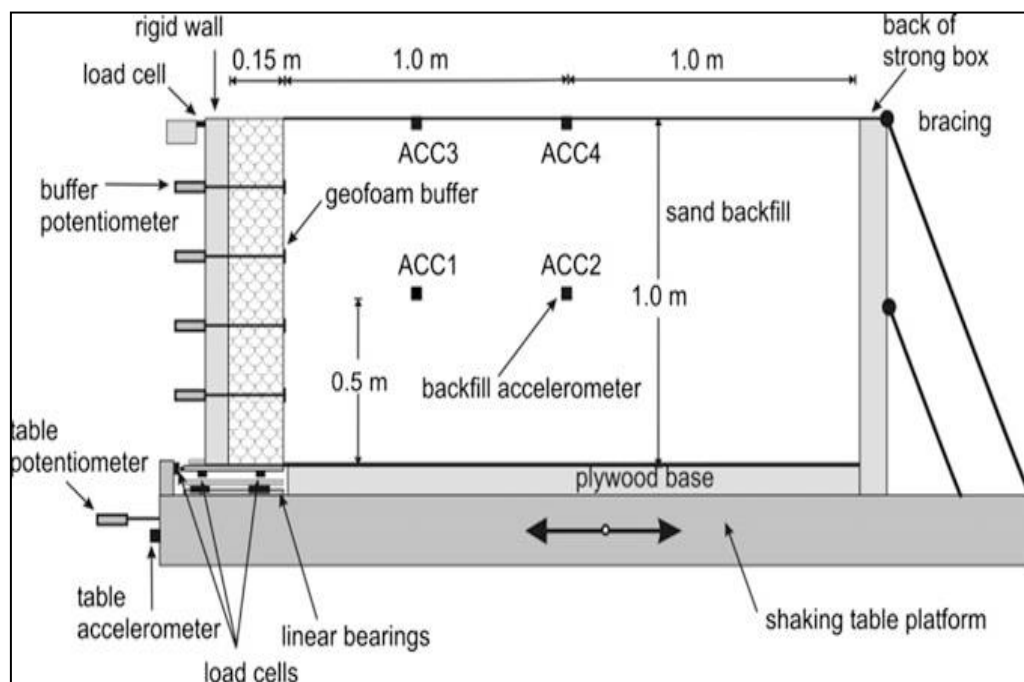


Figure I.6 : Configuration pour le test de la table vibrante sur la structure en Géo-mousse [52]



Figure I.7 : Chargement sismique à grande échelle sur table vibrante (EDO, Japon) [52]

Globalement, l'EPS a un effet positif sur les structures soumises à des charges sismiques, comme l'ont montré des études menées au Japon et aux États-Unis. Cependant, pour les remblais de plus de 6 m de hauteur et un rapport hauteur sur largeur supérieur à 0,8, des considérations spéciales de conception sismique sont recommandées. Aucun dommage grave n'a été signalé pour les structures en EPS lors du tremblement de terre de Tohoku en 2011 au Japon[53]. Lors du tremblement de terre de Kumamoto en 2016, un remblai EPS en construction s'est quelque peu déformé en raison de l'importante déformation du sol, mais il a été achevé sans ajustements et la route est en service normal [54].

I.6.4 Rapidité et facilité de construction

La rapidité et la simplicité de la construction sont des critères importants pour de nombreux projets de construction. Dans ce contexte, les blocs de géo-mousse sont particulièrement utiles car leur faible poids et leur volume important permettent une construction rapide. Par conséquent, lorsqu'il est essentiel de respecter des délais serrés, l'utilisation de blocs de géo-mousse peut être une solution pratique et efficace. Le remplacement d'un vieux pont en acier sur la ligne ferroviaire Manchester-Liverpool pour permettre un service ferroviaire à grande vitesse nécessitait une méthode de construction rapide. La méthode choisie, consiste à pré-charger le sol avec un remblai de 4,5 m de hauteur pendant 9 mois, puis à construire un remblai en Geofoam jusqu'à un niveau juste en dessous du pont[55]. Le pont a été démoli et remplacé par une goulotte en béton préfabriquée posée sur le remplissage en EPS. Le tout a été terminé en moins de 100 heures, utilisant un volume total de 13 000 m³ de blocs EPS à densités variées (Figure I.8).

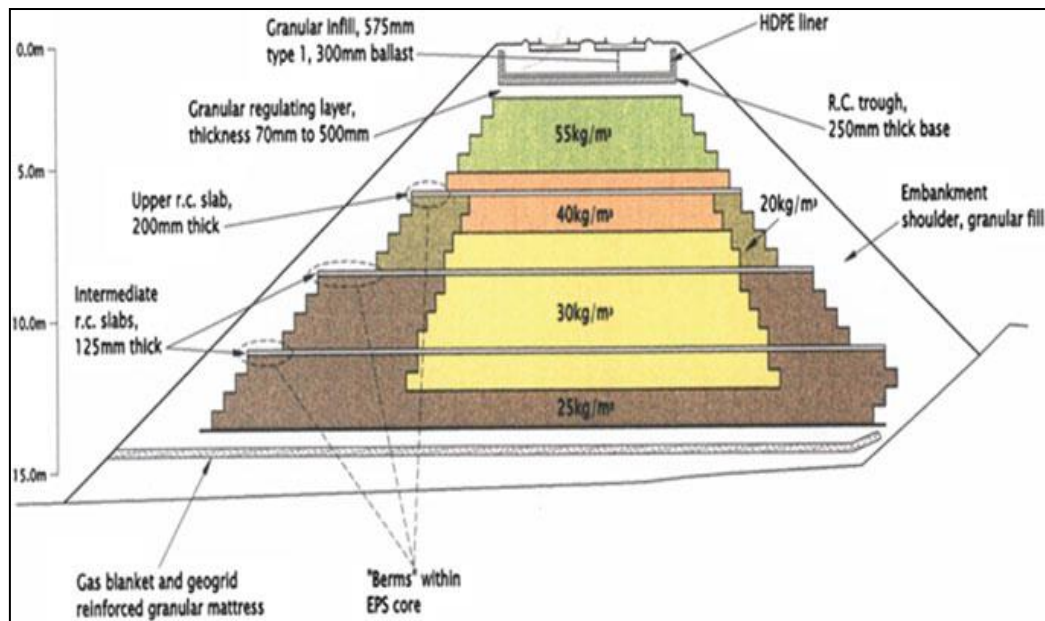
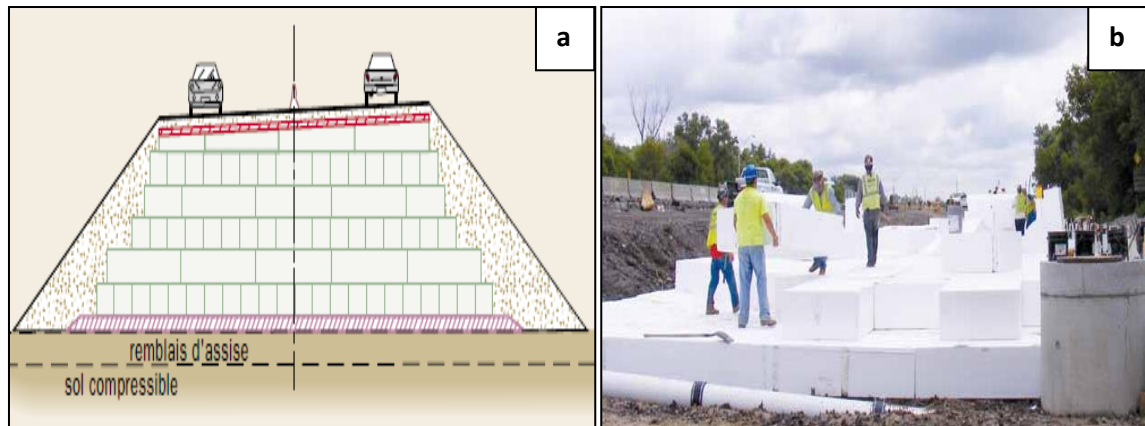


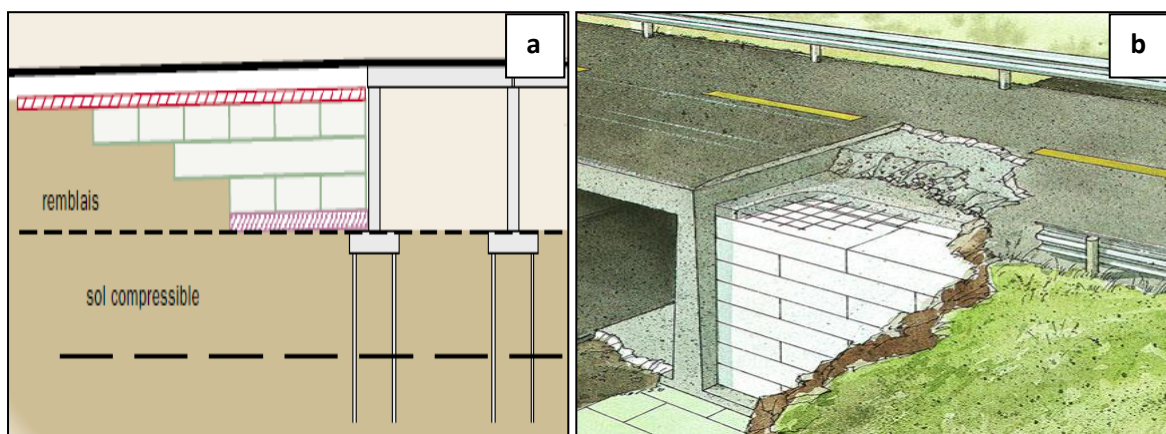
Figure I.8 : Principaux composants de conception de remblai EPS (Pont ferroviaire) [55]

I.7. Applications diverses du polystyrène expansé

Le polystyrène expansé est largement utilisé dans le domaine de la géotechnique routière en raison de ses propriétés uniques qui lui permettent de répondre à divers besoins. On peut classer les applications du polystyrène expansé dans ce domaine en quatre catégories principales. La première catégorie, concerne l'allègement des remblais sur les sols compressibles. Le polystyrène expansé est un matériau léger qui peut être utilisé pour remplacer une partie du matériau de remblai traditionnel et remblai derrière culée des ponts, ce qui permet de réduire la charge totale sur le sol compressible, ce qui peut aider également à prévenir les tassements différentiels et à améliorer la stabilité globale de la construction. La deuxième catégorie, concerne l'allègement des remblais sur les versants instables vu que les remblais traditionnels peuvent exercer une pression sur les pentes, ce qui peut entraîner des glissements de terrain. L'utilisation de polystyrène expansé comme matériau de remblai peut réduire considérablement la pression exercée sur les pentes, ce qui peut réduire les risques de glissements de terrain (Figures I.9 (a) et I.9 (b)). La troisième catégorie, est la réduction des efforts horizontaux, puisque le polystyrène expansé peut être utilisé pour réduire les efforts horizontaux dans les murs de soutènement, ce qui peut améliorer leur stabilité et leur durabilité. Le matériau est également capable de réduire la poussée hydrostatique dans les murs de soutènement, ce qui peut améliorer leur efficacité (Figures I.10 (a) et I.10 (b)). La quatrième catégorie concerne d'autres applications telles que la réduction de l'effet "Marston", la protection des chaussées contre le gel et la diminution des phénomènes vibratoires. Le polystyrène expansé peut aider à réduire la dilatation thermique dans les chaussées et à améliorer leur durée de vie. Il peut également réduire les vibrations causées par le trafic et le confort des usagers de la route [56, 57].



Figures I.9 (a) et (b) : Coupe transversale et pose d'un remblai allégé en géomousse EPS[82]



Figures I.10 (a) et (b) : Coupe transversale et design d'un remblai (culée) allégé par géomousse[4.57]

I.8. Utilisation de l'EPS "Geofoam"

I.8.1 Application de l'EPS dans divers secteurs

La géomousse de polystyrène expansé (EPS) est désormais utilisée dans le monde entier comme un remarquable substitut de sol léger pour une variété d'applications géotechniques dans la construction des remblais souples. La caractérisation des propriétés du polystyrène expansé pour la détermination des paramètres de conception s'est appuyée sur des essais en laboratoire portant sur de petits échantillons. Pour l'essentiel, ce qui est communément connu est basé sur des données dérivées d'essais de compression non confinée d'échantillons cubiques standards de 50 mm de côté. Les observations sur les performances suggèrent que les valeurs du module d'Young dérivées des essais de laboratoire, lorsqu'elles sont utilisées dans l'analyse, tendent à surestimer les déformations. Les informations disponibles sur les valeurs du coefficient de Poisson varient considérablement. On sait peu de choses sur l'influence de la taille de l'échantillon sur les paramètres élastiques souhaités.

Des études sur le comportement d'EPS en compression non confinée ont été menées sur des échantillons cubiques et cylindriques de différentes densités. Les déformations axiales et latérales ont été contrôlées pour permettre l'évaluation simultanée du module d'Young et du coefficient de Poisson. Les résultats indiquent une influence significative de la taille de l'échantillon sur les paramètres élastiques. Les valeurs du module d'Young et du coefficient de Poisson ont tendance à être sous-estimées. La cause de cette sous-estimation est attribuée à la non-uniformité et aux effets de fin à proximité des plateaux de chargement rigides. Les figures I.11 et I.12, montrent les chiffres statistiques, d'utilisation des blocs de géomousse EPS dans divers secteurs au Japon [58]

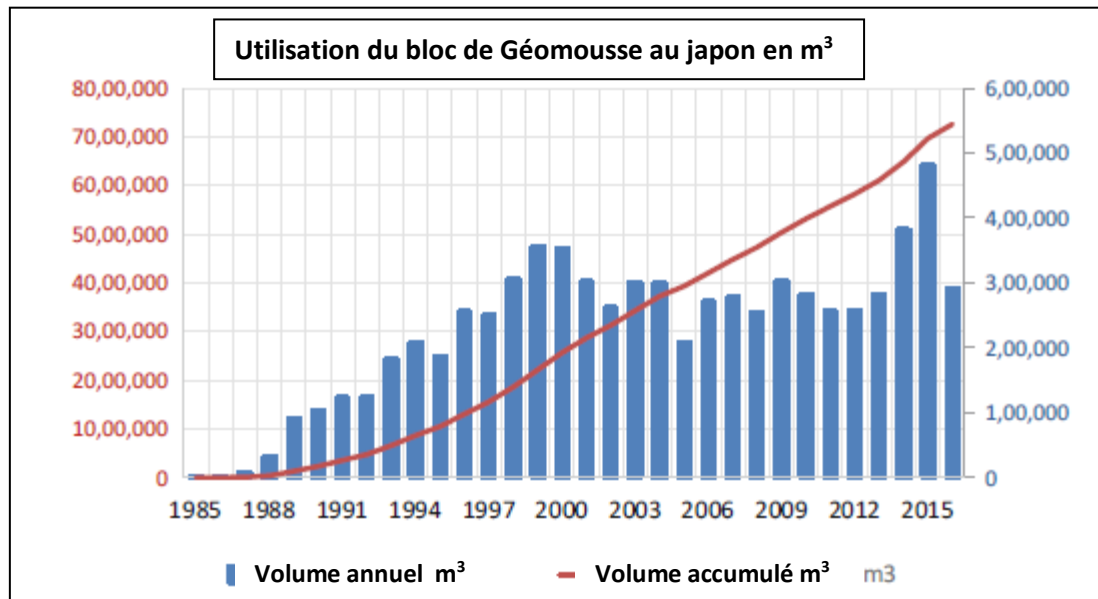


Figure I.11: Utilisation des blocs de géomousse EPS en génie civil au Japon (EDO)[4]

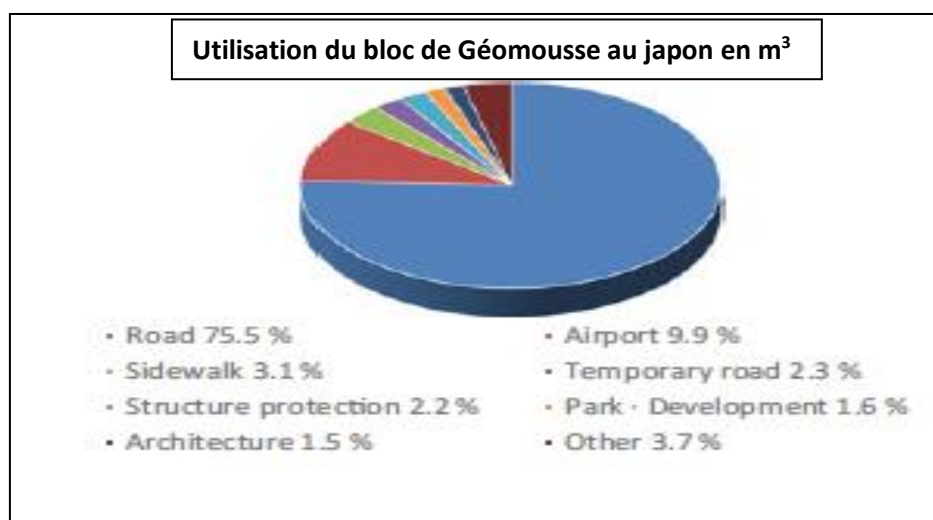


Figure I.12 : Utilisation des blocs de géomousse au Japon dans divers domaines (EDO) [4]

I.8.2. Autres applications dans les projets des travaux publics**a/ Projet de remblai néerlandais (A4) avec tramways en EPSgéomouss**

Un tronçon de l'autoroute A4 entre Vlaardingen et Schiedam a été construit dans un tunnel en béton pour minimiser l'impact environnemental. La faible capacité portante du sous-sol a rendu difficile la construction de remblais de chaque côté du tunnel, en utilisant des méthodes traditionnelles. Pour répondre à ces exigences, une solution à base de blocs de géomousse EPS de 22 000 m³ a été choisie. Cette solution offre des avantages tels que des coûts de construction réduits, une emprise au sol moindre, une construction échelonnée et un temps de construction plus court, un tassement limité le long du remblai et aucune charge supplémentaire sur l'infrastructure souterraine le long du tracé. La stabilité des remblais légers avec des côtés verticaux a été assurée grâce au frottement suffisant entre les blocs EPS et au faible coefficient de Poisson de ce matériau[59].

b/ Projet de remblai en géomoussEPS derrière la culée du pont E18 Farris

L'EPS géomouss a été utilisé pour les remblais derrière les culées du pont Farris en Norvège, nécessitant un volume total de 11 000 m³ d'EPS de qualité variant entre 180 kPa et 300 kPa. Dans la construction de la nouvelle autoroute à quatre voies entre Sandvika et Wøyen, l'utilisation intensive d'EPS combiné avec du verre mousse granulé est une solution pour faire face aux défis de stabilité du sol et de tassements importants, avec trois remblais en EPS construits dans le projet. L'EPS utilisé dans les remblais a une résistance à la compression de 100 kPa et l'analyse de stabilité a montré un facteur de sécurité suffisant [26].

c/ Le premier remblai routier en géomouss en Turquie

Le premier remblai routier utilisant des blocs de géomousse en Turquie a été construit en avril 2017 à Acibadem, Istanbul. La géo-mousse a été choisie pour éviter le déplacement coûteux de deux conduites d'eau de 2,2 m de diamètre situées entre 3,8 et 5,6 m sous la fondation du remblai. Le projet a été achevé sans aucune interruption des services d'eau, et les données de performance recueillies ont montré une bonne performance à long terme avec des déformations totales restant dans les limites admissibles. Ce premier projet bien documenté et surveillé a fourni un exemple majeur démontrant les possibilités d'utiliser la technologie de géo-mousse pour résoudre des tâches difficiles[27].

d/ Élargissement de l'autoroute néerlandaise A76

Le projet concerne l'élargissement de l'autoroute A76 près de l'embranchement de Kerensheide en utilisant un remblai allégé vertical. La solution retenue a été l'utilisation de blocs EPS empilés pour créer un remblai vertical allégé. Les blocs ont été empilés à 4 m au-dessus du niveau du sol et à 2 m sous la ligne de pente, permettant de respecter les conditions de conception complexes telles que la stabilité de la pente actuelle et la résistance à la charge de trafic. Après l'achèvement de l'élargissement de l'autoroute A76, aucun appui latéral n'a été nécessaire pour garantir la stabilité de la pente, offrant ainsi de multiples avantages tels qu'un gain d'espace et de coûts et un temps de construction très court[60].

e/ Évaluation post-utilisation des caractéristiques des blocs EPS en Finlande

Une étude a été menée en Finlande pour évaluer l'utilisation de blocs EPS dans deux projets pilotes de remblais légers pour routes/autoroutes construits sur des sols meubles. Les résultats montrent que les remblais en EPS ont bien résisté pendant leur durée de vie prévue, les blocs ont bien résisté à l'absorption d'eau et leur résistance à la compression était satisfaisante. De plus, la réutilisation des blocs dans d'autres projets similaires a été satisfaisante et est recommandée[61].

I.9 Objectifs de performance des géo-mousses EPS

La géomousse EPS constitue une solution pratique pour soutenir les structures de ponts routiers sans l'utilisation de fondations profondes. Cette technologie est particulièrement utile pour accélérer la construction sur des sols compressibles. L'utilisation de la géomousse EPS permet une construction rapide et économique de fondations de ponts, en évitant les coûts et les délais liés aux fondations traditionnelles. La légèreté de la géomousse EPS permet également d'éviter les tassements aux approches des ponts. En Norvège, cette technologie a été utilisée avec succès pour soutenir directement certains ponts reposant sur un dépôt mou et argileux, où la structure du pont est entièrement supportée par des blocs de géomousse EPS. L'administration norvégienne des routes publiques a été précurseur dans l'application de cette solution innovante [62].

Le système de support de pont en EPS est largement utilisé dans les sites de sols mous ou problématiques, mais il est déconseillé de l'utiliser dans les plaines inondables modernes ou à des points de franchissement importants de rivières susceptibles d'être inondés. Pour éviter le tassement excessif du système de pont, il est important de limiter la compression élastique des blocs EPS à la plage élastique admissible sous la combinaison des charges permanentes, vives et de trafic. De plus, la déformation verticale des blocs EPS liée à la construction doit être limitée à 1 %, tandis que la déformation de fluage des blocs due aux charges permanentes à long terme doit être limitée à environ 2 % en 50 ans. Enfin, il est important de prendre en compte le tassement de consolidation des sols de fondation. Selon Farnsworth et al. [63], des mesures sur le terrain ont montré que les systèmes d'approche des ponts peuvent généralement avoir des performances acceptables si le tassement par fluage des sols de fondation est limité à environ 7,5 cm sur une période de 10 ans après la construction.

Conclusion

Le polystyrène est un matériau polyvalent utilisé pour l'isolation thermique et l'emballage, généralement fabriqué à partir de matières premières importées. Les blocs géomouss, quant à eux, offrent une solution légère dans le domaine du génie civil pour la construction de routes, de chemins de fer, d'aérodromes et d'autres projets de construction. Leur utilisation est répandue dans de nombreux pays à travers le monde, notamment aux États-Unis, au Canada, en Argentine, en Colombie et en Australie, avec quelques projets rapportés également en Afrique. Les avantages des blocs géomouss incluent une construction rapide, des coûts réduits, une légèreté qui évite les tassements excessifs et une adaptabilité à diverses applications de génie civil.

CHAPITRE II

Caractéristiques et Comportement Mécanique

CARACTERISTIQUES ET COMPORTEMENT MECANIQUE

II.1 Introduction

Depuis les années 1960, le polystyrène expansé a été utilisé dans un large éventail de projets d'ingénierie géotechnique, en tant que matériau de remblai léger pour les remblais et les approches de pont, ou comme inclusion compressible pour les murs de soutènement et les ponceaux. Dans la plupart de ces projets, le polystyrène est installé en contact direct avec d'autres blocs de géomousse ou d'autres matériaux de construction. La conception réussie de ces systèmes composites nécessite une bonne compréhension du comportement de compression confinée et non confinée, ainsi que de la résistance au cisaillement et cisaillement de l'interface [64, 65]. Les propriétés mécaniques du polystyrène expansé (EPS) sont importantes pour la conception des remblais légers, car elles affectent la stabilité externe et interne du corps de remblai ainsi que l'intégrité des chaussées. Lors de la conception de projets utilisant l'EPS géomousse, il est important de considérer les propriétés mécaniques de l'EPS, notamment en termes de compression et de cisaillement d'interface. Les propriétés de compression sont utilisées pour déterminer la densité d'EPS appropriée pour supporter les charges permanentes et d'exploitation, ainsi que pour évaluer les propriétés équivalentes du sol pour la conception de la chaussée. Les propriétés de cisaillement d'interface sont importantes pour l'évaluation de la stabilité externe et interne du géomousse, en particulier dans des conditions produisant des sollicitations latérales telles que le vent, les charges d'eau déséquilibrées ou les charges sismiques. Les méthodes modernes d'analyse et de conception des remblais en polystyrène sont basées sur des déformations explicites de la masse de la géomousse, ce qui rend le comportement mécanique global (contrainte-temps-température) sous les efforts de compression une propriété essentielle à considérer.

II.2 Caractéristiques et défis physiques

Le polystyrène expansé présente des propriétés physiques qui peuvent être comparées à celles des indices traditionnels du sol, tels que la description, la classification, la taille des particules et les limites d'Atterberg. Cependant, les deux propriétés clés de l'indice du polystyrène expansé sont la masse volumique et la fusion. Outre ces propriétés d'index clés, d'autres propriétés physiques telles que les dimensions des blocs, la couleur, l'inflammabilité, la durabilité et les effets environnementaux peuvent également affecter le coût, la conception ou la construction. La dimension des blocs peut être importante pour les applications où une taille spécifique est requise. La couleur peut être utilisée à des fins esthétiques ou pour faciliter l'identification ou la classification. L'inflammabilité peut être importante pour les applications où la sécurité incendie est une préoccupation, tandis que la durabilité peut affecter la durée de vie de la structure.

Dans l'ensemble, le polystyrène expansé est un matériau polyvalent avec des propriétés physiques uniques qui doivent être prises en compte lors de sa conception, sa fabrication et son utilisation[66]. Les propriétés clés telles que la masse volumique et la fusion sont importantes pour l'indexation, tandis que d'autres propriétés telles que les dimensions des blocs, la couleur, l'inflammabilité, la durabilité et les effets environnementaux sont également d'une grande importance dans la conception et l'utilisation de ce type de matériau.

II.2.1 la Masse Volumique

Le polystyrène expansé est un matériau de faible densité, ce qui en fait un excellent choix pour les applications de remblai. Sa masse volumique peut être jusqu'à 100 fois plus faible que celle des matériaux de remblai conventionnels. Cependant, il est important de choisir le bloc EPS avec la masse volumique appropriée, car les propriétés techniques du matériau sont directement liées à cette caractéristique. Ces propriétés incluent la résistance à la compression, le module d'élasticité et le comportement au fluage[67, 68]. Dans la construction de chaussées, des blocs d'EPS avec des masses volumiques comprises entre 16 et 32 kg/m³ sont généralement utilisés. Cependant, il est possible d'atteindre des masses volumiques jusqu'à 100 kg/m³. Les masses volumiques standard du polystyrène expansé varient d'un pays à l'autre et selon les normes en vigueur. Des tableaux présentant certaines des masses volumiques typiques disponibles dans le monde peuvent être consultés, tels que les tableaux II.1 et II.2 [69].

Tableau II.1 : Masses volumiques de Géomousse EPS [69]

Type selon ASTM C 578	Masse volumique Kg/m ³	Type selon ASTM D 6817
I	12	EPS 15
II	22	EPS 22
VIII	18	EPS 19
IX	29	EPS 29
XI	12	EPS 12

Tableau II.2 : Classification des masses volumiques du polystyrène expansé EPS [69].

Classe	Masse Volumique Kg/m ³
L	11
SL	13.5
SL	16
M	19
H	24
VH	28

Dans la classification des types de polystyrène expansé (PSE), les catégories L, SL, M, H et HV sont couramment utilisées pour désigner des niveaux de densité ou de résistance, avec des applications spécifiques en fonction des besoins de chaque projet.

1. ****L (Légère)**** : faible densité, souvent utilisée pour des applications légères nécessitant une isolation thermique de base, sans trop de contraintes mécaniques.
2. ****SL (Super légère)**** : densité légèrement plus élevée que "L", avec de meilleures propriétés d'isolation et de légères améliorations en termes de résistance mécanique, adaptée aux utilisations modérées.
3. ****M (Moyenne)**** : densité moyenne, souvent employée pour des applications nécessitant un compromis entre isolation thermique et résistance mécanique.
4. ****H (Haute)**** : haute densité, utilisée dans des environnements où une bonne résistance mécanique est nécessaire, comme sous les dalles en béton dans les bâtiments.
5. ****HV (Très Haute)**** : très haute densité, offrant la plus grande résistance mécanique, souvent utilisée dans des projets d'ingénierie où des contraintes importantes sont appliquées, comme dans les structures de fondations ou les applications en génie civil.

Cette classification est souvent mentionnée dans la littérature technique et les normes de matériaux de construction, comme celles d'ASTM C578 pour les spécifications des isolants en polystyrène expansé. Ces classes permettent aux ingénieurs et architectes de choisir le type de PSE en fonction des exigences de charge et de performance thermique.

La fabrication des blocs EPS permet de contrôler leur densité en ajustant la densité de la pré-bouffée créée lors de la première étape de fabrication, le processus de pré-expansion. La plage possible de densité d'EPS est assez large, allant de 10 kg/m³ à 100 kg/m³. Cependant, pour des raisons pratiques, la plage disponible pour les applications de construction de remblais légers est souvent limitée à une fourchette plus étroite, généralement comprise entre 16 et 32 kg/m³[70].

La densité de la géomousse de polystyrène peut être utilisée comme indice pour estimer certaines propriétés mécaniques et thermiques, sous réserve que les spécifications de la norme de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) soient respectées. Cela inclut notamment la résistance à la compression, le module d'élasticité et la conductivité thermique. Il est important de noter qu'il peut y avoir des problèmes liés à la densité des blocs EPS. Tout d'abord, il existe une variabilité inhérente à la densité des blocs produits dans un même cycle de production, même si des contrôles de qualité de fabrication appropriés sont utilisés. Cette variabilité peut être mesurée en pesant chaque bloc pour déterminer sa densité nominale (moyenne). Deuxièmement, il peut y avoir des gradients de densité au sein de chaque bloc, qui sont des variations de densité par rapport à une valeur nominale (moyenne) dues à la variabilité inhérente au processus de fabrication. Ces gradients de densité peuvent atteindre environ $\pm 10\%$ et sont généralement les plus élevés au centre d'un bloc et les plus faibles sur les bords. Il est donc important de découper des échantillons

relativement petits pour déterminer la densité réelle d'un bloc. Troisièmement, la plupart des mouleurs de blocs sont configurés pour fabriquer l'EPS à cinq densités standard spécifiées dans la norme ASTM D 578-95[71, 72].

Il est également important de noter que la mesure de la densité des blocs n'est pas aussi simple qu'elle peut paraître. Pour les blocs fraîchement moulés, la densité peut être affectée par le temps de dégazage de l'agent gonflant pentane résiduel ainsi que par l'humidité de la vapeur condensée. De plus, la densité peut être affectée par l'humidité atmosphérique absorbée et doit être déterminée immédiatement avant le test et uniquement après un protocole d'assaisonnement approprié (vieillessement et conditionnement dans l'industrie). La norme ASTM D 1622 peut être utilisée pour déterminer la densité des échantillons découpés dans un bloc à l'aide d'un coupeur à fil chaud, qui peut donner des valeurs de densité plus cohérentes et des surfaces plus propres et plus lisses que d'autres méthodes de coupe.

II.2.2. La fusion

Un autre aspect important de la qualité de l'EPS est sa fusion, qui représente la capacité des morceaux de pré-expansion à se fondre ensemble pendant la seconde étape de production (le moulage final du bloc). Même si la fusion n'est pas directement associée aux propriétés mécaniques ou thermiques, elle joue un rôle important dans la durabilité et la résistance globale du produit final. Le chargement de traction est souvent utilisé pour évaluer la fusion, mais la résistance à la flexion peut également fournir une indication indirecte de la qualité de la fusion de l'EPS. En effet, la résistance à la flexion est étroitement corrélée à la résistance à la traction et peut être utilisée pour évaluer la qualité globale de l'EPS [73].

II.2.3. Inflammabilité

L'indice d'oxygène (OI) est une mesure courante pour évaluer l'inflammabilité des matériaux polymères tels que le polystyrène. Il représente la proportion minimale d'oxygène nécessaire dans un mélange de gaz pour maintenir une combustion continue, exprimée en pourcentage.

Avec un OI de 18%, le polystyrène est considéré comme inflammable, car il nécessite plus de 21% d'oxygène pour maintenir une combustion dans l'air atmosphérique. Cependant, il est possible d'ajouter un produit chimique inorganique à base de brome à la matière première de polystyrène expansible, ce qui donne une perle ou résine modifiée. Cette modification confère à l'EPS des propriétés ignifuges et auto-extinguibles. Bien que l'EPS modifié puisse encore fondre à des températures comprises entre +150°C et +260°C, une valeur de travail maximale de +95°C est généralement recommandée. Il est important de noter que les billes modifiées ne peuvent pas être distinguées visuellement, et que l'ajout de brome n'affecte pas les propriétés physiques, mécaniques ou thermiques de l'EPS[74].

II.2.4. Durabilité

La durabilité globale des blocs EPS concerne une gamme de problèmes. En général, la géomousse en blocs EPS est considérée comme un produit géosynthétique très robuste et peu problématique par rapport à de nombreux autres types. En effet, ces derniers peuvent être

susceptibles de subir des dommages physiques importants et des changements chimiques néfastes pendant et après la construction. Comme, l'EPS est intrinsèquement non biodégradable, ne se dissout pas et ne subit aucune détérioration ou changement chimique dans le sol et les eaux souterraines. Bien qu'il absorbe une partie de l'eau souterraine au fil du temps considérée négligeable, et ses propriétés mécaniques et ses dimensions ne sont pas affectées par le temps. De plus, l'EPS ne fournit aucune source de nourriture nutritive à aucun organisme vivant ou animal. Cependant, certains insectes fouisseurs tels que les termites et les fourmis charpentières ont été connus pour creuser des tunnels dans les blocs d'EPS ou y nicher. Malgré cela, il n'existe aucun cas connu dans le monde où des dégâts d'insectes ont été détectés pour la géomousse en blocs EPS utilisée comme remblai léger[75].

La durabilité du polystyrène expansé est bien établie, comme l'ont montré les tests effectués en Norvège sur des échantillons exhumés de projets historiques de géomousse EPS, dont certains remontent à 24 ans. Ces tests n'ont révélé aucun signe de détérioration du matériau. De plus, les tests de résistance à la compression ont démontré que cette résistance n'a pas diminué, et les mesures de fluage enregistrées ont été jugées mineures. L'étude a également suggéré que la durée de vie de 100 ans des blocs EPS dans les applications de génie civil serait vraie à condition que les forces de flottabilité soient prises en considération, les blocs EPS soient protégés des agents qui peuvent les dissoudre (protégés des carburants essence/diesel, etc.) , et que les charges permanentes appliquées ne dépassent pas 30 à 50 % de la résistance du matériau. La seule détérioration observée provenait de l'absorption d'eau à long terme; un événement indésirable car l'absorption d'eau entraîne une diminution de l'efficacité thermique et une augmentation temporaire de la rigidité de la géomousse EPS. Il convient de souligner que l'exposition prolongée aux rayons UV peut avoir un impact négatif sur la durabilité des blocs EPS de géomousse. Si les blocs EPS sont exposés à la lumière UV pendant plusieurs mois, voire plusieurs années, ils peuvent se décolorer, devenir crayeux et cassants[76].

II.2.5. Effets environnementaux

Les impacts environnementaux liés à l'utilisation de blocs EPS de géomousse peuvent être classés en différentes catégories. Tout d'abord, en ce qui concerne le matériau lui-même, le polystyrène expansé (EPS) n'est pas intrinsèquement nocif ou dangereux. Il n'interagira pas avec le sol ou les eaux souterraines et ne libérera pas de produits chimiques dans l'environnement. En cas de combustion accidentelle ou intentionnelle de l'EPS, les produits de la combustion seront principalement du dioxyde de carbone et de l'eau. Dans le cas de l'EPS ignifugé, des traces de bromure d'hydrogène peuvent également être émises. Les cendres résultantes de la combustion de l'EPS ne contiennent pas de métaux lourds ou d'autres substances généralement considérées comme toxiques ou dangereuses [77]. Le polystyrène expansé est devenu un choix populaire par rapport aux autres types de mousse possédant des propriétés techniques similaires pour un certain nombre de raisons. Tout d'abord, la production de géomousse EPS n'a pas contribué à l'appauvrissement de la couche d'ozone car sa fabrication n'implique pas l'utilisation de CFC, HCFC ou d'autres agents gonflants similaires. De plus, contrairement à d'autres mousses, la production d'EPS n'entraîne pas la libération de formaldéhyde, un gaz nocif pour l'environnement. En outre, le polystyrène

expansé est considéré comme non nocif pour la santé humaine et a été adopté comme matériau pour la fabrication d'ustensiles de cuisine, de récipients alimentaires et de gobelets.

II.2.6. Résistance thermique et chimique

Le polystyrène expansé est principalement composé d'air, représentant environ 98 % de sa composition. Cette caractéristique en fait un excellent matériau isolant, car l'air emprisonné est un mauvais conducteur thermique. Sa résistance thermique, mesurée par la résistivité R , est généralement comprise entre 0,5 et 0,8 ($\text{m}^3 \text{C}^\circ/\text{W}$). Cette valeur est plusieurs fois supérieure à la résistivité du sol, qui est généralement faible, atteignant seulement 0,1 $\text{m}^3\text{C}^\circ/\text{W}$. La résistivité thermique du polystyrène expansé augmente avec la masse volumique, atteignant un maximum de 35 kg/m^3 , tandis que la résistance thermique diminue avec l'absorption d'eau [78].

Le polystyrène expansé (EPS) utilisé dans les applications de construction routière peut être dissous par plusieurs produits chimiques, notamment les carburants des véhicules à moteur tels que le diesel et l'essence, en cas de déversement. Cependant, ce problème peut être évité en protégeant l'EPS avec une géo-membrane ou un autre matériau approprié. En cas de déversement important d'huile, une protection doit être prévue au-dessus des blocs de géomousse EPS. La dalle en béton répartissant la charge agira comme une couche protectrice, mais il est recommandé de placer une feuille de géo-membrane protectrice (HDPE ou similaire) pour couvrir l'ensemble de la structure en géomousse EPS. La membrane doit avoir une épaisseur d'au moins 1,0 mm et être inerte à l'essence et aux autres agents de solubilisation. À ce jour, aucun accident impliquant des blocs géomousse endommagés en raison d'un déversement d'hydrocarbures n'a été signalé sur une route en service, et le risque que de tels incidents se produisent est extrêmement faible. Cependant, il est important de se préparer à de telles éventualités.

II.3. Caractérisations et étude de comportement

II.3.1 Comportement contrainte-déformation en compression uni-axial

Le chargement en compression uni-axiale non confinée est le principal mode de chargement utilisé pour tester les blocs en polystyrène expansé, et reste aujourd'hui le mode de chargement prédominant pour les applications porteuses de la géomousse, comme les remblais légers [79]. Cependant, il est important de noter que les blocs en polystyrène expansé ont souvent des gradients de densité inhérents dus au processus de fabrication, ce qui peut affecter le comportement mécanique de l'ensemble du bloc. Par conséquent, la densité d'un petit échantillon découpé dans un bloc peut être significativement différente de la densité brute de l'ensemble du bloc, ce qui rend les résultats des tests sur ces échantillons non représentatifs du comportement de l'ensemble du bloc. La recherche fondamentale a montré que le comportement en compression dépend principalement de la densité [80]. Bien que des études aient été réalisées pour évaluer l'impact de la forme et des dimensions des échantillons sur les résultats des tests, il est important de souligner qu'il est nécessaire de mener des études supplémentaires afin d'évaluer précisément les différences absolues des résultats des tests sur des échantillons de tailles différentes.

La pratique courante pour obtenir un échantillon représentatif de la géomousse EPS consiste à prélever les éprouvettes aux emplacements standards, tels que définis dans certaines normes établies depuis plusieurs décennies. Les échantillons sont ensuite découpés selon les dimensions prévues pour l'éprouvette à l'aide d'un gabarit et de pinces coupantes à fil chaud. Enfin, les éprouvettes sont soumises à des essais de fluage, de compression uni-axiale et de cisaillement afin de déterminer les paramètres géotechniques pertinents nécessaires à la conception [37].

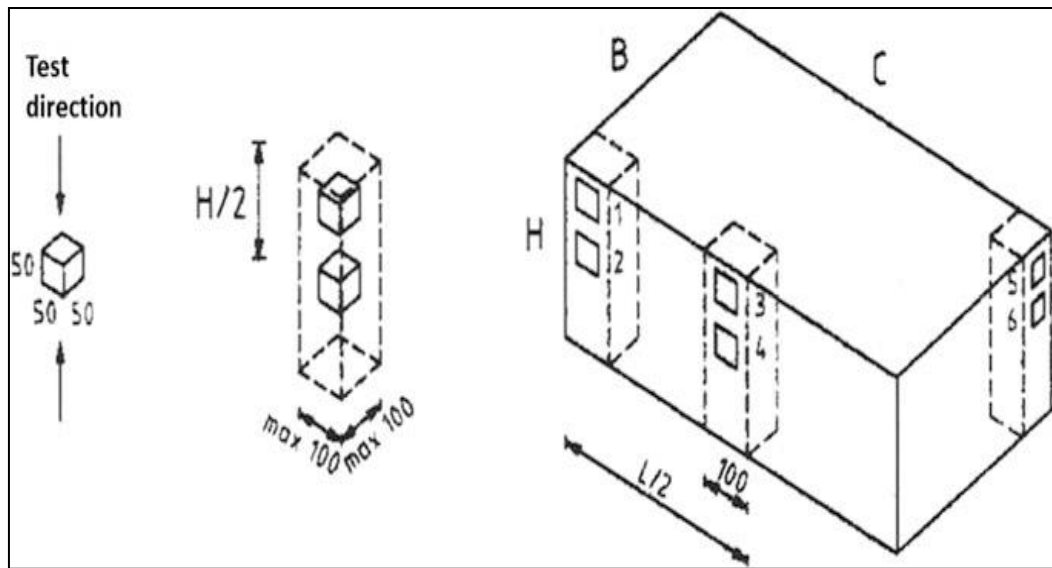


Figure II.1 : Echantillonnage des éprouvettes pour les tests de compression uni-axial [37]

Il convient de noter que la résistance à la compression du polystyrène expansé est mesurée par la contrainte de compression à une déformation de 10%, conformément aux normes ASTM. Cela s'explique par le fait que le polystyrène expansé ne se rompt pas typiquement sous une charge de compression, mais s'écrase plutôt de manière unidimensionnelle en polystyrène solide [81]. Cependant, la résistance à la compression de l'EPS ne permet pas d'obtenir d'informations sur son comportement au fluage. Pour cette raison, Horvath (1995) suggère que les concepteurs conçoivent dans la plage élastique de l'EPS afin de maintenir la contrainte de compression à long terme dans une plage acceptable. Cette plage est définie à une déformation de compression de 1% dans un test de chargement rapide où le taux de fluage est négligeable.

Tableau II.3. Exigences minimales de résistance à la compression et à la flexion de divers types [82].

Caractéristiques mécaniques	ASTM 6817					
	EPS 12	EPS 15	EPS 19	EPS 22	EPS 29	EPS 39
Résistance à la compression à 1% de def (KPa)	15	25	40	50	75	103
Résistance à la compression à 5% de def (KPa)	35	55	90	115	170	241
Résistance à la compression à 10% de def (KPa)	40	70	110	135	200	276
Résistance à la flexion (KPa)	69	172	207	240	345	414

La figure II.2, ci-dessous, présente la réponse typique de la courbe contrainte-déformation sous le chargement de compression uni-axiale sur un échantillon d'EPS d'une masse volumique de 21 kg/m^3 . Cependant, la réponse pour d'autres masses volumiques est similaire sur le plan qualitatif (Horvath 1995). Contrairement à d'autres matériaux de construction solides comme les métaux, le béton et le bois, l'EPS ne présente pas une rupture physique évidente lorsqu'il est chargé uniformément. De plus, contrairement aux sols et à d'autres matériaux granulaires où un glissement inter-particulaire se produit, l'EPS ne développe pas d'état stable ou de résistance résiduelle à des déformations importantes. Le comportement de l'EPS est essentiellement un durcissement sous contrainte, car il s'écrase de manière unidimensionnelle pour retrouver son état d'origine de polystyrène solide.

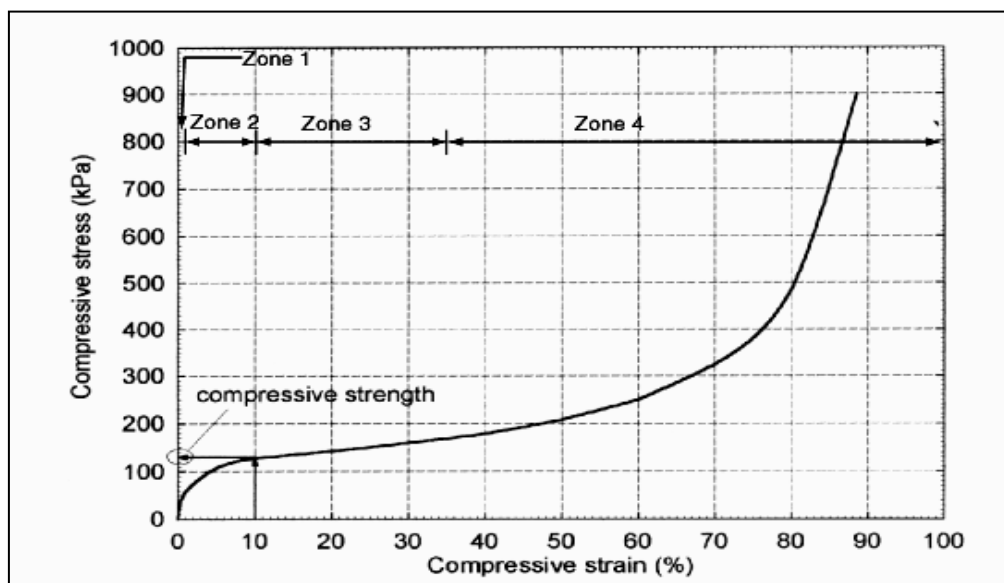


Figure II.2 : Contrainte-déformation d'un bloc EPS sous compression axiale [83].

La contrainte limite d'élasticité (σ_e) correspond à la contrainte de compression à 1 % de déformation, telle que mesurée dans un test de compression à chargement rapide standard. Ainsi, pour atteindre l'objectif de conception de réduire les déformations initiales sous les charges permanentes du système de chaussée sus-jacent, il est possible de limiter les charges à une valeur inférieure à la contrainte limite élastique du bloc EPS. La pente de la partie linéaire initiale de la relation contrainte-déformation (zone 1) est définie comme le module de Young de la tangente initiale, (E_{ti}) [84]. La résistance à la compression est une mesure importante

pour évaluer la performance de l'EPS dans les applications de génie civil. Elle est généralement définie comme la résistance à la compression à 10 % de déformation [35], correspondant à la transition entre les zones (1 et 2) de la courbe contrainte-déformation. La résistance à la compression augmente linéairement avec l'augmentation de la densité de l'EPS. Des études antérieures ont proposé une équation pour estimer la résistance à la compression de l'EPS en fonction de sa densité :

$$\sigma_c(10\%) = 8.82\rho - 61 \dots\dots\dots(1)$$

Où(σ_c) est la résistance à la compression en kPa, (ρ) est la masse volumique en kg/m³.

Cette équation peut être utilisée pour prédire la résistance à la compression de l'EPS pour des densités différentes de celles utilisées lors des tests. Cependant, il est important de noter que cette équation est basée sur des résultats expérimentaux pour des échantillons spécifiques d'EPS et peut ne pas être applicable pour d'autres types d'EPS ou des conditions de chargement différentes. Ainsi, un paramètre appelé « contrainte plastique » (σ_p) a été proposé par une recherche antérieure et selon Horvath (1995), ce paramètre est appelé « limite élastique » (σ_y) et permet de définir la contrainte correspondante au début de la plastification. La figure II.3 montre la définition de la limite d'élasticité, qui peut être déterminée graphiquement ou à partir d'équations empiriques [76].

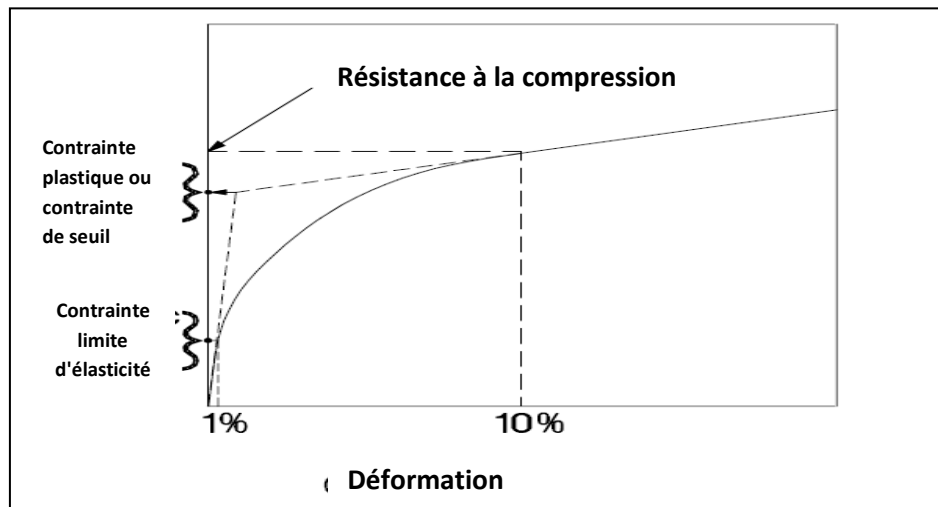


Figure II.3 : Définition de la résistance à la compression [76]

En effet trois équations empiriques ont été proposées pour estimer la limite d'élasticité en fonction de la densité à savoir :

$$\sigma_y = 6.41\rho + 35.2 \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_y = 6.62\rho + 46.3 \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma_y = 6.83\rho + 48.4 \dots\dots\dots(4).$$

La figure II.4 ci-dessous représente la relation entre les équations empiriques proposées. L'équation (2) a été obtenue à partir d'une étude réalisée par [76], tandis que les équations (3) et (4) ont été obtenues à partir de travaux de Horvath selon l'étude effectuée par [11]. En

général, la limite d'élasticité(σ_y) correspond à environ 75 % de la résistance à la compression et sa déformation correspondante est d'environ 1,5 %, légèrement supérieure à (σ_e) qui correspond à une déformation de 1 %, sur une large plage de densités d'EPS.

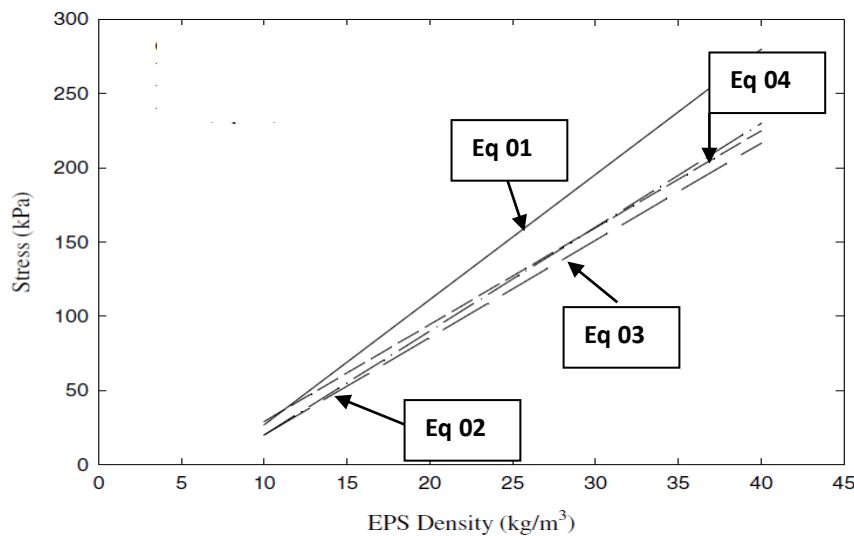


Figure II.4 : Les équations (1, 2, 3, 4) établissent des relations empiriques entre la limite d'élasticité et la masse volumique des blocs d'EPS [11.76]

II.3.1.1 Module de Young

Le module de Young du polystyrène expansé est étroitement lié à la masse volumique de la mousse utilisée, tout comme la résistance à la compression. Actuellement, il est déterminée par des essais de compression uni-axiale sur des échantillons de 50 mm cube conformément aux normes ASTM D 1621, EN 826 et ISO 844. La figure II.5 illustre que, pour toutes fins pratiques, une relation empirique linéaire existe entre la densité de l'EPS et le module de Young, établie par plusieurs chercheurs[85]. Cette relation permet d'estimer le module de Young de l'EPS en fonction de sa densité avec une certaine précision [86].

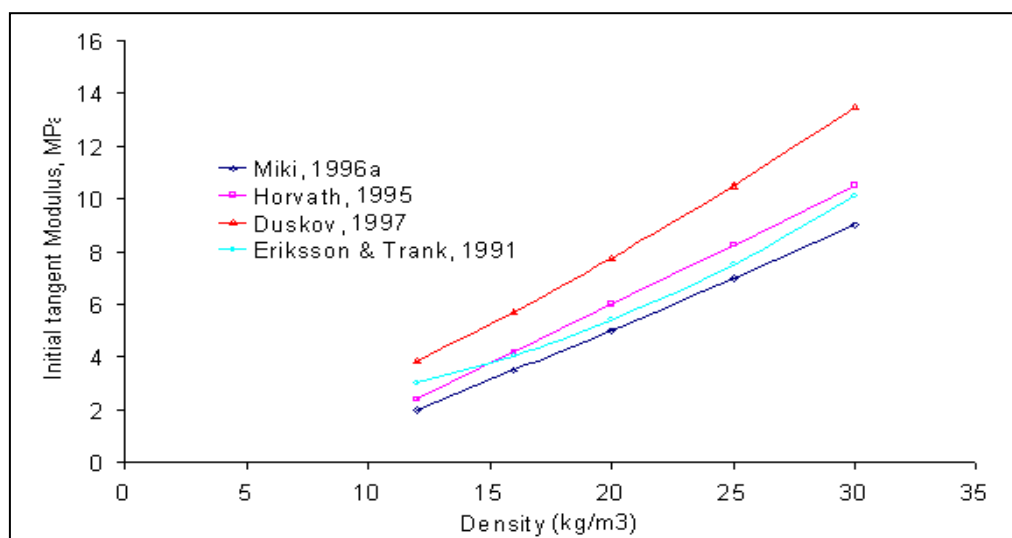


Figure II.5 : Corrélation entre la densité et le module de Young tangent de l'EPS en bloc [76]

La relation entre le module d'élasticité E_{ti} et la densité, extraite de la Figure II.5, est exprimée par l'équation (5) suivante :

$$E_{ti} = 450\rho - 3000 \dots\dots\dots (5)$$

Où (E_{ti}) est exprimé en kilopascals (kPa) et ρ représente la masse volumique en kg/m^3 . En utilisant la relation de la loi de Hooke, $\sigma = (E_{ti}) * (\epsilon)$, l'équation (5) peut être étendue pour former une expression de la contrainte limite élastique à une déformation axiale de 1 % :

$$\sigma_e = (450 \rho - 3000) * (0.01) = 4.5 \rho - 30 \dots\dots\dots (6)$$

Cependant, actuellement, il existe peu d'accord entre les chercheurs en ce qui concerne les valeurs du module de Young pour les blocs EPS de densités variables. Ceci est probablement dû à l'absence d'une procédure de test standard pour mesurer le module de Young dans ces matériaux. Il est possible d'estimer les modules de Young des blocs de géomousse en utilisant la relation entre la vitesse de transmission des ondes P et la densité des blocs. Cette estimation peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{ti} = V^2 * \rho \dots\dots\dots (7)$$

Les résultats des tests non destructifs (NDT) ont révélé que les valeurs des modules de Young des blocs de géomousse correspondent de manière satisfaisante avec les valeurs rapportées à partir d'autres méthodes telles que les essais à grande échelle.

II.3.1.2. Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson, noté généralement ν , est une mesure de la déformation d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte. Plus précisément, il décrit le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale d'un matériau. Lorsqu'un matériau est étiré ou comprimé dans une direction, il tend à se déformer dans les directions perpendiculaires. Le coefficient de Poisson est défini comme suit :

$$\nu = \epsilon_t / \epsilon_l$$

où ϵ_t est la déformation transversale et ϵ_l est la déformation longitudinale.

Les valeurs du coefficient de Poisson varient généralement entre 0 et 0,5 pour la plupart des matériaux, où :

- Un $\nu=0$ indique qu'il n'y a pas de déformation transversale.
- Un $\nu=0,5$ indique que le matériau est complètement incompressible.

Ce coefficient est important dans des domaines comme la mécanique des matériaux, l'ingénierie et la géophysique.

Dans le cas des blocs EPS, ce coefficient est une fonction de la densité, augmentant linéairement avec celle-ci lorsque le comportement contrainte-déformation est linéaire, mais diminuant rapidement pour des déformations plus importantes. Pour le polystyrène expansé, lorsque le comportement est dans la plage élastique, le coefficient de Poisson est approximativement égal à 0,12 [87].

Dans le domaine élastique, le coefficient de Poisson (ν) est relativement petit (de l'ordre de 0,1) et est souvent considéré comme égal à zéro à des fins de conception pratique selon le manuel national de conception français [17]. Cependant, des recherches menées au Japon par EDO-EPS ont fourni une équation qui peut être utilisée pour calculer le coefficient de Poisson.

$$\nu = 0.0056 \rho + 0.0024 \dots \dots \dots (8)$$

Au-delà du domaine élastique, le coefficient de Poisson (ν) décroît rapidement jusqu'à zéro. Des études ont montré que le coefficient de Poisson pour le polystyrène expansé diminue de 0,12 dans la plage élastique (pour des déformations entre 0 et 1 %) à 0,03 à une déformation de 5 %, pour un matériau de la masse volumique de 20 kg/m³. D'autres recherches ont également observé une striction des éprouvettes, ce qui implique un coefficient de Poisson négatif. Cependant, des études menées en Norvège suggèrent que le coefficient de Poisson est relativement faible par rapport à la plupart des autres matériaux de construction.

Tableau II.4: Variations des valeurs du coefficient de Poisson de l'EPS selon différentes études et chercheurs [88]

Référence	Yamanaka et al (1991)	Negussey et Sun (1996)	geoTech (1999a)	Duskov et al (1998)	Ooe , et al (1996)	Sanders (1996)	Momoi et Kokusyo (1996)
Coefficient de poisson	0.075	0.09 et 0.33	0.05	0.1	0.08	0.05 à 0.2	0.5

II.4. Comportement sous charges cycliques

Les charges cycliques, également connues sous le nom de charges répétitives, sont des charges appliquées, retirées, puis réappliquées de manière assez rapide et répétitive. Des recherches ont montré que si la contrainte maximale appliquée reste en dessous de la

contrainte limite élastique, il y aura une déformation plastique ainsi qu'une diminution de l'amplitude de la tangente moyenne du module de Young. En ce qui concerne les blocs en polystyrène expansé, qui sont souvent utilisés comme remblai pour les routes, les charges cycliques, telles que celles générées par le trafic, ne devraient pas avoir d'impact négatif sur la performance du matériau, à condition que la contrainte maximale appliquée reste inférieure à la contrainte limite élastique. Cette conclusion a été corroborée par des études antérieures [89].

La figure II.6, présente un tracé typique de la relation contrainte-déformation pour un échantillon de bloc de polystyrène expansé soumis à une charge cyclique. Ainsi, pour limiter les déformations irréversibles sous les charges de trafic répétitives, il est recommandé de limiter les contraintes maximales appliquées en dessous de la contrainte limite élastique. Cette conclusion est basée sur des essais réalisés sur des spécimens relativement petits découpés dans des blocs d'EPS à pleine grandeur [89].

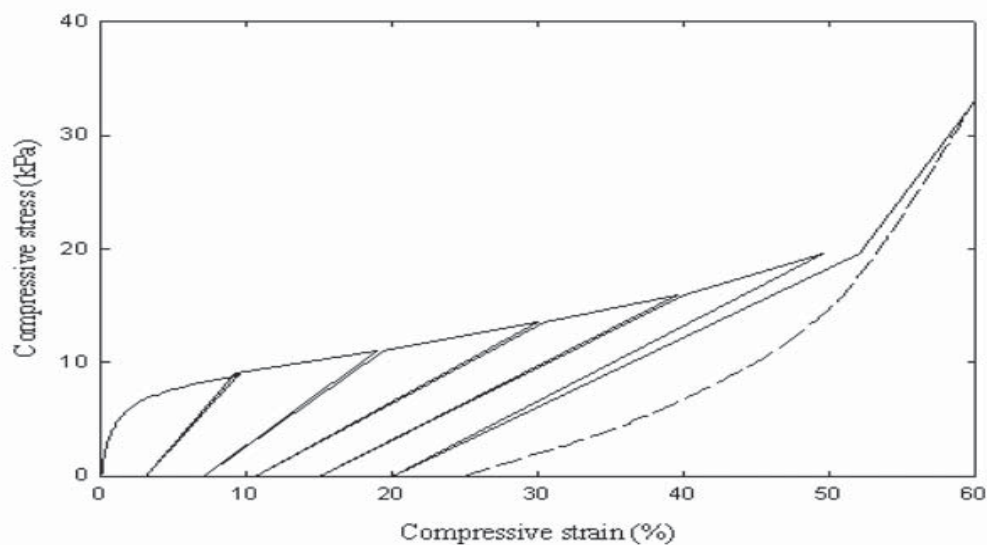


Figure II.6 : Comportement de charge cyclique pour EPS moulé en blocs [89]

II.5. Comportement dépendant du temps (fluage)

II.5.1. Comportement au fluage sous charge statique

La charge continue exercée sur les blocs de géomousse EPS dans le corps de chaussée après la construction est une source de préoccupation en raison de son effet sur le comportement au fluage. Cette charge continue résulte de la charge permanente de la structure de la chaussée et entraîne la fermeture progressive des espaces entre les blocs de géomousse EPS, ce qui peut potentiellement déclencher un comportement de fluage dépendant du temps de la structure de la chaussée. Des études antérieures ont montré que la déformation de l'EPS-géomousse augmente avec la contrainte appliquée pendant une longue durée. La quantité et la durée du fluage dépendent de la densité de l'EPS géomousse et du niveau de contrainte appliquée [91, 92]. En effet, la déformation par fluage augmente avec l'augmentation du niveau de contrainte, et devient plus sensible à des niveaux de contrainte plus élevés qu'à des niveaux

plus faibles. En outre, le temps nécessaire pour que le fluage se stabilise est plus long à des niveaux de contrainte plus élevés. Cependant, aucune défaillance n'a été constatée dans les conditions de chargement testées. Par conséquent, il est important d'utiliser l'EPS-géomousse avec des niveaux de contrainte appropriés dans des situations pratiques[93]. En outre, si le chargement continu dépasse la résistance à la compression de 2 % de déformation, le fluage peut survenir.

Le comportement à long terme du polystyrène expansé est similaire à celui d'autres matériaux d'ingénierie et présente un comportement de fluage primaire, secondaire et tertiaire, comme illustré dans la figure II.7. Cependant, pour représenter les données d'essais de fluage de manière utile, il est courant de construire une famille de relations isochrones contrainte-déformation pour des éprouvettes d'EPS de même densité. Cette approche permet de mieux comprendre le comportement à long terme de l'EPS et de prédire la réponse en déformation sous des charges à long terme [94].

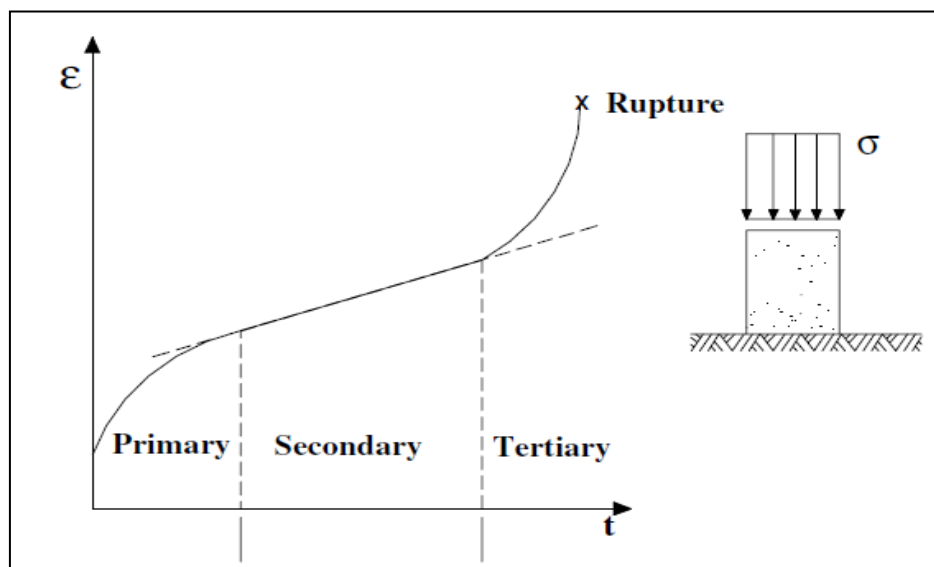


Figure II.7. Régions de comportement en fluage [94]

Plusieurs chercheurs ont étudié le phénomène de fluage dans des conditions ambiantes de laboratoire (+23°C et 50% d'humidité) en examinant des résultats d'essais de fluage à travers le monde. Parmi les variables importantes à prendre en considération pour étudier le phénomène de fluage, on trouve la dimension, la forme, l'âge de l'échantillon, le niveau de contrainte appliqué, le confinement des échantillons, la température et la durée du test[95, 96].

Les relations isochrones contrainte-déformation basées sur les résultats des essais de fluage sont présentées dans la figure II.8. Elle montre que l'EPS présente des grandes déformations de fluage presque immédiatement si les contraintes sont proches de la résistance à la compression. Ainsi, pour produire des niveaux de contrainte acceptables dans des applications de remblai léger, les niveaux de contrainte doivent être maintenus bas par rapport à la résistance à la compression. Les relations isochrones ont tendance à être principalement

linéaires jusqu'à des déformations d'environ 1 à 1,5 %. De plus, l'EPS à faible densité a tendance à fluer plus que l'EPS à haute densité au même niveau de contrainte relative [97].

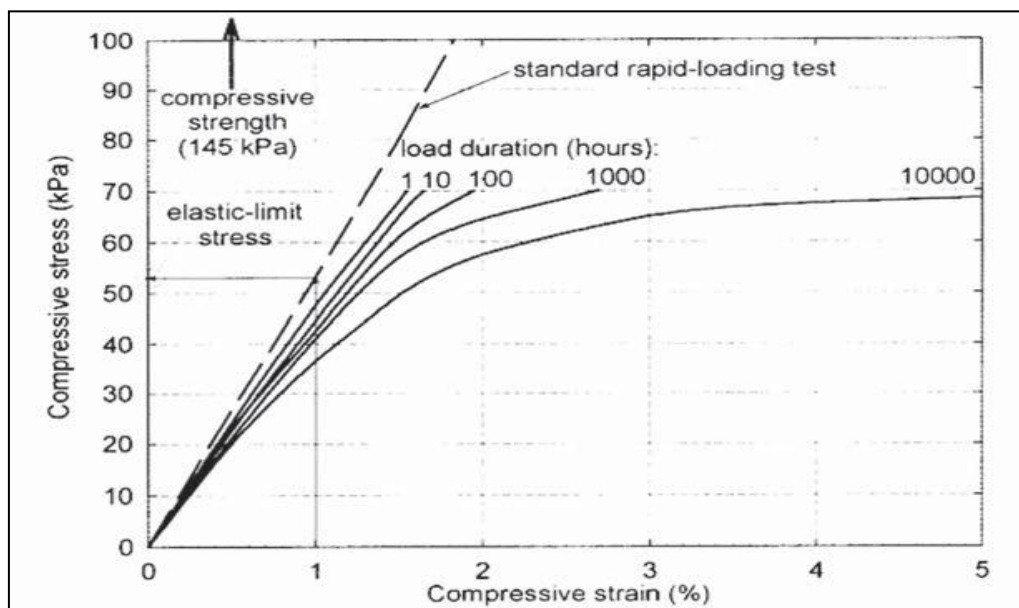


Figure II.8. Courbes isochrones contrainte-déformation pour l'EPS moulé en blocs.

II.5.2. Comportement au fluage sous charge dynamique

Des études ont été menées par Duskov [98] sur le comportement au fluage et la détermination des modules dynamiques d'élasticité à des charges relativement élevées. Pour les conditions de charge dans les routes, des tests de pression dynamique à une fréquence de 5 Hz et jusqu'à 4,3 millions de changements de charge ont été effectués sur Styropor au laboratoire des matériaux BASF à Ludwigshafen. Dans ces essais, le Styropor d'une densité de 20 kg/m³ et 30 kg/m³ a été étudié. Les tests montrent que les valeurs de compression pour la charge statique et cyclique sont pratiquement identiques tout au long de l'expérience. Pour évaluer le comportement au fluage de l'EPS sous charge cyclique, les courbes issues des essais statiques longs durés peuvent être utilisées.

II.5.3. Procédure recommandée pour considérer les contraintes de fluage

Selon les études antérieures, les taux de déformation immédiate de la géomousse EPS sont un facteur déterminant de son comportement au fluage [99, 100]. Si la contrainte appliquée produit une déformation immédiate inférieure à 0,5 %, les déformations de fluage seront négligeables même sur une longue période. Pour des déformations immédiates comprises entre 0,5 % et 1 %, les déformations de fluage resteront tolérables (moins de 1 %) pour des applications de remblai léger, même à long terme. Cependant, si la contrainte appliquée produit une déformation immédiate supérieure à 1 %, les déformations de fluage peuvent rapidement augmenter et devenir excessives pour des applications de remblais légers. Les

observations indiquent que la contrainte de compression correspondant à une déformation verticale de 1 % représente une contrainte limite d'élasticité seuil pour le développement d'effets significatifs de fluage.

Pour atteindre l'objectif de conception visant à limiter les déformations de fluage à long terme dans des limites acceptables, il est recommandé de limiter les contraintes appliquées sur le terrain à moins que la contrainte limite élastique, en attendant le développement de modèles de fluage plus fiables. Si la contrainte appliquée est inférieure à la contrainte limite élastique, les déformations de fluage dans la masse d'EPS sous des charges soutenues devraient se situer dans des limites acceptables de 0,5 à 1 % de déformation sur une période de 50 à 100 ans. Il a également été conclu que les déformations de fluage de la masse de polystyrène devraient se situer dans des limites acceptables (0,5 % à 1 % de déformation sur 50 à 100 ans) si la contrainte appliquée produit une déformation immédiate entre 0,5 % et 1 %.

II.5.4. Influence de la température sur le comportement au fluage

Le comportement contrainte-déformation des matériaux polymères, tels que le polystyrène expansé, est généralement influencé par la température [93]. Cependant, la majorité des études sur le phénomène de fluage du polystyrène ont été menées à température ambiante (+23°C). Des tests menés à des températures plus élevées indiquent que le comportement du bloc EPS est cohérent avec les tendances des matériaux polymères en général, y compris le polystyrène. En d'autres termes, la relation entre le fluage et la température est proportionnelle. Réaliser des tests à différentes températures permettrait donc de mieux comprendre le comportement de fluage du polystyrène expansé dans des conditions environnementales variées[101].

II.6. Comportement de retrait

En plus de cette déformation par fluage sous charge constante avec le temps, le polystyrène expansé présente également un retrait indépendant de la charge. Le retrait est initié par diffusion de résidus d'agents gonflants ajoutés lors du processus de production pour l'expansion des billes de polystyrène. Le retrait dépend du temps et peut être divisé en trois phases [102].

- ✓ La première phase se produit immédiatement après la production du bloc, où la majeure partie de l'agent gonflant se diffuse pendant la phase de stockage et de refroidissement d'une journée qui suit, requise par le processus de production. Dans cette phase, le retrait s'accompagne de la contraction qui se produit lors du refroidissement des blocs d'EPS à température ambiante.
- ✓ La deuxième phase commence après le refroidissement, lorsque les blocs sont mis en forme si nécessaire. Cela marque le début de la phase post-rétrécissement avec un stockage intermédiaire par le producteur et plus tard sur le chantier avant l'installation.
- ✓ La troisième phase, que nous appellerons "retrait résiduel", se produit après l'installation des blocs.

En plus de la déformation par fluage sous charge constante avec le temps, le polystyrène expansé présente également un retrait indépendant de la charge. Ce retrait est initié par la diffusion des résidus d'agents gonflants ajoutés lors du processus de production pour l'expansion des billes de polystyrène.

II.7. Comportement sous compression confinée (triaxial)

L'EPS géomousse est largement utilisée dans les applications géotechniques en raison de ses propriétés spéciales, telles que sa faible densité, sa faible perméabilité et son comportement mécanique distinct. Plusieurs études ont montré que la résistance à la compression de l'EPS géomousse dépend principalement de sa densité et de son taux de déformation, ainsi que de la contrainte de confinement [102, 103].

En 2012, Padade et Mandal, ont mené une étude pour évaluer le comportement de l'EPS géomousse sous des conditions de chargement triaxial[104]. Des éprouvettes de 75 mm de diamètre et 150 mm de hauteur ont été utilisées, avec quatre densités différentes d'EPS géomousse (0,15, 0,20, 0,22 et 0,30 kN/m³) soumises à des pressions de confinement de 50, 100 et 150 kPa. Les résultats ont montré que la densité de l'EPS géomousse et la cohésion ont une relation proportionnelle, atteignant une cohésion maximale de 62,0 kPa pour la densité de 0,30 kN/m³ et un angle de frottement interne de 2,5°. L'angle de frottement interne a également augmenté légèrement et la contrainte du déviateur a augmenté avec la densité d'EPS géomousse. D'autres études ont montré que la résistance ultime à la compression de la géomousse EPS est principalement influencée par la densité du matériau. Bien que la contrainte de confinement ait également un effet, celui-ci est relativement faible[105]. Les études ont révélé que la résistance ultime à la compression augmente à mesure que la densité de la géomousse EPS et la contrainte de confinement augmentent. Les résistances ultimes rapportées varient en fonction de la densité et de la contrainte de confinement, allant jusqu'à environ 80kPa pour une densité de 24kg/m³ et 160kPa pour une densité de 32kg/m³. De plus, une corrélation linéaire a été observée entre la déformation volumétrique et axiale, qui dépendent à la fois de la densité et de la contrainte de confinement [106].

II.8. Comportement au cisaillement

La plupart des projets de terrassement impliquent l'installation de blocs EPS géomousses qui entrent en contact direct les uns avec les autres ou avec d'autres matériaux de construction tels que le sol, le béton, le PVC, les géo-membranes ou l'acier. La conception réussie de ces systèmes composites nécessite une compréhension approfondie du comportement de compression et de cisaillement des blocs de géomousse, ainsi que de la résistance au cisaillement de l'interface. Le coefficient de frottement d'interface ou facteur de frottement est le rapport de la contrainte de cisaillement résistante à la contrainte normale appliquée. Ce paramètre est important pour évaluer la stabilité de la structure contenant la géomousse EPS [107]. La résistance au cisaillement du polystyrène expansé peut être subdivisée en deux types distincts : la résistance au cisaillement interne et externe. La résistance au cisaillement interne est liée à la capacité des particules de blocs EPS à glisser les unes par rapport aux autres. D'autre part, la résistance au cisaillement externe est associée à la capacité de l'interface entre

les blocs EPS à résister au glissement, ainsi qu'à la capacité de l'interface entre les blocs EPS et d'autres matériaux (tels que le sol, le béton, le PVC, la géo-membrane ou l'acier) à résister au glissement.

Cette distinction est importante pour évaluer la stabilité globale de la structure en géomousse, car elle permet de mieux comprendre comment les blocs EPS interagissent avec les autres matériaux de construction environnants.

II.8.1. Comportement au cisaillement direct de monoblocs Géomouss

Plusieurs études ont été menées pour évaluer la résistance au cisaillement de la géomousse EPS en fonction de sa densité et de son état d'humidité. Dans une première expérience de cisaillement direct menée sur des échantillons de géomousse de différentes densités ont été testées et ont montré une corrélation linéaire entre la densité et la force de cohésion[108]. D'autres études ont tentées de mesurer les paramètres de résistance au cisaillement des blocs de polystyrène expansé (EPS) de différentes densités ainsi que les paramètres de résistance de l'interface [109]. Les résultats obtenus ont constatés que l'augmentation de la densité de la géomousse entraînait une augmentation significative de la cohésion avec une légère augmentation des angles de frottement interne. Aussi, il a été constaté, que la résistance au cisaillement des blocs de géomousse testés dépendait principalement de leur cohésion, tandis que la résistance au cisaillement de l'interface dépendait à la fois de l'adhérence et du coefficient de friction.

En somme, la densité de la géomousse EPS est un facteur clé dans la détermination de sa résistance au cisaillement interne, tandis que la résistance au cisaillement de l'interface dépend de l'adhérence et du coefficient de friction. De plus, l'humidité peut avoir un effet significatif sur la résistance au cisaillement de la géomousse EPS, et il est important de la prendre en compte lors de la conception et de la construction de structures utilisant la géomousse EPS. Les coefficients de frottement des pics et des interfaces résiduelles mesurés à l'aide d'essais de cisaillement direct se sont révélés être respectivement de 0,63 et 0,52. Tandis que, la valeur de cohésion augmente de manière significative alors qu'une augmentation marginale de l'angle de frottement interne avec l'augmentation de la densité. Aucune valeur maximale de résistance au cisaillement n'a été observée et les paramètres de résistance au cisaillement de la géomousse EPS ont augmenté avec la densité.

II.8.2. Comportement de l'EPS Géomousse en termes de cisaillement renforcé

Le frottement d'interface est une considération critique dans l'évaluation de la stabilité de structures soumises à des charges horizontales importantes telles que le vent, les charges d'eau déséquilibrées ou les secousses sismiques. Des tests pour évaluer le frottement d'interface entre la surface des blocs EPS et d'autres matériaux sont donc essentiels dans les projets où des charges horizontales importantes sont attendues ou lorsque des problèmes de glissement interne peuvent survenir. En outre, des analyses de la stabilité de glissement sont souvent menées pour évaluer le comportement de la structure en cas de charges horizontales élevées,

telles que celles qui se produisent lors d'un tremblement de terre ou de conditions météorologiques extrêmes[110]. Ces analyses peuvent être utiles pour évaluer l'impact potentiel du frottement d'interface sur la stabilité globale de la structure.

Dans les applications de remblais légers, deux types d'interfaces sont particulièrement intéressants pour les blocs EPS : l'interface EPS/EPS et l'interface EPS/matériau différent. L'interface EPS/EPS se produit lorsque deux blocs EPS sont en contact direct, tandis que l'interface EPS/matériau différent se produit lorsque les blocs EPS sont en contact avec un matériau différent tel que le sol, le béton, le PVC, la géo-membrane ou l'acier. La compréhension du comportement de ces interfaces est essentielle pour évaluer la stabilité et la durabilité de la structure globale contenant les blocs EPS.

II.8.2.1 Interface EPS/EPS

L'analyse de stabilité interne des remblais routiers en géomousse comprend le glissement hydrostatique, la transition due au vent et la stabilité sismique[111]. La résistance au cisaillement disponible entre les blocs de géomousse doit être évaluée pour la stabilité sismique. Le frottement d'interface EPS/EPS a été étudié par un certain nombre de chercheurs [112, 113]. En particulier, un effet important sur la résistance de cisaillement d'interface EPS/EPS est la douceur de la surface EPS. Bien qu'il n'y ait pas de méthode standard pour les tests d'interface EPS/EPS, les procédures typiques qui ont été utilisées consistent à placer deux morceaux d'EPS en contact le long d'une seule surface horizontale ce qui est similaire aux tests de cisaillement direct (ASTM D 5321) dans les sols et les tests géosynthétiques[114]. En effet, l'analyse de la stabilité interne des remblais routiers en géomousse implique diverses considérations, notamment le glissement hydrostatique, la transition due au vent et la stabilité sismique. Pour garantir la stabilité sismique, il est nécessaire d'évaluer la résistance au cisaillement entre les blocs de géomousse. La douceur de la surface EPS a un effet significatif sur la résistance de cisaillement d'interface EPS/EPS.

La résistance au cisaillement de l'interface EPS/EPS peut être décrite par l'équation classique de Mohr Coulomb suivante :

$$\tau = \sigma_n * \mu = \sigma_n * \tan(\delta) \dots\dots\dots(8)$$

Dans cette équation, (τ) représente la résistance au cisaillement de l'interface, (σ_n) est la contrainte normale appliquée sur l'interface, (μ) est le coefficient de frottement et (δ) est l'angle de frottement de l'interface EPS/EPS.

Les données disponibles ne montrent pas de diminution de la résistance après l'obtention du pic de cisaillement, et donc un angle de frottement résiduel pour l'interface EPS/EPS n'est pas signalé. Les valeurs de coefficient de frottement rapportées se situent généralement dans une plage allant de 0,5 à 0,7, avec une valeur moyenne de 0,64. Les valeurs correspondantes de l'angle de frottement, δ , se situent entre 27 et 35 degrés, selon une étude menée au Japon. La norme ASTM D 5321 permet l'utilisation d'autres dispositifs de cisaillement direct (ASTM D

3080 [97]. pour les essais de cisaillement géosynthétique, à condition que le dispositif donne des résultats similaires à ceux obtenus avec la boîte de cisaillement direct à grande échelle.

Différentes valeurs de coefficients de cisaillement de l'interface EPS/EPS ont été proposées dans la littérature, avec une recommandation de 0,7 par le Norwegian Road Research Laboratory et une suggestion de 0,5 par l'UK Transportation Research Laboratory [115]. Les coefficients de frottement d'interface mesurés se situent généralement entre 0,2 et 0,4, et l'humidité de surface, la densité de la mousse géothermique et le niveau de contrainte ont un effet négligeable sur les caractéristiques de l'interface EPS/EPS. Cependant, la croissance de la contrainte normale et la décroissance de la densité entraînent une augmentation des coefficients de frottement maximal. La présence d'eau a été signalée pour diminuer significativement la résistance au cisaillement de l'interface EPS/EPS et le facteur de cisaillement pour toutes les densités de géomousse EPS a montré une tendance décroissante à mesure que la contrainte normale augmente. [116].

II.8.2.2. Interfaces EPS/matériaux dissemblables

Les matériaux différents peuvent être utilisés à deux endroits dans le remblai, notamment entre le système de chaussée et les blocs EPS et entre les blocs EPS et le sol de fondation naturel. Pour la couche de séparation entre le système de chaussée et les blocs EPS, plusieurs matériaux sont utilisés, tels que le géotextile, la géo-membrane, la dalle PCC, la géogrille, la géo-cellule avec du sol, le remblai PCC, le ciment de sol et les matériaux stabilisés pouzzolaniques. Pour la couche de séparation entre les blocs EPS et le sol de fondation naturel, des matériaux granulaires tels que le sable et les géotextiles sont souvent utilisés [92].

Une étude publiée, indique que l'angle de frottement de cisaillement d'interface EPS/sable est identique à l'angle de frottement interne (ϕ) du sable, qui varie entre 27 et 33 degrés [117]. D'autre part, le coefficient de frottement entre les blocs EPS et le sol est d'environ 0,5 ($\delta=27$ degrés), cependant, le type de sol n'a pas été indiqué. Il convient de noter que le choix des matériaux pour la couche de séparation dépend du type de sol, de l'environnement et des charges prévues sur le système de chaussée [118].

Lorsqu'on utilise un remblai en géomousse de blocs EPS sur des sols mous, il est important de prendre en compte le risque de glissement dans le sol meuble. Selon les recommandations du NCHRP 2011 basées sur les données et les interprétations, les valeurs recommandées pour l'angle de frottement d'interface sont de 30, 25 et 52 degrés pour EPS/EPS, EPS/géotextile et EPS/géo-membrane, respectivement. De plus, selon les résultats rapportés, un angle de friction d'interface de 30 degrés peut être utilisé pour une interface EPS/sable [119]. Les tests de cisaillement sur les monoblocs en géomousse ont montré que l'augmentation de la densité entraîne une augmentation de la cohésion du matériau, qui est associée à une diminution de l'angle de friction interne. Il a également été constaté que la majeure partie de la résistance d'interface se développe à de petits déplacements. Pour l'interface Géomousse-PVC, l'adhérence et l'angle de frottement de l'interface ont légèrement augmenté avec l'augmentation de la densité de l'EPS. Enfin, la résistance mesurée à l'interface Géomousse-sable a révélé une augmentation constante de l'angle de frottement de l'interface à mesure que la densité de l'EPS augmente.

Pour calculer la résistance au cisaillement à l'interface entre la géomousse EPS et d'autres matériaux, la théorie de Mohr-Coulomb modifiée peut être utilisée, comme précédemment mentionné dans l'équation (7). Cependant, il est important de noter que l'angle de frottement varie pour différents matériaux et par conséquent, il est recommandé que le concepteur utilise la procédure d'essai ASTM D5321 pour déterminer l'angle de frottement.

Tableau II.5 : Valeurs de coefficient de frottement par cisaillement directe renforcé

Référence	Taille du test/échantillon (mm × mm)	Densité d'échantillon (Kg/m ³)	Interface	Coefficient de frottement
Sheeley and Negussey	Cisaillement directe (100*100*25)	-	Geofoam – béton coulé sur place	2.36 (pic) 1 (résiduel)
			Geofoam–géomembrane lisse	0.7 (pic) 0.4 (résiduel)
Chrysikos et al.	Cisaillement directe	-	Geofoam-autres matériaux (c.-à-d., sols, géotextiles, géomembranes, préfabriqué et coulé sur place béton)	0.27 – 1.2
Padade and Mandal	Cisaillement directe (300*300*75)	15	Géomousse–géotextile	0.17
			Géomousse–géogrille	0.14
			Geofoam–cendres volantes	0.21
		30	Géomousse–géotextile	0.19
			Géomousse–géogrille	0.12
			Geofoam–cendres volantes	0.23
AbdelSalam and Azzam	Cisaillement directe (100*100*50)	-	Geofoam–béton lisse (sec)	0.49
			Geofoam–béton lisse (humide)	0.51
		-	Geofoam–béton rugueux (sec)	0.96
			Geofoam/béton rugueux (h)	0.48

II.9. Tension et flexion

Suite aux études menées par ASTM C 578-95 et BASF, il est courant d'utiliser les tests de résistance à la flexion comme méthode de contrôle qualité dans les usines de fabrication de géo-mousse EPS[120]. Ces tests consistent à déterminer la contrainte maximale que le matériau peut supporter avant de se rompre, en supposant que le matériau est élastique linéaire jusqu'à la rupture. Bien que cette hypothèse ne soit pas parfaitement précise, les valeurs calculées sont largement utilisées pour garantir la qualité du matériau. Il convient de noter que le matériau se rompt en tension lorsqu'une fissure apparaît sur le côté sous tension au moment de la rupture.

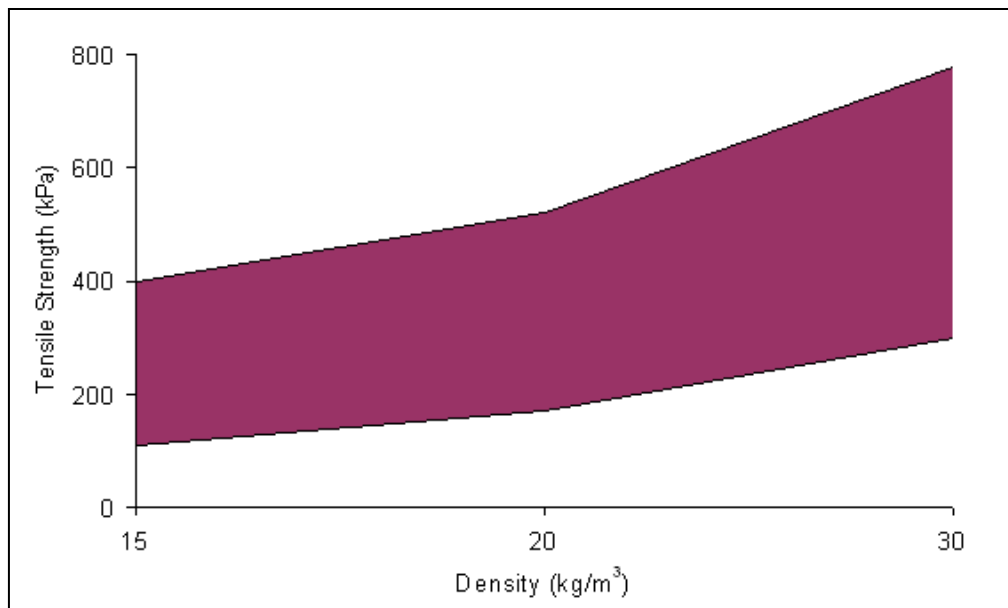


Figure II.9 : Résistance à la traction de l'EPS Géomousse[120]

D'après les recherches menées par ASTM C 578-95 et BASF, la résistance à la flexion augmente avec la densité du matériau. En examinant la figure II.9, on peut constater que les valeurs de la résistance à la flexion sont presque identiques à celles de la résistance à la traction, car le mode de rupture est la tension dans les points extérieurs.

Conclusion

Le polystyrène expansé (EPS) est utilisé comme matériau de remblai léger dans de nombreux projets d'ingénierie géotechnique depuis les années 1960. La conception de ces projets nécessite une bonne compréhension du comportement de compression confinée et non confinée ainsi que de la résistance au cisaillement de l'interface. Les propriétés mécaniques de la géomousse, en particulier en termes de compression et de cisaillement d'interface, sont importantes pour la conception des projets utilisant cette technique. Les méthodes modernes d'analyse et de conception des remblais en polystyrène expansé sont basées sur des déformations explicites de la masse de la géomousse, ce qui rend le comportement mécanique global sous les efforts de compression une propriété essentielle à considérer.

CHAPITRE III

Principes et méthodologies de conception et de construction

PRINCIPES ET METHODOLOGIES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION

III.1. Introduction

Jusqu'à présent, les blocs géomousse ont principalement été utilisés comme matériau de remblai léger dans la construction de routes et géotechnique [121]. Ils ont également été employés dans des projets liés aux chemins de fer [122], aux aéroports et à d'autres projets de construction. Les blocs sont souvent utilisés pour réduire la charge de construction sur des sols meubles afin d'améliorer la stabilité et éviter les tassements différentiels entre les structures routières existantes et nouvelles lors de l'élargissement de routes.

En général, la structure de la chaussée au-dessus des blocs géomousse consiste en une dalle en béton peu armé d'une épaisseur de 10 à 15 cm avec une couche d'appui minimale d'environ 35 cm au-dessus, surmontée d'une couche de roulement en asphalte. Toutefois, si la charge sur les blocs géomousse n'est pas critique, une structure de chaussée normale peut être utilisée, mais une membrane est généralement ajoutée au-dessus des blocs géomousse pour assurer une protection et renforcement supplémentaire. Il est important de noter que l'utilisation de blocs géomousse peut offrir des avantages considérables en termes de réduction de la charge de construction et d'amélioration de la stabilité, en particulier sur les sols meubles. Cependant, il est important de suivre les bonnes pratiques en matière de construction et de respecter les normes de qualité pour assurer la sécurité et la durabilité des projets de construction.

En utilisant les propriétés bien connues du matériau EPS pour le transport de charges, il est possible d'utiliser des procédures de conception normales pour sélectionner la qualité de matériau EPS appropriée pour un projet donné. Pour les remblais routiers, une résistance à la compression de $R_c = 100$ kPa, correspondant à une densité d'environ $\rho = 20$ kg/m³, sera généralement suffisante. Toutefois, selon la situation de charge spécifique, d'autres qualités de matériaux peuvent être nécessaires.

III.2 Lignes directrices d'application et spécifications

III.2.1. NPRA (l'Administration Norvégienne des Routes Publiques)

La résistance à la compression du matériau EPS est une propriété importante qui doit être soigneusement évaluée pour garantir la qualité et la sécurité des projets de remblai léger utilisant des blocs de polystyrène expansé. Dans ce contexte, l'administration norvégienne des routes publiques (NPRA) a pris une décision importante en spécifiant la déformation de référence de 5 % lors du test de compression non confiné des cubes de 50 mm. Cette décision permet de déterminer avec précision la résistance du matériau EPS lorsqu'il est soumis à une compression, en prenant en compte la déformation résultante.

Cela permet également d'assurer que les blocs de polystyrène expansé utilisés dans les projets de remblai léger répondent aux normes de qualité et de sécurité les plus élevées[123].

III.2.2 L'Organisation de Développement de la Méthode d'EPS (EDO Japon)

L'organisation de développement de la méthode EPS (EDO) a été créée au Japon, dans le but de promouvoir le développement technique et l'application de la méthode géomousse EPS. Dans le cadre de leurs travaux, l'EDO a établi des critères de performance pour les blocs de polystyrène expansé (EPS). Ainsi, le niveau de contrainte admissible dans la méthode EDO est fixé à 50 % de la résistance à la compression à 10 % de déformation axiale. Ces critères sont régulièrement mis à jour pour garantir la qualité et la sécurité des remblais en géomousse EPS. L'EDO a également travaillé à la sensibilisation des professionnels du génie civil à l'utilisation de la géomousse EPS et a développé des lignes directrices pour la conception et l'installation de cette méthode de remblai léger [124].

Tableau III.1. Poids unitaire et résistance à la compression pour EDO géomousse [124]

Type	EPS expansé				XPS extrudé			
	D30	D25	D20	D16	D12	DX35	DX29	DX24H
Poids unitaire (KN/m ³)	0.30	0.25	0.20	0.16	0.12	0.35	0.29	0.24
Contrainte de compression admissible (KN/m ²)	90	70	50	35	20	200	140	100
Contrainte de compression pour QC (KN/m ²) à 10% déformation.	180	140	100	70	40	400	280	200

III.2.3 Normes Européennes (UE)

Au sein de l'Union européenne (UE), une norme EN 14933 "Produits d'isolation thermique et de remplissage légers pour les applications de génie civil. Produits manufacturés en polystyrène expansé (EPS) - Spécification" est entrée en vigueur en 2008 [125]. Cette norme définit la résistance du matériau EPS à une déformation de 10 % testée sur des cubes de 50mm, tout en ajoutant des exigences pour les déformations à 2 % et 5 %. Cependant, il convient de noter que dans les normes européennes, la valeur ($\sigma_{10\%}$) n'est utilisée que pour classer les produits EPS et pour obtenir des résultats d'essais reproductibles et répétables à des fins de contrôle de la production en usine. Les exigences pour les déformations à 2 % et 5 % sont utiles pour les applications de génie civil, car elles reflètent mieux les conditions de service réelles auxquelles les remblais en EPS sont soumis. En outre, cette norme garantit que les produits EPS répondent aux exigences de qualité et de performance pour les applications de génie civil dans toute l'UE.

En ce qui concerne la déformation par fluage due à la charge permanente, il est recommandé que la géomousse EPS ait une déformation par fluage en compression de 2 % ou moins après 50 ans lorsqu'elle est soumise à une contrainte de compression permanente inférieure à 30 % de la résistance à la compression à 10 % de déformation axiale ($\sigma_{10\%}$).

Par exemple, pour EPS100, la valeur de conception pour la résistance à la compression permanente est de $0,30 * \sigma_{10\%}$, soit 30 % de $\sigma_{10\%}$. Cependant, il convient de noter que cette

valeur de conception pour les applications permanentes, ($\sigma_{10\%}$) permanente, est également divisée par le facteur de sécurité de 1,25, de sorte que la valeur de conception ($\sigma_{10\%perm}$) pour EPS100 est de $0,3 * 100/1,25$ ou 24 kPa. En ce qui concerne les charges cycliques telles que le trafic, des chercheurs européens ont conclu que si la charge permanente au sommet est relativement légère (c'est-à-dire 15 kN/m²), et si la déformation verticale sous une charge cyclique reste inférieure à 0,4 %, alors la déformation résultante de l'EPS sera élastique et il n'y aura pas de déformation permanente. En termes de contrainte verticale, la valeur de sécurité maximale due au chargement cyclique est de $0,35 * \sigma_{10\%}$. Ainsi, la résistance à la compression de conception d'EPS100 sous une charge cyclique ($\sigma_{10\%cycl}$) est de $0,35 * \sigma_{10\%} / 1,25$, soit 28 kPa.

Dans le but d'uniformiser les exigences de la norme EN 14933 avec d'autres normes CEN et Eurocodes, les fabricants européens de polystyrène expansé (EUMEPS) ont mis en place un groupe de travail spécial chargé d'étudier cette question. Bien que ces efforts soient encourageants au sein de l'UE, la plupart des pays en dehors de l'Europe continuent de se conformer à leurs propres normes nationales, tandis que certains adoptent également la norme européenne.

III.2.4. Autres Spécifications

La norme NF T 56-201 offre une classification détaillée pour le polystyrène expansé en treize références, chacune ayant des caractéristiques spécifiques présentées dans le tableau III.2. Cette norme est importante pour les professionnels de l'industrie de la construction, car elle fournit un guide pour sélectionner la référence de polystyrène expansé la mieux adaptée à un projet donné. En effet, chaque référence possède des propriétés physiques distinctes, telles que la densité, la résistance à la compression et la conductivité thermique, qui influencent directement son application et ses performances dans le temps. D'autre part, la norme ASTM D6817 établit des exigences de propriétés physiques pour la géomousse EPS utilisée comme matériau de construction. Cette norme est largement reconnue à l'échelle internationale et fournit une référence commune pour les professionnels de l'industrie de la construction. Le tableau III.3 récapitule les exigences de propriétés physiques de la géomousse EPS selon la norme ASTM D6817, notamment la résistance à la compression, la densité, la conductivité thermique, la stabilité dimensionnelle, l'absorption d'eau et la résistance à la vapeur d'eau[126, 127].

En suivant les normes NF T 56-201 et ASTM D6817, les professionnels de la construction peuvent sélectionner la référence de polystyrène expansé EPS ayant les propriétés physiques les mieux adaptées à leurs besoins spécifiques, tout en garantissant des performances optimales à long terme. Cela permet également de garantir la conformité aux exigences réglementaires et de sécurité en vigueur dans l'industrie de la construction.

Tableau III.2 : Qualité du polystyrène produit en France selon “NF T 56.201”

Référence	AM	BM	CM	DM	Pour les remblais routiers		GM
					EM	FM	
Contrainte (KPa) à 10% de def	/	30	50	70	90	140	190
Masse volumique (Kg/m ³)	7	10	13	15	19	24	29

Tableau III.3 : Propriétés physiques requises du polystyrène géomousse ASTM D6817

TYPE	EPS12	EPS15	EPS19	EPS22	EPS29	EPS39	EPS46
Masse volumique Kg/m3	11.2	14.4	18.4	21.6	28.8	38.4	45.7
Rc (KPa) à 1% de def	15	25	40	50	75	103	128
Rc (KPa) à 5% de def	35	55	90	115	170	241	300
Rc (KPa) à 10% de def	40	70	110	135	200	276	345
Resistance à la flexion(KPa)	69	172	207	240	345	414	517
indice d'oxygène (%)	24	24	24	24	24	24	24

Des recherches ont recommandé de limiter la contrainte de service due à la charge permanente (poids du matériau sus-jacent) à 30 % de la résistance à la compression pour la géomousse de type VIII (équivalent à une masse volumique de 18 kg/m³ pour l'EPS) [128]. Ils ont également préconisé une marge de sécurité supplémentaire de 10 % de la résistance à la compression pour prendre en compte les charges de trafic en direct. Ainsi, pour une déformation axiale de 10 %, la combinaison de la charge permanente et de la surcharge ne doit pas dépasser 40 % de la résistance à la compression, soit environ 40 kPa. En respectant ces limites, il est possible de prévenir toute déformation permanente excessive du bloc d'EPS à long terme et de garantir la durabilité du matériau. Par ailleurs, Bartlett et Farnsworth en 2004, ont souligné l'importance de limiter les contraintes de compression causées par les charges permanentes et d'exploitation pour prévenir les dommages et la déformation par fluage à long terme du remblai en géomousse. Ils ont noté que les méthodes actuelles d'évaluation de la contrainte admissible dans le remblai EPS sont basées sur les directives de conception du Japon, de l'Europe et des États-Unis [129]. En suivant ces directives, il est possible de limiter les contraintes à des niveaux acceptables pour assurer la durabilité du remblai en géomousse.

Les résultats d'une étude à long terme menée sur le terrain par Negussey et Stuedlein (2003) lors de la reconstruction de l'autoroute I-15 ont démontré que les tassements par fluage étaient restés en dessous de la limite de déformation post-construction de 1 % sur une période de 50 ans [130].

Les blocs EPS installés sur le projet I-15 avaient des dimensions de 0,8 m de hauteur sur 1,2 m de largeur et 4,9 m de longueur. La conception globale avait pris en compte la résistance à la compression nominale à 10 % de déformation pour la géomousse de type VIII conformément à la norme ASTM-C-578-95. À une contrainte de compression de 10 %, la résistance à la compression variait entre 100 et 122 kPa, comme cela a été confirmé sur des échantillons de cubes de 50 mm. De plus, les modules de Young initiaux, déterminés à partir de ces mêmes essais de compression, se situaient entre 2,9 MPa et 5,1 MPa [18]. Ces résultats soulignent la résilience et la durabilité de la géomousse EPS dans des conditions réelles d'utilisation, et confirment l'importance de suivre les directives de conception appropriées pour assurer une performance optimale.

Tableau III.4. Propriétés typiques d'EPS [129]

Propriété mécanique	Norme d'essai ASTM	valeur acceptée de type VIII	valeur acceptée de type II	Tolérance
Masse volumique	D1622	18Kg/m ³	22Kg/m ³	±10%
Résistance à la compression	D1621	90 KN/m ²	104 KN/m ²	Minimum et rendement ou 10 % def axiale
Résistance à la flexion	C203	208 KN/m ²	276 KN/m ²	Minimum
Absorption d'eau	C272	3	3	<% par volume

III.3. Considérations de conception et construction

Le principal défi de la stabilité interne des remblais en géomousse à blocs EPS réside dans leur capacité portante. Afin d'analyser la capacité portante, il est nécessaire de choisir un type d'EPS doté des propriétés appropriées pour supporter le système de chaussée sus-jacent et les charges de trafic sans subir une compression excessive, qui pourrait causer un tassement excessif de la surface de la chaussée, comme illustré dans la figure III.1. Ainsi, pour garantir une performance adéquate des blocs EPS, trois objectifs de conception doivent être atteints. Tout d'abord, les déformations initiales (immédiates) sous les charges permanentes ou de gravité du système de chaussée doivent être dans des limites acceptables. Ensuite, les déformations de fluage à long terme (pour la durée de vie du remblai) sous la même gravité doivent également se situer dans des limites acceptables. Enfin, les déformations non élastiques ou irréversibles sous des charges de trafic répétitives doivent être maintenues dans des limites acceptables [131].

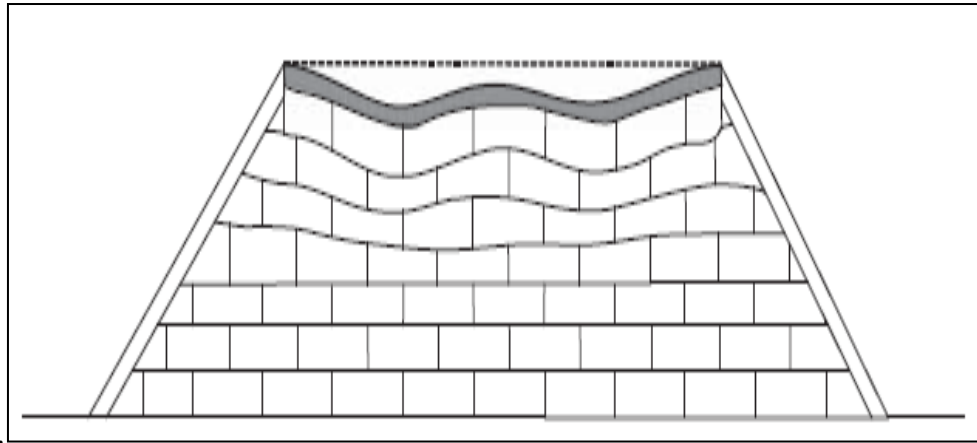


Figure III.1. Défaillance portante des blocs EPS entraînant une déformation excessive

L'un des avantages d'une procédure de conception basée sur la déformation est que le calcul des contraintes appliquées à divers endroits dans la masse EPS permet de sélectionner explicitement des blocs EPS avec des valeurs de contrainte limite élastique supérieures aux contraintes appliquées anticipées. Cela peut aider à éviter toute déformation excessive ou tout tassement inacceptable qui pourrait affecter la performance globale du système de chaussée ou d'autres structures. En utilisant une méthode de conception basée sur la déformation, il est également possible de prendre en compte la variabilité de la densité et de la qualité du matériau EPS, ainsi que les conditions environnementales tels que la température et l'humidité. Cela permet une conception plus précise et plus fiable du système de remblai en géomousse, ce qui peut entraîner une amélioration significative de la durabilité et de la performance à long terme.

III.3.1. La capacité portante

La capacité portante de la géomousse EPS est un paramètre essentiel qui doit être pris en compte lors de la conception des structures de chaussée. Si la géomousse EPS ne peut pas supporter la charge appliquée, cela peut entraîner des tassements verticaux excessifs dans le système de chaussée, ainsi que des dommages aux propriétés environnantes. Pour calculer la capacité portante ultime de l'EPS, l'équation "10" de Terzaghi peut être utilisée, qui prend en compte les facteurs de capacité portante, tels que la cohésion et le poids unitaire du sol. Les valeurs de la largeur inférieure du remblai et de la profondeur d'encastrement doivent également être considérées [132, 133].

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_f N_q + \gamma B_w N_\gamma \dots \dots \dots (10)$$

Où ,Cest le paramètre de résistance au cisaillement de Mohr-Coulomb appelé cohésion en kN/m^2 . N_c , N_q , N_γ sont des facteurs de capacité portante de Terzaghi. (γ) est le poids unitaire en kN/m^3 , B_w est la largeur inférieure du remblai en m, et (D_f) la profondeur de l'encastrement en (m).

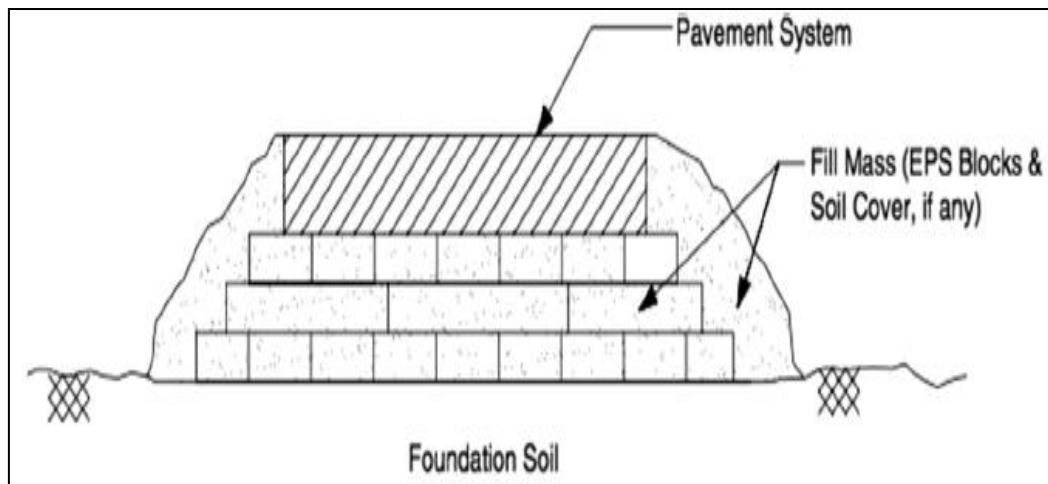


Figure III.2 : Principaux composants d'un remblai en bloc EPS

L'équation (10) peut être simplifiée en utilisant l'approximation courante que la cohésion interne (c) peut être assimilée à la résistance au cisaillement non drainé (S_u) pour les sols cohésifs saturés sur lesquels les blocs de géomousse EPS sont généralement placés. De plus, cette simplification est possible lorsque la longueur d'un remblai est nettement supérieure à sa largeur, ce qui est généralement le cas dans les applications de chaussée. Ainsi, l'équation simplifiée pour la capacité portante ultime de l'EPS peut être exprimée comme suit :

$$Q_{ult} = S_u N_c \dots \dots \dots (11)$$

Où

N_c représente les facteurs de capacité portante de Terzaghi. Selon cette méthode, tels que $N_c = (1 + 0.2 \cdot B_w / L) = 5$ pour un rapport poids corporel (pression verticale) de 1 kPa et une longueur infinie de la semelle filante. La capacité portante ultime du sol est notée q_{ult} (en kPa), et S_u représente la résistance au cisaillement non drainé (en kPa).

En supposant, que le remblai EPS est une semelle filante, c'est-à-dire que la largeur inférieure du remblai est négligeable par rapport à sa longueur, on peut simplifier Eq. (10) en Éq. (11) peut encore être simplifié si le remblai EPS est considéré comme une semelle filante, c'est-à-dire que la largeur inférieure du remblai (B_w) est considérée comme négligeable par rapport à la longueur du remblai (L). Cette hypothèse peut être faite si le remblai est suffisamment long. En appliquant cette hypothèse, le rapport B_w / L peut être considéré comme étant égal à 0. Ainsi, l'équation (11) peut être simplifiée en l'équation (12) suivante :

$$q_{ult} = S_u * 5 \dots \dots \dots (12)$$

Une procédure de conception basée sur la déformation offre l'avantage de sélectionner une densité d'EPS qui assure une capacité de charge suffisante tout en maintenant des tassements tolérables, sans nécessiter une densité excessive. Cette méthode permet d'utiliser des blocs de

densité différente en fonction de la profondeur sous la chaussée et des pentes latérales, étant donné que la contrainte verticale diminue avec la profondeur. Ainsi, des blocs de densité plus faible peuvent être utilisés à de plus grandes profondeurs et/ou sous les pentes latérales, tandis que des blocs de densité plus élevée peuvent être utilisés directement sous le système de chaussée, offrant une capacité de charge optimale [134].

Les blocs de géomousse EPS peuvent être utilisés à des fins de stabilisation sur des terrains sujets aux glissements et pour réduire les ruptures dans les zones de pente instable en remplaçant une partie du sol naturel dense par des blocs de géomousse, la force motrice peut être réduite [135, 136]. De plus, les blocs de géomousse peuvent être utilisés comme fondation de compensation pour les bâtiments, ce qui réduit la charge sur les sols compressibles sous-jacents et limite le tassement des bâtiments. En conséquence, les problèmes potentiels de capacité portante peuvent être résolus.

III.3.2. Flottabilité

Lors de la conception, il est important de prendre en compte les effets potentiels des eaux souterraines sur les blocs EPS, étant donné que la géomousse EPS est extrêmement légère et possède une structure à cellules fermées, la rendant susceptible de flotter en présence d'eau. Il convient de noter que l'absorption d'eau par les blocs EPS au fil du temps n'affecte pas significativement leur flottabilité. Afin d'éviter ce problème, il est essentiel d'appliquer des contraintes de charge permanentes adéquates sur les blocs EPS afin de prévenir les forces de soulèvement potentielles[137]. Cependant, il est également nécessaire de prendre en compte la possibilité d'une augmentation de la nappe phréatique en raison d'un drainage inadéquat lors de la conception.

Des études ont été menées en Turquie pour évaluer le comportement des blocs de géomousse à l'aide d'expériences de pente physique à grande échelle[138]. Les résultats de ces études ont montré qu'un assemblage de blocs de géomousse, appelé configuration de type remblai, peut être utilisé pour empêcher les ruptures profondes des pentes sableuses marginalement stables soumises aux infiltrations et au glissement hydrostatique le long de la base de l'assemblage de blocs de géomousse. Cette configuration consiste en une pente arrière qui applique un mort-terrain le long de l'assemblage de blocs de géomousse à l'intérieur de la pente (Figure III.3) [139]. D'autres études ont également montrées que l'utilisation de blocs de géomousse avec un système de drainage interne peut encore améliorer les performances des pentes sous infiltration[140].

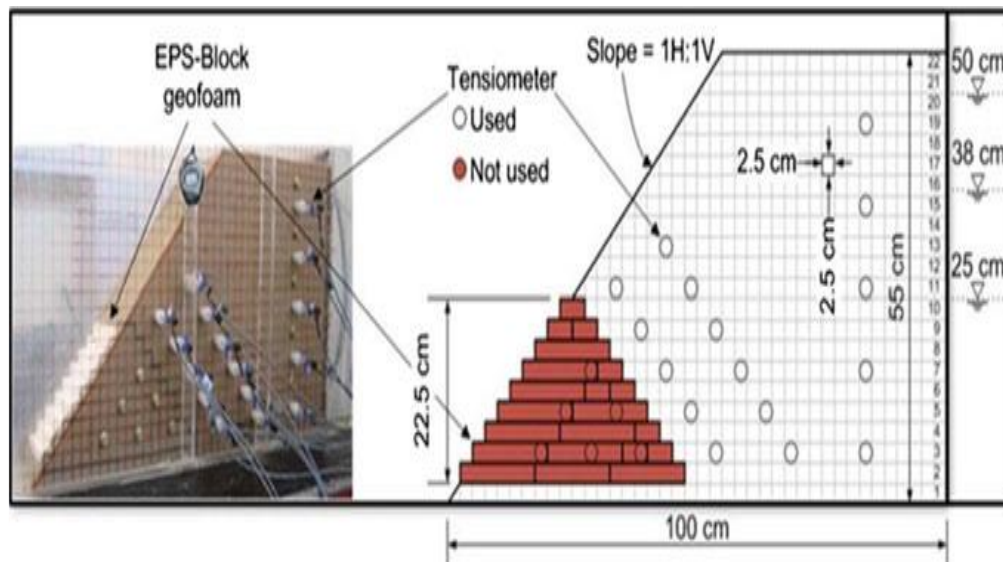


Figure III.3. Configuration du bloc de géomousse de type remblai [139]

Lors de la conception, il est important de prendre en compte les effets potentiels des eaux souterraines sur les blocs EPS, car ceux-ci peuvent devenir flottants en fonction du niveau d'eau et du poids de la structure de la chaussée au-dessus des blocs. Il est donc recommandé d'appliquer un facteur de sécurité suffisant contre le soulèvement. Généralement, les blocs EPS sont placés dans un état drainé au-dessus du niveau de la nappe phréatique.

Pour les calculs de flottabilité, une masse volumique de $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ doit être utilisée pour le matériau des blocs EPS, et le facteur de sécurité correspondant contre le soulèvement doit être de 1,3, basé sur le plus haut niveau d'eau probable avec une période de retour de 200 ans. Le facteur de sécurité est calculé en divisant le poids total du remblai par la force de soulèvement qui se produit. Comme les blocs EPS sont des corps fermés, seulement de petites quantités d'eau peuvent y pénétrer lorsqu'ils sont submergés. Par conséquent, la force de flottabilité par unité de volume peut être calculée en soustrayant la densité d'eau de la densité de l'EPS par unité de volume.

$$E_{op} = \gamma_{EPS} - \gamma_w = 0.2 - 9.8 = -9.6 \text{ KN/m}^3 \dots \dots \dots (13)$$

III.3.3 Chargement sismique

La charge sismique doit être prise en compte lors de la conception des systèmes de chaussée pour éviter les problèmes géotechniques tels que la liquéfaction sismique et le tassement qui peuvent survenir en cas de secousses sismiques. C'est important car les charges sismiques peuvent affecter à la fois la stabilité interne et externe des remblais routiers. Il convient de noter que les considérations relatives aux charges sismiques pour la conception des remblais EPS sont similaires à celles des remblais construits à partir d'autres matériaux terrestres. De plus, il a été découvert que le risque de chargement sismique dépend du site, de la nature et de l'épaisseur du sol naturel au sommet du socle rocheux, plutôt que du matériau utilisé au

sommet des blocs EPS [141]. Depuis le début, il y avait des préoccupations concernant le comportement et la stabilité des remblais en bloc d'EPS soumis aux charges sismiques. Ce problème a été étudié en détail, à la fois sur le plan théorique et expérimental à petite et grande échelle. La figure III.4 ci-dessous montre une configuration de test d'une table vibrante à échelle réduite utilisée dans une étude au Japon [142]. Il est important de noter que les considérations pour les charges sismiques lors de la conception des remblais en bloc d'EPS sont à peu près les mêmes que celles pour les remblais construits à partir d'autres matériaux terrestres. En outre, il a été découvert que le risque de chargement sismique dépend du site, de la nature et de l'épaisseur du sol naturel au sommet du socle rocheux, plutôt que du matériau utilisé au sommet des blocs EPS.

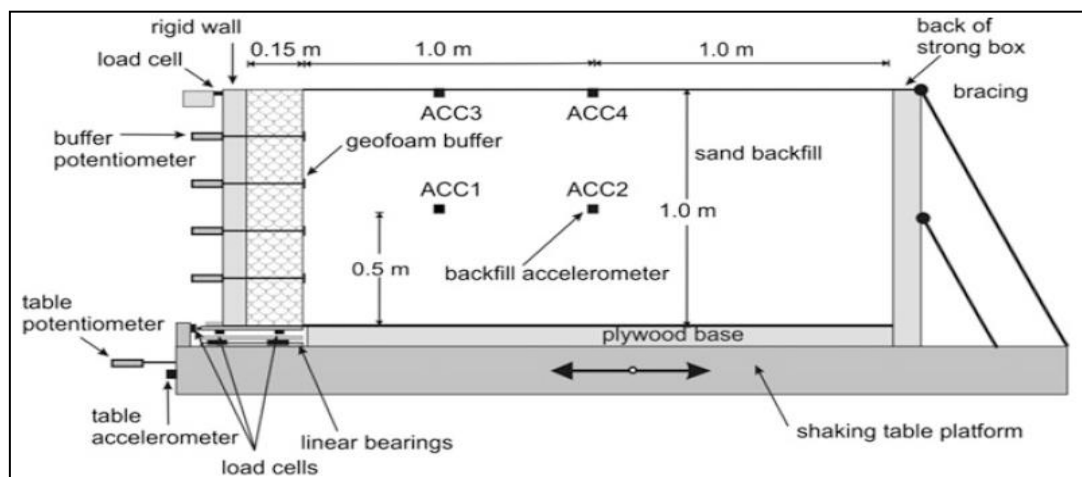


Figure III.4 Configuration de test (table vibrante) sur structure en blocs de géomousse [142]

De manière générale, il est admis que le matériau EPS a un effet positif sur la stabilité des structures lors de charges sismiques. Au Japon, aucune considération spéciale de conception sismique n'est requise pour les remblais d'une hauteur inférieure à 6 m et d'un rapport hauteur sur largeur inférieur à 0,8. Cependant, pour des remblais plus importants en hauteur, il est recommandé de prendre en compte de telles considérations, similaires à celles appliquées aux remblais en terre. [143]. En ce qui concerne les effets sismiques secondaires tels que les tsunamis, il convient de noter que lors du tremblement de terre de Tohoku en 2011, aucun dommage grave n'a été signalé pour les structures en EPS [144]. Aux États-Unis, l'Utah Transit Authority (UTA) a utilisé des blocs EPS pour construire des remblais d'approche de pont pour ses systèmes de métro léger et de trains de banlieue. Des tests ont montré que les performances de déflexion dynamique de ces systèmes sous charges de trains étaient acceptables et comparables à celles mesurées sur des remblais en terre. En outre, lorsqu'une structure est exposée à des impacts dynamiques tels que de gros rochers, le matériau EPS peut absorber une grande partie de l'énergie dynamique, réduisant ainsi considérablement les charges dynamiques transférées à la structure. Cette méthode a été testée pour la première fois au Japon et peut également être appliquée pour protéger d'autres types de structures contre les impacts dynamiques [145].

III.4. Conception des remblais légers en polystyrène expansé

III.4.1 Considérations relatives à la composition des remblais légers

Un remblai en géomousse- EPS, est composé principalement de trois éléments, comme illustré dans la figure III.5 : le sol de fondation, la masse de remblai proposée et le système de chaussée. Le sol de fondation est placé avant la masse de remblai et peut être amélioré en utilisant différentes techniques. La masse de remblai proposée est constituée de blocs EPS et, parfois, d'une couche de sol de couverture placée entre la base des blocs EPS et le sol de fondation, qui peut également être placée sur les côtés du remblai, selon que le remblai est trapézoïdal ou vertical. Enfin, le système de chaussée est construit au-dessus de la masse EPS et plusieurs recommandations doivent être suivies lors de la conception d'une chaussée en géomousse EPS en ce qui concerne sa composition. Tout d'abord, il est important de fournir un minimum de deux couches de blocs EPS pour éviter tout déplacement des blocs pendant le service, ce qui pourrait entraîner une défaillance de la chaussée. Deuxièmement, la profondeur minimale globale de la masse de remblai EPS doit être d'au moins 1,2 m pour minimiser le risque de givrage différentiel, qui peut endommager la chaussée.

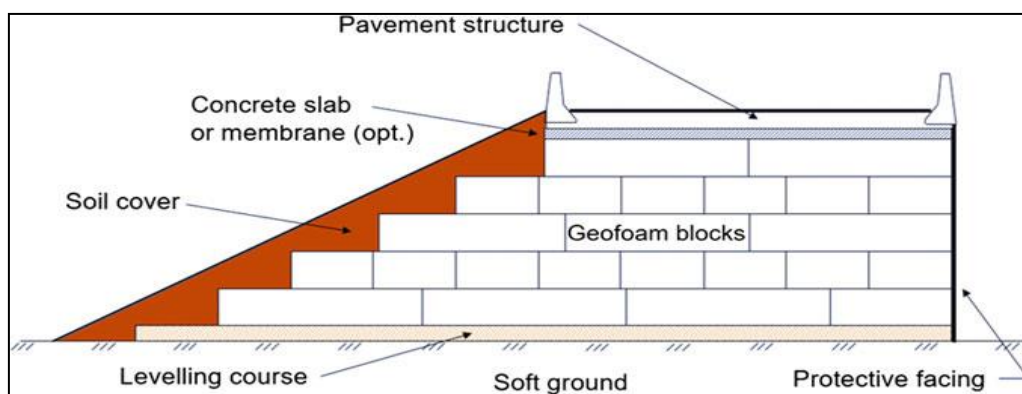


Figure III.5. Coupe transversale d'un remblai de route avec des blocs de géomousse

III.4.2 Investigation pour la conception

Avant d'entamer la conception d'un remblai sur un sol meuble, il est nécessaire de mener certaines enquêtes de fond et de communiquer les résultats pertinents au concepteur du remblai. Les études de base requises pour les projets courants peuvent être classées en études liées aux transports, à l'ingénierie hydraulique, à la structure et à la géotechnique. Le concepteur doit évaluer les problèmes d'ingénierie géotechnique liés à la caractérisation du site, aux critères et considérations de conception, et à l'évaluation des alternatives. Le programme de caractérisation géotechnique du site devrait se concentrer sur quatre domaines clés : la définition de la nature et de la géométrie des couches de sol et de roche appropriées, la définition des variations avec la profondeur de l'historique des contraintes, de la compressibilité et de la résistance au cisaillement des couches de sol meuble dans la zone de construction proposée, la détermination du profil piézométrique à travers toutes les strates de sol pertinentes, y compris les variations saisonnières et autres potentielles de la nappe phréatique, et l'évaluation des problèmes de conception sismique pertinents[146].

III.4.3 Méthodologies de conception

La conception des remblais sur un sol meuble sont basées sur la prévention des défaillances pendant la construction en fournissant une stabilité adéquate et en limitant le tassement post-construction aux quantités souhaitables [147]. L'analogie de maillon de chaîne appliquée à la conception géotechnique de la figure (III.6) est utilisée pour illustrer l'approche de conception générale des remblais sur des fondations problématiques. Le système de conception géotechnique est comparé à chaque lien représentant une étape de conception, par exemple, l'échantillonnage, les tests, l'analyse et l'application de critères tolérables, ancrés à l'expérience antérieure de structures similaires dans la zone du projet. Le point clé de l'analogie est que le système est aussi fort que son maillon le plus faible. S'il y a un lien, ou si l'ancrage est insuffisant, une défaillance peut survenir. Le deuxième point de l'analogie est que si chaque étape de conception ou liaison est réalisée en utilisant les pratiques d'ingénierie géotechnique habituelles, les concepteurs peuvent « construire en toute confiance ou BWC ».

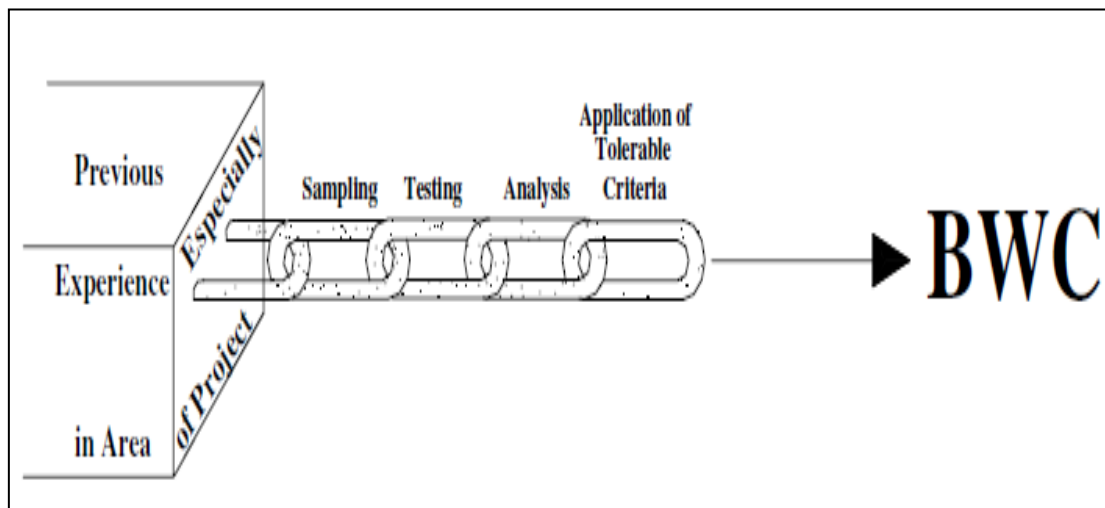


Figure III.6. Système géotechnique (BWC = BuildWithConfidence) [147]

III.4.4. Procédure de conception

La procédure d'évaluation de la capacité portante des blocs EPS pour la stabilité interne se divise en deux parties distinctes. La première partie vise à déterminer les contraintes de trafic et de charge de gravité appliquées par le système de chaussée au sommet des blocs d'EPS. Elle comporte huit étapes, de l'estimation des charges de trafic à la sélection du type de système de chaussée et de la couche de répartition de charge, le cas échéant. La deuxième partie de la procédure a pour but de déterminer les contraintes de charge de trafic et de gravité appliquées à différentes profondeurs dans la masse de remblai du bloc EPS, afin de sélectionner l'EPS approprié à utiliser à ces différentes profondeurs dans le remblai. Elle comporte cinq étapes, de l'estimation des contraintes de trafic à différentes profondeurs dans la masse de remplissage à la sélection du bloc EPS approprié pour satisfaire les contraintes requises à différentes profondeurs dans le remblai. La procédure est décrite en détail dans la directive de conception NCHRP 24–11[148, 149].

III.4.5 Phases de conception du remblai avec des blocs EPS

Lors de la conception pour prévenir la défaillance ou la rupture, le processus global est divisé en trois phases distinctes.

- Tout d'abord, la phase de conception pour la stabilité externe du remblai global consiste à considérer l'interaction entre la masse combinée du remblai et le système de chaussée supérieur avec le sol de fondation existant. Dans le cas des blocs EPS, il est important d'optimiser la conception pour minimiser le volume d'EPS nécessaire tout en répondant aux critères de tassement et de stabilité. Par conséquent, les blocs EPS ne sont pas obligés de s'étendre sur toute la hauteur verticale entre le sol de fondation et le système de chaussée.
- Ensuite, la phase de conception pour la stabilité interne dans la masse du remblai implique la sélection et la spécification appropriées des propriétés d'EPS afin que les blocs puissent soutenir le système de chaussée sans subir une compression excessive immédiate ou à long terme (fluage). Cela est essentiel pour répondre aux critères de service de la structure de la chaussée.
- Enfin, la phase de conception d'un système de chaussée approprié pour la plate-forme fournie par les blocs EPS sous-jacents est importante pour éviter les défaillances prématurées telles que l'orniérage, la fissuration ou d'autres formes de dégradation. Il est essentiel de spécifier les propriétés d'EPS adéquates afin que les blocs puissent supporter le système de chaussée sans subir une compression excessive immédiate ou à long terme (fluage), qui pourrait entraîner un tassement excessif de la surface de la chaussée. Un tassement excessif peut entraîner une dégradation prématurée de la chaussée, ce qui peut avoir des implications sur la sécurité des usagers de la route et entraîner des coûts élevés de réparation pour les gestionnaires de la route.

Pour les charges de conception, pour un remblai en géomousse de blocs EPS sur un sol meuble, plusieurs types de charges doivent être considérées, telles que les charges de gravité, de circulation, d'eau, de séisme et de vent.

Les pires charges attendues sont généralement utilisées pour les calculs de l'état limite ultime, tandis que les charges attendues typiques ou moyennes sont utilisées pour les calculs de l'état limite de service. Il convient de noter que la charge utilisée pour représenter la pire charge attendue peut varier selon le mécanisme de rupture analysé. Par exemple, le poids unitaire sec est utilisé comme la pire charge attendue pour la conception contre le soulèvement hydrostatique, la translation due à l'eau et la stabilité sismique. Cependant, pour la conception contre la défaillance de la capacité portante, la stabilité de la pente et la charge de l'EPS, la pire charge morte attendue est la plus grande charge morte attendue, qui peut être un poids unitaire plus élevé prenant en compte l'absorption d'eau potentielle de l'EPS, surtout s'il est immergé en permanence.

En outre, les remblais légers en polystyrène expansé nécessitent une analyse de stabilité prenant en considération les charges gravitaires provenant des composants du système de remblai. Ces composants incluent le poids du système de chaussée sus-jacent, qui peut inclure

une dalle PCC renforcée, ainsi que le poids de la couverture de sol placée sur les côtés d'un remblai incliné ou le poids des éléments de paroi d'un remblai vertical. De plus, le poids effectif net de tout matériau de terre placé entre la surface du sol existant et le fond des blocs EPS doit également être pris en compte dans l'analyse de stabilité.

Il convient de souligner que pour le trafic, les charges exercées par les véhicules sur la surface de la route sont généralement négligeables par rapport aux charges permanentes du système de chaussée, et peuvent donc être ignorées lors des calculs de tassement global et de stabilité. Toutefois, si vous le souhaitez, ces charges peuvent être prises en compte en divisant le poids total d'un véhicule par sa surface au sol pour obtenir une contrainte verticale uniforme équivalente qui peut être incluse dans les calculs. Alternativement, pour modéliser les contraintes de trafic au sommet du remblai, il est possible d'utiliser 0,67 m d'un matériau de surcharge de 18,9 kN/m³. Il convient de noter que la charge du trafic doit être prise en compte lors de l'évaluation de la stabilité interne d'un remblai contenant de la géomousse en blocs EPS, ainsi que pour la conception du système de chaussée selon les recommandations de NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) new york (2004)

III.4.6. Paramètres influençant dans la conception

III.4.6.1L'eau

Lorsque la géomousse en blocs EPS est soumise à une immersion dans l'eau, elle a tendance à flotter en raison de ses espaces vides scellés. Dans les zones où les élévations des eaux souterraines peuvent augmenter considérablement, l'utilisation de la géomousse de blocs EPS seule peut ne pas être possible car le mort-terrain nécessaire pour empêcher la flottaison peut causer un tassement excessif ou une instabilité. Par conséquent, l'intrusion d'eau souterraine et de surface doit être prise en compte lors de la conception des remblais contenant de la géomousse en blocs EPS, et la flottabilité de l'EPS doit être considérée dans les calculs de contrainte verticale nette [150]. Les sites où la géomousse en blocs EPS est généralement utilisée sont souvent caractérisés par des sols meubles et des eaux souterraines à la surface du sol ou à proximité. De plus, ces sites peuvent être proches de masses d'eau de surface telles que les rivières, qui sont soumises à des fluctuations importantes de niveau d'eau en raison de tempêtes et d'inondations, notamment lors des événements extrêmes.

Le niveau d'eau de crue centennale est généralement utilisé pour représenter le niveau d'eau lors d'un événement extrême. Trois problèmes de conception liés à l'eau doivent être pris en compte : tout d'abord, l'augmentation du poids unitaire total de l'EPS en raison de l'absorption d'eau à long terme. Deuxièmement, le potentiel de flottaison en raison d'une élévation imprévue du niveau d'eau normal. Enfin, le glissement horizontal dû à une charge d'eau déséquilibrée à travers le remblai. Il est essentiel de maintenir une désaturation temporaire adéquate pendant la construction pour éviter le soulèvement hydrostatique causé par la montée des eaux souterraines ou l'intrusion d'eau de surface qui peut s'accumuler le long du remblai lors de fortes précipitations. Environ 500 mm de matériau de surcharge de poids normal (sol, chaussée, etc.) sur les blocs EPS sont nécessaires pour contrer les effets de la flottabilité pour chaque mètre d'immersion d'un bloc d'EPS sous l'eau, ou 50 mm de sol ou de chaussée au-dessus des blocs EPS pour chaque 100 mm d'immersion d'un bloc EPS. Ces

considérations doivent être prises en compte lors de la conception et de la construction de remblais contenant de la géomousse en blocs EPS pour assurer leur stabilité et leur durabilité [151].

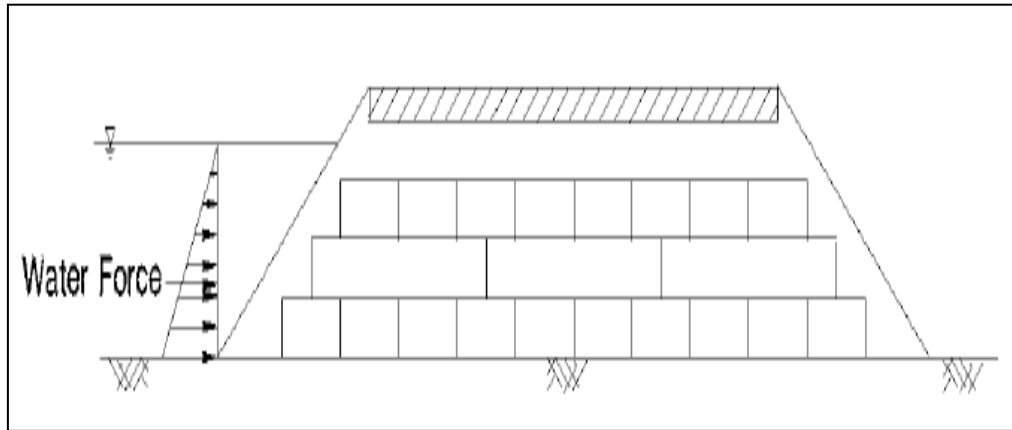


Figure III.7. Force de l'eau déséquilibrée agissant sur le côté d'un remblai en géomousse

III.4.6.2 Sismicité et vent

Les remblais routiers doivent être conçus pour résister aux charges sismiques, qui sont un événement à court terme ayant un impact sur la stabilité externe et interne du remblai contenant de la géomousse en blocs EPS. Pour simuler les charges sismiques sur les pentes, Terzaghia développé l'analyse de stabilité pseudo-statique. Cette analyse consiste à modéliser le tremblement de terre avec une force horizontale permanente appliquée dans une direction donnée sur la pente. La force horizontale (F) est égale à la masse du glissement ou à la masse du glissement vertical (m) multipliée par l'accélération sismique (a), soit $F=m*a$. L'accélération sismique est généralement dérivée en multipliant un coefficient sismique k par la gravité.

Au sujet de l'influence des effets du vent, les blocs de géomousse EPS utilisés comme remblai léger ont une densité très faible, environ 20 kg/m^3 , ce qui représente seulement 1% de la densité des matériaux terrestres. En conséquence, le remblai peut glisser horizontalement à l'interface entre le fond des blocs EPS et la fondation de sol sous-jacente, ce qui peut causer une défaillance potentielle.

Pendant la construction ou immédiatement après, la résistance au cisaillement non drainée, (S_u), du sol de fondation peut empêcher le glissement du remblai sous la charge du vent à court terme. Cependant, à long terme, l'angle de frottement entre l'EPS et la fondation est le principal facteur qui empêche le glissement du remblai. Les contraintes horizontales induites par le vent peuvent être calculées à partir de la théorie de la mécanique des fluides, comme présenté dans l'équation (4) pour la pression vers le haut et l'équation (5) pour la pression vers

le bas, où V est la vitesse du vent en mètres par seconde, et P_U et P_D sont les contraintes en kilopascals [151]. Les autres variables sont définies dans la figure III.8.

$$P_U = 0.75V^2 \sin \theta_U \dots \dots \dots (14)$$

$$P_D = 0.75V^2 \sin \theta_D \dots \dots \dots (15)$$

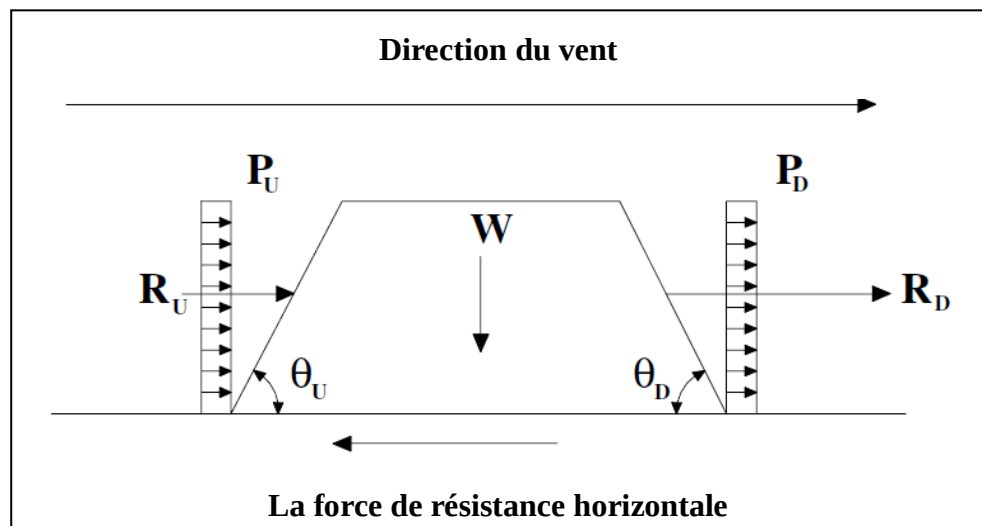


Figure III.8. Définition des paramètres pour l'analyse des charges de vent.

III.5 Dimensionnement et dispositions constructives

L'épaisseur de la couche de polystyrène expansé est déterminée en fonction de la charge que la fondation doit supporter. Cette charge est évaluée en utilisant les méthodes classiques de la mécanique des sols, en prenant en compte les déformations permises pendant les différentes phases de la vie de l'ouvrage et/ou les conditions de stabilité requises. La charge ainsi obtenue est ensuite répartie entre l'épaisseur de la couche de polystyrène, sa dalle en béton, l'épaisseur de la couche de remblai en matériaux courants et l'épaisseur des couches de chaussées. Il est important de noter que le polystyrène expansé est toujours positionné en haut du remblai, juste sous la dalle en béton et les couches de chaussées. Cela est fait pour éviter tout risque de fluage[152]. En cas d'un site inondable, il est recommandé de considérer que le remblai peut être soumis à l'effet de l'eau pour vérifier sa stabilité en submersion. De plus, il est important de prendre en compte l'effet du vent, surtout pendant les phases de construction, ainsi que les risques d'impacts accidentels de véhicules.

Pour protéger le polystyrène expansé contre les hydrocarbures, une dalle de béton armée d'un treillis soudé est utilisée en surface. Cette dalle, qui sert de couche de roulement pendant les travaux (sur une épaisseur de 20 cm de GNT), participe également à la répartition des contraintes sous la chaussée. Il est important de souligner que cette dalle est conçue spécifiquement pour une utilisation routière et ne doit pas être considérée comme une dalle

pour ouvrages d'art, avec les règles de conception associées. Outre sa fonction de protection mécanique, cette protection de surface offre également des avantages esthétiques et environnementaux, tels que la protection contre les rayons UV et la résistance aux hydrocarbures, ainsi qu'une protection contre les risques d'incendie.

Le géomousse est un matériau de remblai léger et souvent utilisé dans les projets de construction pour réduire la charge sur les sols compressibles. Cependant, pour assurer la stabilité et la résistance à long terme de la structure, une dalle de béton légèrement renforcée est généralement ajoutée à chaque hauteur de remblai de 3,5 à 4 m. De plus, afin de prévenir les effets de fluage à long terme dans le matériau EPS, il est courant de n'utiliser qu'une partie de la capacité de charge à court terme lors de la conception, avec un rapport de charge à long terme/à court terme d'environ 0,3 pour les projets normaux. Il est également important de prendre en compte la densité du géomousse lorsqu'il est placé dans le sol, car il peut subir des changements ultérieurs. Selon les expériences antérieures, une règle de conception a été établie avec une masse volumique unitaire de $q = 50 \text{ kg/m}^3$ pour les blocs placés dans une position sèche au-dessus de la nappe phréatique, tandis que la charge de conception pour les blocs temporairement ou définitivement submergés reste à $q = 100 \text{ kg/m}^3$. En utilisant ces pratiques de conception, on peut limiter les déformations par fluage à 2 % sur une période de 50 ans, assurant ainsi la stabilité et la durabilité de la structure à long terme.

Notons, que les dimensions des blocs EPS sont principalement déterminées par le moule utilisé lors de leur fabrication. Il n'existe pas de taille de moule standard utilisée dans le monde entier, mais il y a une tendance générale dans certains pays à utiliser des moules produisant des blocs un peu plus grands qu'auparavant, en particulier pour les dimensions les plus petites (épaisseur) et les plus grandes (longueur). Au cours des années 1990, la première tendance était vers des blocs plus longs, généralement de 4880 mm de longueur. Plus récemment, la tendance est plutôt vers des blocs plus épais, l'épaisseur variant entre 760 et 1 000 mm selon le moule utilisé. Il existe essentiellement deux façons de gérer la variabilité des dimensions des blocs EPS en géomousse:

- ✓ Pendant la phase de conception d'un projet, choisir un fournisseur (fabricant ou distributeur) de blocs EPS et déterminer la taille standard des blocs disponibles auprès de ce fournisseur.
- ✓ Le concepteur produit des dessins montrant la géométrie globale et les dimensions souhaitées des blocs EPS, ainsi que certains éléments clés du concept de la disposition (nombre minimal de couches, géométrie globale de chaque couche, etc.).

Le dimensionnement des blocs doit être défini dans un plan de calepinage élaboré par l'entrepreneur en charge des travaux. Ce plan doit préciser l'agencement des blocs pour chaque couche élémentaire, incluant les éventuelles découpes et la nomenclature des blocs découpés ainsi que leur position dans la masse. Il est recommandé d'alterner les directions des blocs des couches élémentaires pour éviter que les joints ne soient superposés. Le plan de calepinage doit prendre en compte le tassement et la mise en place des blocs sous les charges permanentes telles que la dalle en béton et la chaussée. Les dimensions des blocs doivent être

respectées avec une tolérance de plus ou moins 0,5 %. Si aucun élément ne garantit leur stabilité dimensionnelle, les blocs doivent être entreposés pendant au moins trois semaines après leur fabrication avant d'être découpés et livrés sur le chantier. Les blocs sont généralement découpés en usine par fil chaud, selon les mesures définies par le plan de calepinage[153].

Conclusion

La structure de la chaussée au-dessus des blocs géomousse est généralement constituée d'une dalle en béton peu armé avec une couche d'appui minimale et une couche de roulement en asphalte. Une membrane est parfois ajoutée pour renforcer la protection. Les blocs géomousse peuvent réduire la charge de construction et améliorer la stabilité, mais il est important de respecter les normes de qualité et les bonnes pratiques de construction pour assurer la sécurité et la durabilité du projet. La résistance à la compression de $R_c = 100 \text{ kPa}$, correspondant à une densité d'environ $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, est généralement suffisante pour les remblais routiers, mais d'autres qualités de matériaux peuvent être nécessaires en fonction de la situation de charge spécifique.

COMPAGNE **EXPERIMENTALE**

CHAPITRE IV

Matériaux utilisés, confection des éprouvettes et procédures d'essais

MATERIAUX UTILSES, CONFECTION DES EPROUVETTES ET PROCEDURES D'ESSAI

IV.1 Principe de l'étude

L'objectif principal de cette étude expérimentale, est l'applicabilité du polystyrène Algérien, comme nouveau matériau léger, dans la construction des remblais. Il s'agit d'une recherche qui s'articule autour de la caractérisation et de l'étude de réponse sous les contraintes répétitives prédominantes impliquées dans la construction des remblais routiers, à savoir la compression confiné et non confiné, le cisaillement directe sans et avec renforcement par d'autres matériaux tel que la geomembrane type Polyglasse et le comportement au fluage sous différentes niveau de charges. Pour cela, un programme expérimental permettant de déterminer les paramètres mécaniques requis (résistance, module d'élasticité, module de cisaillement) est envisagé.

IV.2 Programme expérimental

IV.2.1 Choix et prospectifs

L'investigation expérimentale portera sur les essais de résistance à la compression, au cisaillement direct et au cisaillement direct renforcé EPS/Polyglasse. L'objectif est d'étudier le comportement du polystyrène expansé, seul, puis renforcé par la géo-membrane "PolyglassElastoflexe HP" [154]. L'utilisation de polystyrène expansé (EPS) en tant que matériau de remblai léger a permis de résoudre les problèmes d'instabilité et de tassement dans les sols compressibles et à faible portance [155]. Plusieurs études de laboratoire [156, 157], ont montré que l'EPS peut être utilisée avec succès dans des applications géotechniques telles que les chaussées et les remblais. Le polystyrène expansé est un polymère géosynthétique en mousse de plastique cellulaire rigide, avec une structure cellulaire fermée. Sa fabrication implique le chauffage de billes expansibles de polystyrène avec de la vapeur, puis la mise en place de ces billes de polystyrène expansé chauffées dans des moules pour créer des blocs prismatiques d'EPS pour une utilisation dans une variété d'applications de génie civil. L'EPS est un matériau géosynthétique polymère dont la densité n'est que d'environ 1% de celle du sol. Le comportement de résistance et de contrainte-déformation de l'EPS diffère de celui des sols et dépend de nombreux facteurs tels que la taille, la forme, l'état hydrique (sec ou immergé), la masse volumique, l'ampleur de la charge appliquée, le processus de fabrication et les facteurs environnementaux qui affectent son comportement contrainte-déformation. Le choix de la géo-membrane de type polyglasse a été justifié par ses excellentes caractéristiques mécaniques, notamment sa qualité imputrescible, sa résistance élevée au poinçonnement et son allongement à la rupture selon la fiche technique fourni par le fabricant.

La compression est le mode de chargement prédominant pour les EPS dans les applications géotechniques, par conséquent, la résistance à la compression est un paramètre extrêmement important. Les déformations de référence couramment prises en compte sont de 1%, 5% et 10%, au niveau desquelles la contrainte est considérée comme la résistance à la compression du matériau. Ainsi que la mise en place des blocs d'EPS est parfois proche de la surface et au-dessus des niveaux des eaux souterraines, et donc à des profondeurs d'enfouissement plus importantes notamment sous les eaux souterraines ou à des niveaux d'inondation extrêmes peuvent subir des pressions de confinement importantes. Ce chapitre présente un programme d'essais expérimentaux mené sous différents modes de sollicitation, incluant la compression uni-axiale non confinée et la compression triaxiale non consolidée non drainée (UU). Les essais ont été réalisés sur des échantillons cubiques et cylindriques de différentes tailles et densités (15 kg/m³, 20 kg/m³ et 25 kg/m³), testés à l'état sec et après immersion. La résistance à la compression a été évaluée aux niveaux de déformation axiale de 1 %, 5 % et 10 %, tandis que les paramètres de résistance au cisaillement triaxial ont été déterminés sous trois pressions de confinement (20 kPa, 40 kPa et 60 kPa). En ce qui concerne le comportement au cisaillement direct renforcé et non renforcé, une série de tests a également été effectuée sur des blocs d'EPS seuls et en interaction avec une géo-membrane de type Polyglass, sous diverses contraintes normales (50 kPa, 100 kPa et 150 kPa). De plus, le comportement au fluage a été étudié pour des niveaux de chargement équivalents à 30 %, 50 % et 70 % de la résistance à la compression $\sigma_{10\%}$. Au total, 147 éprouvettes ont été confectionnées pour l'ensemble de ces tests.

IV.2.2. Matériaux utilisés et propriétés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont le polystyrène Géomousse EPS de différentes masses volumiques et la géo-membrane de type PolyglassElastoflexe HP. Les échantillons de Polystyrène géomousse EPS ont été fournis par un fournisseur local de matériaux d'emballage situé à Boumerdes, en Algérie.

IV.2.2.1 Polystyrène Géomousse EPS

Le polystyrène expansé (EPS) utilisé dans cette étude est produit localement par un procédé de moulage du styrène avec incorporation d'un agent gonflant (Figure IV.1). Pour découper l'EPS en blocs, plusieurs techniques peuvent être envisagées selon le niveau de précision recherché et les outils disponibles. La méthode adoptée dans notre étude est la découpe au fil chaud, technique idéale pour des coupes précises. Un fil chauffé électriquement fond le polystyrène le long de la ligne de découpe, assurant ainsi une finition nette. Ce procédé peut être réalisé à l'aide d'une machine à fil chaud professionnelle ou d'un fil chauffant manuel. Il se révèle particulièrement adapté pour des découpes complexes ou de formes courbes, mais est tout aussi efficace pour découper des blocs d'EPS.



Figure IV.1. Blocs Polystyrène EPS utilisés

a/ la masse volumique

Les éprouvettes ont été conditionnées pendant 24 heures avant le test à une température de 23 ± 2 °C et une humidité relative de 50 ± 5 %. Les tests sont effectués dans la même condition standard de laboratoire. Un minimum de trois éprouvettes a été testé. Les éprouvettes ont été pesées avec une balance d'une précision de $\pm 0,1$ %. un pied à coulisse ou un comparateur à pied à coulisse a été utilisé pour mesurer les dimensions. Pour un pied à coulisse coulissant, ajustez l'instrument jusqu'à ce que les faces de mesure touchent les surfaces de l'échantillon sans les comprimer. Trois mesures sont effectuées pour chaque dimension. Trois masses volumiques ont été retenues : 15 kg/m^3 (D15), 20 kg/m^3 (D20) et 25 kg/m^3 (D25). La procédure adoptée pour confirmer les masses volumiques fournis par l'usine de fabrication ; est réalisée conformément aux pratiques générales établies par des normes telles que la NF EN 15037-4 [158], en suivant des étapes clés pour assurer la précision des résultats :

1. ****Préparation des échantillons**** : Des échantillons représentatifs, sans défauts et de forme cubique, sont sélectionnés pour simplifier le calcul du volume.
2. ****Mesure des dimensions**** : Les dimensions de chaque échantillon sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse de haute précision, permettant le calcul exact du volume à partir de ces mesures.
3. ****Pesée**** : Chaque échantillon est pesé avec une balance de précision pour obtenir sa masse exacte en kilogrammes.
4. ****Calcul de la masse volumique**** : La masse volumique est calculée selon la formule :

$$MV (\text{Kg/m}^3) = M (\text{kg}) / V (\text{m}^3).$$

Pour améliorer la fiabilité des résultats, cette expérience est répétée trois fois pour chaque type de matériau, afin de calculer une moyenne qui réduit l'incertitude et assure une meilleure précision.

Les résultats obtenus sont respectivement de 15,39 kg/m³, 20,13 kg/m³ et 24,16 kg/m³, respectivement, pour les trois masses volumiques D15, D20 et D25.

b/ Absorption d'eau

La détermination de l'absorption d'eau a été effectuée en immergeant des échantillons de différentes masses volumiques nominales (15 kg/m³, 20 kg/m³, et 25 kg/m³) dans un récipient rempli d'eau. Pour maintenir les échantillons complètement immergés et éviter qu'ils ne flottent, un filet en acier a été placé au-dessus des échantillons, garantissant une immersion totale et continue pendant toute la durée de l'essai, fixée à 30 jours. Pour évaluer l'absorption d'eau en fonction de la taille et de la densité, trois types d'échantillons cubiques de tailles différentes ont été sélectionnés : 50 mm³, 100 mm³ et 150 mm³, chacun préparé selon les trois masses volumiques choisies. Afin d'identifier les échantillons dans ce rapport, ceux-ci sont référencés en utilisant le symbole EPS suivi de la masse volumique nominale, par exemple, (EPS 15) pour les échantillons de 15 kg/m³. la détermination de l'absorption d'eau s'est effectuée suivant la Procédure suivante :

1. **Préparation des échantillons** : Les échantillons sont coupés en forme de cube aux dimensions spécifiques et marqués pour faciliter leur identification. Ils sont séchés à une température de 50 °C pendant 24 heures pour éliminer toute humidité résiduelle, puis pesés avec une balance de précision pour obtenir leur masse initiale à sec.
2. **Immersion et suivi** : Les échantillons sont placés dans le récipient rempli d'eau et maintenus en immersion à l'aide du filet en acier. Le récipient est maintenu à température ambiante (23°C ; humidité 50%) contrôlée pour éviter toute variation d'absorption due aux changements de température.
3. **Mesures intermédiaires** : tous d'abord, nous avons déterminé le volume initial d'eau qui va le mettre dans le récipient, et après l'achèvement de la période d'immersion nous recalculer ce volume qui va nous permettre de calculer le volume absorbé par chaque éprouvette suivant la formule :

$$\text{Absorption d'eau (\%)} = \frac{(\text{volume d'eau initiale avant imm} - \text{volume d'eau finale après imm})}{\text{volume initiale}} * 100$$

Les résultats obtenus montrent les proportions d'absorption d'eau suivantes : 3,2 %, 1,8 % et 1,1 % pour les échantillons ayant des masses volumiques de 15 kg/m³, 20 kg/m³ et 25 kg/m³, respectivement.

IV.2.2.2. Polyglasse Elastoflexe HP

Il s'agit d'une membrane élastomère étanche, préfabriquée avec une performance très élevée. Elle est constituée d'un mélange à base de bitume distillé et modifié et d'une résine élastomère thermoplastique (SBS) à haute élasticité, comportant une armature en polyester non-tissé à fil continu de grammage élevé, renforcé par des fibres de verre longitudinales [161]. Outre sa qualité imputrescible, cette armature spéciale donne aux membranes d'excellentes caractéristiques mécaniques d'allongement à la rupture, une résistance élevée au poinçonnage ainsi qu'une stabilité dimensionnelle (Figure IV.2). Les propriétés physique,

chimique et mécaniques garantissent la parfaite adhérence aux supports et couches. Ce produit nécessite une protection lourde appropriée contre les rayons solaires. Le tableau 1, ci-dessous résumant les caractéristiques techniques de ce produit.

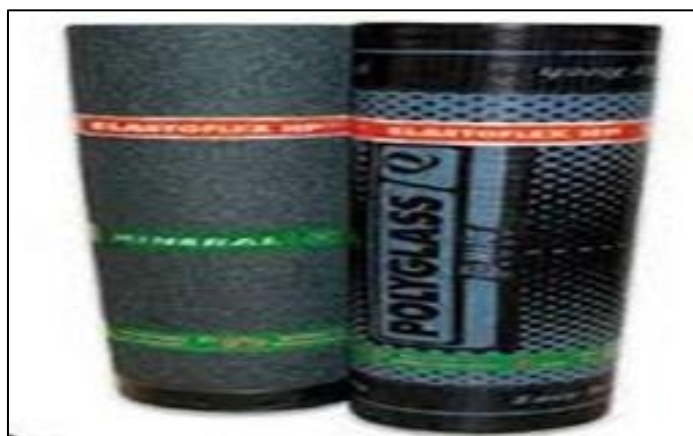


Figure IV.2. Rouleau de Géo-membrane PolyglasseElastoflexe HP.

Les caractéristiques mécanique et physiques de la géo-membrane “Polyglasse”, sont données dans le tableau IV.1, ci après.

Tableau IV.1. Caractéristiques techniques du PolyglasseElastoflexe HP [161]

Caractéristiques techniques	Unité	Valeur nominale
Longueur	M	≥ 10
Largeur	M	≥ 1
Epaisseur	Mm	5 ± 0.2
Résistance à la déchirure	N /mm ²	≥ 0.8
Résistance au cisaillement	N/mm ²	≥ 0.25
Résistance à la fissuration	C°	≤ 15
Allongement à la traction	%	50% (± 15)
Stabilité dimensionnelle	%	≤ 20
Résistance au glissement à T (C°) élevé	C°	≥ 100

IV.3.Confection des éprouvettes

IV.3.1. Principe et conduite

Pour mener à bien le programme expérimental, trois catégories d'éprouvettes de sections distinctes ont été confectionnées :

- **1^{re} catégorie** : essais de compression uni-axiale (non confinée),
- **2^e catégorie** : essais de cisaillement direct sur un monobloc d'EPS, seul et en interaction avec la géomembrane de type Poluglasse,
- **3^e catégorie** : essais de cisaillement triaxial.

Le nombre total d'éprouvettes utilisées pour l'ensemble des essais est de 147.

IV.3.2. Compression uni-axiale

La compression uni-axiale a été effectuée pour évaluer l'influence de la masse volumique, l'effet de l'immersion dans l'eau, l'effet de la taille des échantillons, et le comportement des éprouvettes du polystyrène/EPS renforcées par géo-membrane PolyglasseElastoflexe HP [162]. Pour cela, pour chaque masse volumique prise, des éprouvettes de trois volumes à sec ont été confectionnées (Figure IV.3). L'immersion dans l'eau sera traitée pour le cas immergé et deux renforcement, par une puis par deux nappes de la géo-membrane Polyglasse seront étudiés (Tableau IV.2). Les figures IV.4 et IV.5, illustrent les blocs non renforcés et renforcés, respectivement pour les trois masses volumiques 15Kg/m³, 20Kg/m³ et 25Kg/m³.



IV.3 (a), (b) et (c) : Préparation des éprouvettes pour les essais à différentes masses volumiques.

Tableau IV.2 : Identification des types d'éprouvettes et essais

Type / Densité	volume 50mm ³	volume 100mm ³	volume 150mm ³	Cas immergé	01 couche de renforcement	02 couches de renforcement	Nombre d'éprouvettes
D15	3	3	3	3	3	6	21
D20	3	3	3	3	3	6	21
D25	3	3	3	3	3	6	21

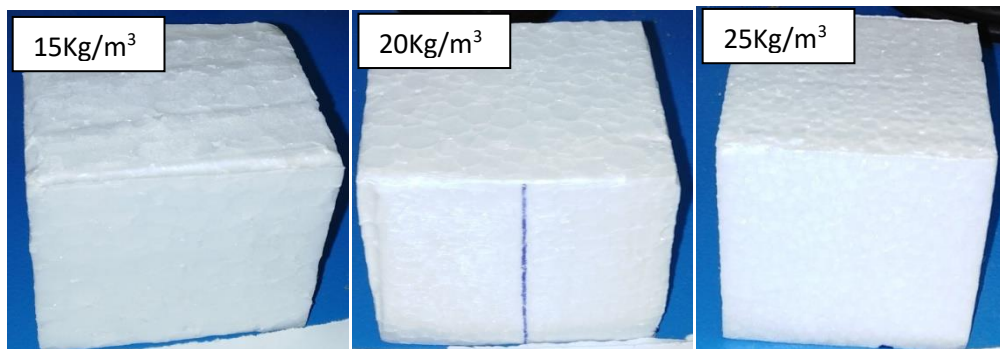


Figure IV.4.Préparation les éprouvettes non renforcées pour l'écrasement.

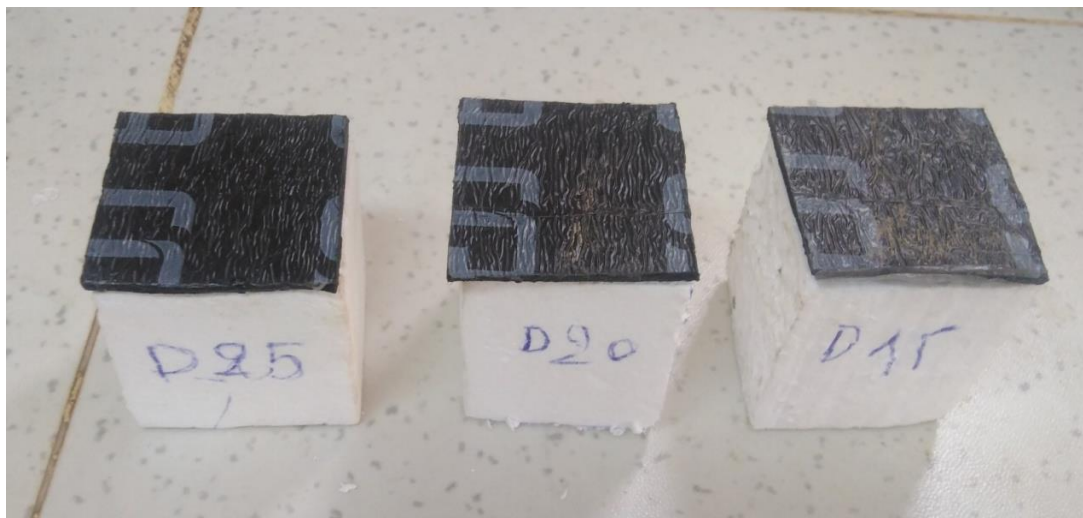


Figure IV.5.Préparation les éprouvettes renforcées pour l'écrasement.

IV.3.3. Cisaillement direct d'un monobloc en EPS et renforcé par Polyglasse.

L'objectif de l'essai de cisaillement direct sur les blocs de polystyrène expansé (EPS) est de comprendre le comportement des paramètres de résistance au cisaillement du polystyrène [163]. L'essai de cisaillement direct est réalisé sur des blocs d'EPS, de trois masses volumiques différentes, à savoir 15kg/m³, 20kg/m³ et 25kg/m³, sous trois valeurs différentes de contrainte normale de 50kPa, 100 kPa et 150 kPa. Pour les essais de cisaillement direct interagissant avec la geo-membrane Polyglasse, la même procédure a été adoptée, avec les trois masses volumiques déjà énumérées et les mêmes valeurs de contrainte normale (figure IV.6). Le tableau IV.3, donne le nombre des éprouvettes confectionnés pour les deux modes d'essais de cisaillement. Il est à noter que (Khan et al) [164], ont illustré très clairement le principe de chaque essai de cisaillement direct et de cisaillement directe de l'interface EPS/PVC, sur chaque bloc de polystyrène EPS et la distribution des forces de contrainte.

Tableau IV.3. Identification des échantillons réalisés pour les essais de cisaillement

Masse volumique	Cisaillement direct de mono-bloc EPS			Cisaillement direct renforcé par polyglasse		
	Contrainte Normale (kPa)			Contrainte Normale (kPa)		
	50	100	150	50	100	150
D15	3	3	3	3	3	3
D20	3	3	3	3	3	3
D25	3	3	3	3	3	3

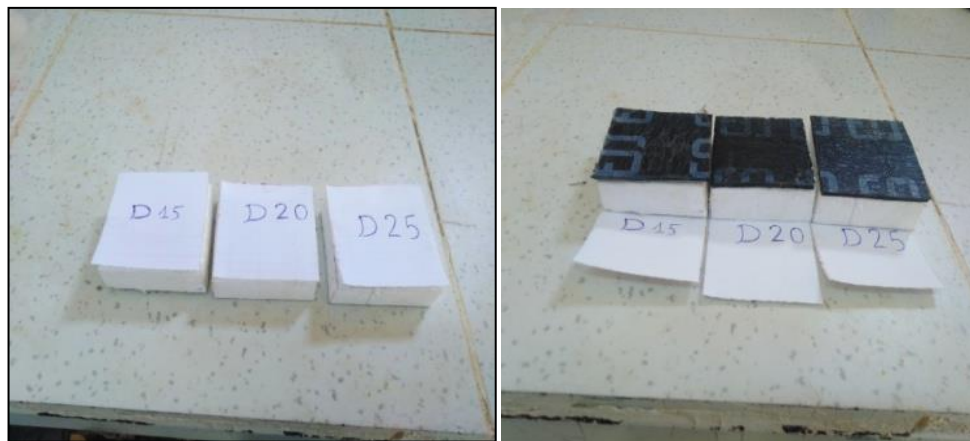


Figure IV.6. Préparation des échantillons pour l'essai de cisaillement direct.

IV.4. Procédures

L'objectif de ces tests d'essais, est d'évaluer le comportement mécanique du polystyrène expansé dans différentes conditions, notamment en termes de densité, d'humidité, de taille d'échantillon et de renforcement par une géo-membrane. Pour cela, on a adopté les essais de compression uni-axiale et triaxial ; les essais de cisaillement direct et les essais de cisaillement direct de l'interface EPS/Polyglasse.

IV.4.1 Compression simple uni-axiale

La procédure d'essai de compression simple ou uni-axial non confiné selon s'est effectuée conformément à la norme ASTM D1621-16 (*approuvée le 1er mai 2023, continue la méthode d'essai pour déterminer les propriétés de compression des matériaux cellulaires rigides tels que les plastiques expansés*) et commence par la préparation de l'éprouvette, qui doit être de forme carrée ou circulaire, avec une surface comprise entre 25,8 cm² et 232 cm², et une hauteur minimale de 25,4 mm. Les éprouvettes sont conditionnées à $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative pendant au moins 40 heures avant l'essai. Lors du montage, l'éprouvette est placée dans la machine d'essai de manière à ce que les surfaces de charge soient parallèles et perpendiculaires aux côtés, sans défaut visible. La charge est appliquée uniformément sur

toute la surface de l'éprouvette, avec un taux de déplacement de la traverse de $2,5 \pm 0,25$ mm/min pour chaque 25,4 mm d'épaisseur. La déformation est mesurée à l'aide du déplacement de la traverse, en prenant des mesures à des incréments de 0,5 % de l'épaisseur initiale, et en enregistrant la déformation et la charge correspondante. L'essai se poursuit jusqu'à ce que l'éprouvette atteigne un point de rupture ou soit comprimée d'environ 13 % de son épaisseur initiale. À partir de la courbe charge-déformation, on calcule la contrainte en compression à la charge limite proportionnelle et la résistance en compression à la charge maximale, ainsi que le module d'élasticité effectif. L'essai ont été réalisé dans une atmosphère standard de laboratoire à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et 50 ± 5 % d'humidité relative, sauf indication contraire. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine d'essai universelle (Universal Electromechanic Test Machine (UTM-0108)) à une vitesse de tête de 1mm/min et à température ambiante (Figure IV.6). Les spécimens sont comprimés entre les plaques supérieures (fixe) et inférieure (mobile) de la machine jusqu'à ce que la distance entre les plaques atteigne une valeur prédéterminée et la résistance à la compression a été mesurée à chaque étape de l'essai. La machine utilisée pour les essais de compression uni-axiale non confinée était une machine multiplex d'une capacité de 50 KN, équipée d'un servomoteur et d'un système d'acquisition et de contrôle de données nommé 'GRAPGICS TFT BC100'. La plage de vitesse de déplacement de la machine était de 0,00001 à 51 mm/min (Figure I.V.7).

Des éprouvettes en polystyrène expansé de différentes densités (15 kg/m^3 , 20 kg/m^3 et 25 kg/m^3) ont été soumises à un essai de compression simple sous diverses conditions : 1) trois volumes d'échantillons ont été testés (50 mm^3 , 100 mm^3 et 150 mm^3), 2) les éprouvettes ont été immergées dans l'eau pendant 30 jours, et 3) le renforcement par une géomembrane de type Polyglasse a été évalué, en appliquant soit une nappe, soit deux nappes de renforcement.

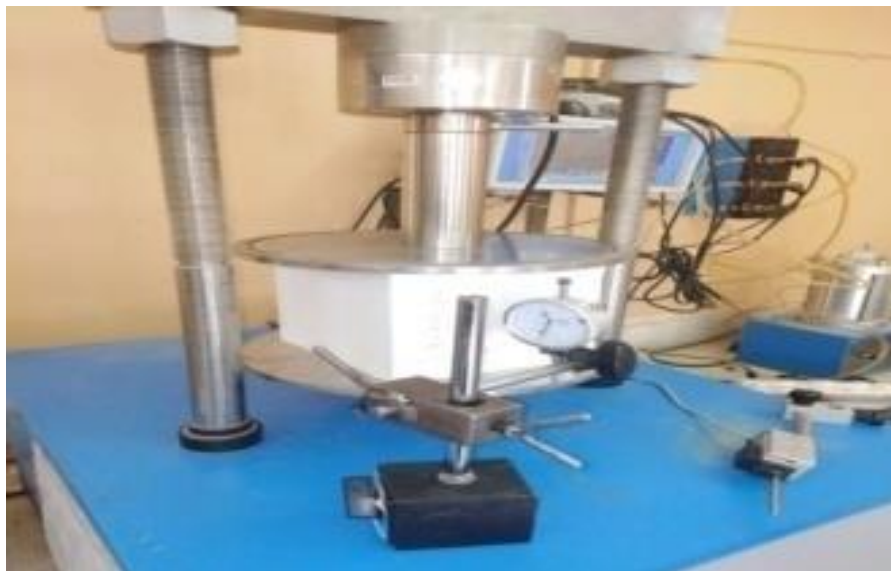


Figure IV.7 : Appareillage et essais de compression simple



Figure IV.8 : Système d'acquisition Graphics TFT BC 100

IV.4.2. Cisaillement Direct d'EPS et Renforcé EPS-Polyglasse

La procédure de l'essai de cisaillement direct, conforme à la norme ASTM D3080/D3080M, permet de mesurer la résistance au cisaillement des sols sous une contrainte progressivement appliquée. Les échantillons sont installés dans une boîte de cisaillement divisée en deux parties, et une contrainte normale est appliquée pour simuler les conditions de terrain. Ensuite, une force horizontale est exercée pour provoquer le glissement entre les deux moitiés de la boîte. Pendant l'essai, la force de cisaillement et les déformations horizontale et verticale sont mesurées, et une vitesse de cisaillement lente est maintenue pour assurer un cisaillement drainé, notamment pour les sols saturés. La résistance maximale est calculée à partir des données recueillies, permettant de déterminer la contrainte de cisaillement et de tracer la courbe de résistance en fonction de la déformation du matériau.

Dans cette étude, une machine de cisaillement direct/résiduel automatique UTS-2060 (Figure IV.8) a été utilisée, capable d'appliquer une charge maximale de 5 kN sur l'échantillon. Cette machine permet de tester des échantillons aux dimensions standards de 60 × 60 × 20 mm. Le cisaillement est entraîné par un servomoteur de haute précision, couplé à un ensemble de boîtes de vitesses, offrant une grande flexibilité de réglage. La vitesse de cisaillement est ajustable par paliers entre 0,00001 et 9,99999 mm/min, avec une fonction inverse pouvant atteindre une vitesse de 10 mm/min, permettant un contrôle précis de l'essai pour différents types de matériaux et conditions de cisaillement. Au total, 27 essais ont été réalisés sous trois niveaux de contrainte normale : 50 kPa, 100 kPa et 150 kPa. Un déplacement horizontal a été appliqué à une vitesse recommandée de 1 mm/min, et chaque essai s'est terminé automatiquement lorsque le déplacement maximal a été atteint et le cisaillement arrêté. En l'absence de pic de résistance observé, la résistance au cisaillement maximal est considérée atteinte lorsque le déplacement horizontal atteint 10 %. Lors des essais de cisaillement direct

renforcés EPS/Polyglass Elastoflexe HP, le polystyrène expansé (EPS) a été placé dans la boîte supérieure, tandis que l'échantillon de Polyglass a été positionné dans la boîte inférieure. Cette configuration a été choisie car la géo-membrane en Polyglass est considérée comme incompressible par rapport à l'EPS sous la charge appliquée, garantissant ainsi que la surface de cisaillement reste parfaitement alignée avec le plan de séparation entre les parties supérieure et inférieure de la boîte. De plus, cette disposition présente l'avantage de minimiser le basculement éventuel, qui pourrait survenir si le bloc inférieur se déforme de manière inégale sous l'effet de la charge.



Figure IV.9.Machine à cisailier automatique UTS-2060

IV.4. 3. Les essais triaxiaux

Un cadre de chargement triaxial standard a été utilisé pour réaliser des essais triaxiaux non consolidés non drainés (UU) conformément à la norme ASTM D2850-24. Cette norme, publiée en 2024, définit les méthodes permettant de mesurer les propriétés de résistance des sols et d'autres matériaux géotechniques soumis à une contrainte triaxiale, où trois contraintes principales sont appliquées simultanément. Elle spécifie les procédures pour évaluer la résistance et les relations contrainte-déformation des échantillons de sol dans des conditions non drainées sous pression de confinement dans une chambre triaxiale [177, 178]. La cellule de la machine est conçue pour accueillir des échantillons cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, comme indiqué sur la figure IV.10. Les essais ont été réalisés avec une vitesse de déformation constante de 1 mm/min, et les mesures ont été surveillées à l'aide d'un capteur de force et d'un transducteur LVDT pour enregistrer respectivement la charge du déviateur et le déplacement vertical. Les éprouvettes ont été enveloppées dans une membrane en caoutchouc et fixées à la base et aux plaques supérieures à l'aide de joints toriques pour éviter toute fuite d'eau. L'application de pressions dans la cellule a entraîné une légère expansion de la paroi de la cellule triaxiale. Le volume d'eau prélevé pour compenser cette expansion a été soustrait du volume total d'eau injecté dans la cellule, afin d'isoler la déformation volumétrique de l'échantillon (Figure IV.9).

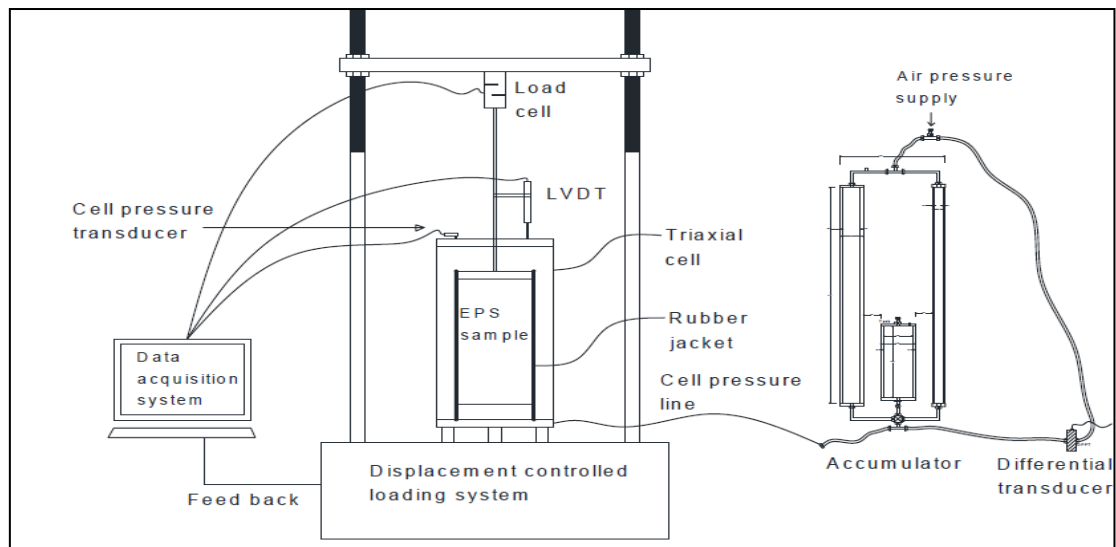
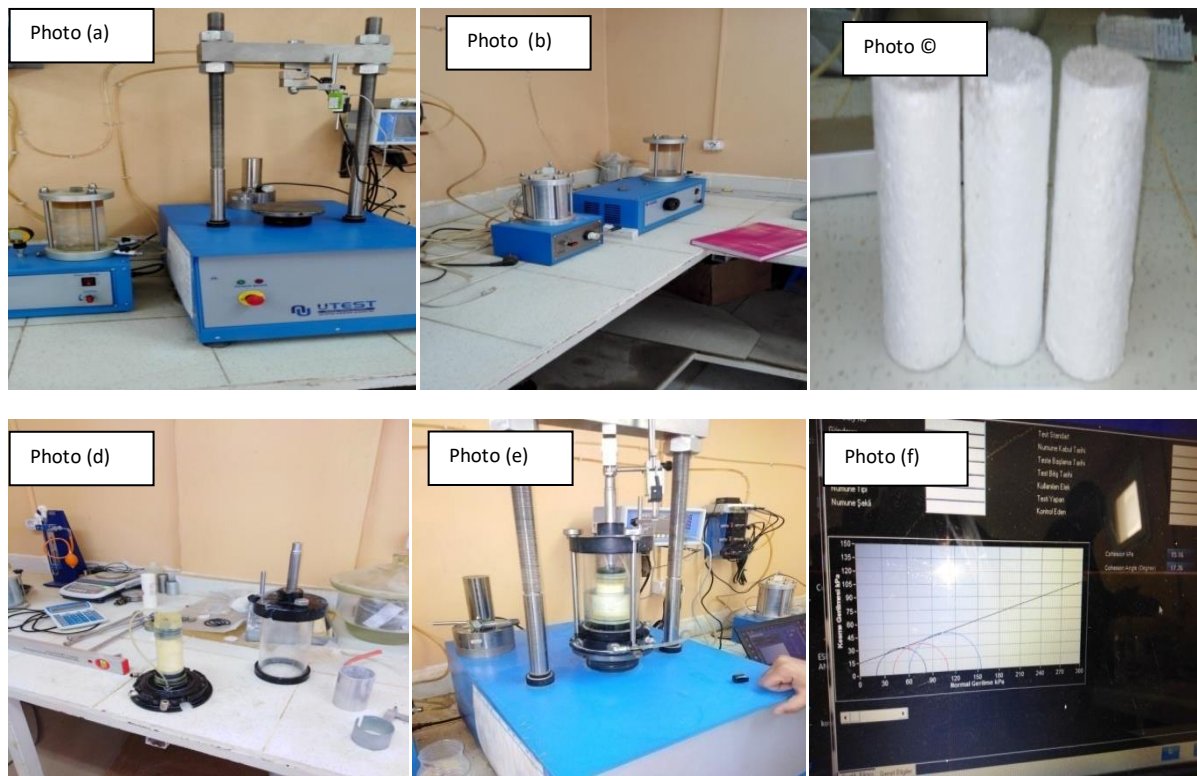


Figure IV.10. Configuration du test pour les tests triaxiaux [177]

Les tests triaxiaux impliquaient la mise en place d'échantillons cylindriques d'EPS à l'intérieur de membranes en caoutchouc, qui étaient ensuite fixés en haut et en bas à l'aide de joints toriques avant d'être placés au centre de la cellule triaxiale. La cellule était remplie d'eau désaérée, en s'assurant que toutes les bulles d'air étaient évacuées de tous les tubes et remplacées par de l'eau désaérée. Une tige de chargement a été insérée dans la plaque supérieure qui reposait sur l'échantillon, et l'extrémité libre de la tige était équipée d'un siège de charge. La cellule de pesée a été suspendue à l'actionneur vertical, qui était monté sur un châssis de chargement rigide pour éviter tout soulèvement de la tige lorsque la pression de la cellule était appliquée. La plupart des tests triaxiaux ont commencé simultanément avec l'application de la pression cellulaire et de la charge axiale.

Tous les tests ont été effectués jusqu'à une déformation axiale maximale de 15 %. Trois valeurs de la masse volumiques différentes de géomousse en polystyrène expansé (EPS) ont été sélectionnées pour les essais triaxiaux, à savoir 15 kg/m³, 20 kg/m³ et 25 kg/m³. Les tests ont été réalisés sous des contraintes de confinement de 20 KPa, 40 KPa et 60 KPa. 27 échantillons sous forme cylindrique ont été découpés d'un uniforme à l'aide d'une découpeuse à fil chaud, aux dimensions standard pour les essais triaxiaux (diamètre de 50 mm et hauteur de 100 mm, soit un rapport hauteur/diamètre de 2) conformément à la norme. Les figures V.16 : (a), (b), (c), (d), (e) et (f) ci-après illustrent l'appareillage utilisé, la préparation des échantillons et la démarche des essais.



FigureIV.11 (a, b, c, d, e et f) : Appareillage et procédures pour l'essai triaxial

IV.4.4. Essais de fluage

L'essai de fluage, conformément aux normes ASTM et notamment à la norme ASTM D2990 pour les matériaux plastiques, mesure la déformation différée d'un matériau sous une charge constante sur une période prolongée. Les étapes générales de cet essai incluent d'abord la préparation des échantillons, en veillant à ce que ceux-ci soient conformes aux dimensions spécifiées (comme des éprouvettes de type I pour les polymères) et soient conditionnés pendant au moins 40 heures dans un environnement contrôlé à 23 °C et 50 % d'humidité relative. Ensuite, l'échantillon est installé dans l'appareil de fluage avec un alignement précis pour éviter les charges non axiales, et un dispositif de mesure est ajusté pour enregistrer la déformation au cours du temps. Une charge constante, correspondant généralement à 20-50 % de la résistance à la traction du matériau, est alors appliquée, et le test se déroule à une température contrôlée, spécifiée par la norme ou les conditions d'utilisation du matériau. La déformation initiale est notée dès l'application de la charge, puis suivie à intervalles réguliers : plus fréquemment dans les premières heures (toutes les 10 minutes durant la première heure), puis de manière plus espacée. La durée de l'essai peut varier de quelques heures à plusieurs milliers d'heures selon les objectifs, avec un suivi rigoureux des mesures pour éviter les variations de charge ou de température. À la fin de l'essai, les données recueillies permettent de tracer la courbe de fluage (déformation en fonction du temps) et d'analyser divers paramètres, notamment la déformation initiale, les vitesses de fluage primaire et secondaire, ainsi que le module de fluage pour certaines applications. Le taux de déformation par fluage dépend des propriétés du matériau, du temps d'exposition, de la température

d'exposition et de la charge appliquée (contrainte). Si la contrainte appliquée et sa durée sont suffisamment importantes, la déformation peut être significative qu'un composant ne peut plus remplir sa fonction [173].

Dans cette partie d'étude le phénomène de fluage a été examiné à l'aide d'un instrument de compression uni-axiale non confinée appelé "Oedomètre", en confectionnanttrois (03) éprouvettes cubiques de 50 mm³, avec une masse volumique de 20 kg/m³, la valeur fortement recommandée dans les remblais légers [174].Les éprouvettes ont été prélevées à partir de blocs EPS et ont été soumises à des niveaux de charges de 30%, 50% et 70%, de la résistance à la compression ($\sigma_{10\%} = 84\text{KPa}$). Les éprouvettes ont été maintenues sous chargement pendant 12 mois (Figure IV.11).



Figure IV.12 : Appareillage Oedométrique pour les essais de fluage

CHAPITRE V

Résultats et discussion

RESULTATS ET DISCUSSIONS

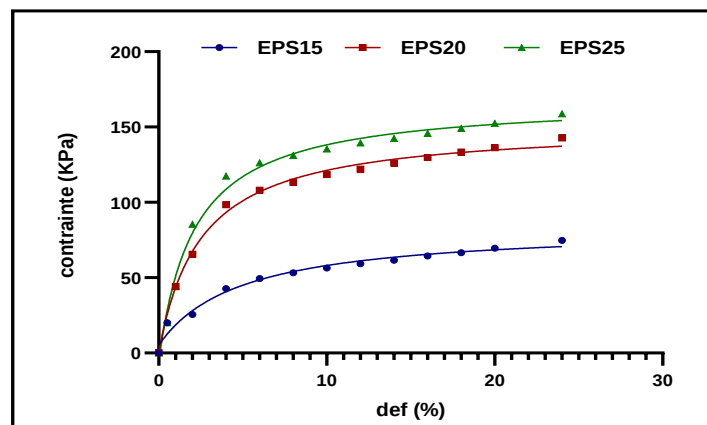
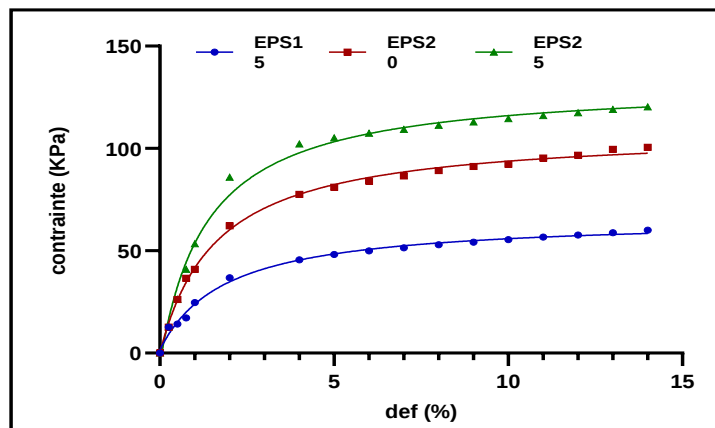
V.1. Introduction

Nous présentons, dans ce chapitre, les résultats de l'étude expérimentale, dans ses parties d'essais : compression uni-axiale et triaxiale (sans ou avec renforcement par Polyglasse), cisaillement direct de monobloc d'EPS et interagissant avec la géo-membrane de type Polyglasse.

V.2. Compression uni-axiale sans renforcement

V.2.1. Comportement en contrainte - déformation

Les courbes contraintes-déformations moyennes, présentées dans les figures V.1 (a), V.I (b) et V.I (c), sont obtenues à partir des essais de compression (uni-axiale). Elles montrent le comportement élasto-plastique sans pics. Trois phases sont visibles : la phase élastique (linéaire), la phase élasto-plastique (courbure) et la phase pseudo-plastique avec palier.



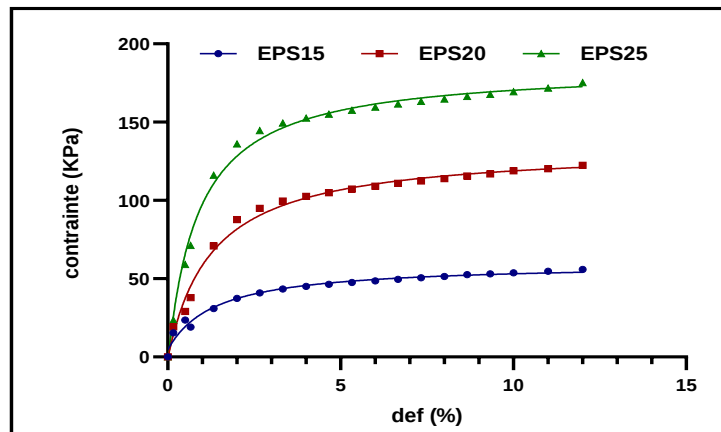


Figure V.1 (a, b, c) : Contrainte –déformation (50mm³, 100mm³, 150mm³)

Ceci est confirmé par les résultats de recherches antérieures, telles que celles de : Atmatzidis en 2001 [166] et Ghotbi en 2019 [167]. Les valeurs obtenues pour : la limite d'élasticité, la résistance à la compression et le module d'élasticité initial, sont résumées dans le tableau V.1 ci-dessous, pour les trois masses volumiques 15Kg/m³, 20Kg/m³ et 25Kg/m³, quelle que soit la forme de l'éprouvette (sèche ou immergée). En termes quantitatifs, les contraintes de compression à la limite élastique (à 1% de déformation) ont une incidence significative sur les résultats obtenus pour les échantillons de 150 mm³, avec des améliorations de 212% (pour une masse volumique de 15 kg/m³), 100% (pour une masse volumique de 20 kg/m³) et 113,7% (pour une masse volumique de 25 kg/m³) par rapport aux résultats observés pour les échantillons de 50 mm³. Les courbes contrainte-déformation de la figure V.1 montrent que les contraintes augmentent avec la masse volumique et la taille de l'échantillon. Cela donne des valeurs significatives pour le module d'élasticité (E) du polystyrène, avec des valeurs de 2,3 MPa, 5,3 MPa et 7,9 MPa, respectivement pour les masses volumiques 15Kg/m³, 20Kg/m³ et 25Kg/m³, pour des échantillons de grande volume (150 mm³). Concernant la limite de la phase élasto-plastique (déformation à 5%), les mêmes remarques sont observées, avec des pourcentages de 43,8%, 67% et 51%, respectivement pour les masses volumiques 15Kg/m³, 20Kg/m³ et 25Kg/m³ par rapport aux résultats obtenus pour le cas de (50mm³) ainsi qu'une diminution de 23 % pour le cas immergé par rapport à l'état sec avec le même volume (50mm³). Dans la figure V.2 l'on observe que la résistance à la compression ($\sigma_{10\%}$) augmente avec la masse volumique et la taille de l'éprouvette.

Tableau V.1 : Valeurs de résistance à la compression à différents taux de déformation

masse volumique (kg/m ³)	D15			D20			D25		
	σ (1%) (KPa)	σ (5%) (KPa)	σ (10%) (KPa)	σ (1%) (KPa)	σ (5%) (KPa)	σ (10%) (KPa)	σ (1%) (KPa)	σ (5%) (KPa)	σ (10%) (KPa)
Cube 50mm ³	8	32	45.2	26	63	84	44	104	114
Cube 100mm ³	12	45	56.4	32	103.2	114	44	121.8	135.4
Cube 150mm ³	25	46	53.7	52	107	118.2	94	157	169.4
Cube 50mm ³ immergé	25.3	25.4	61.3	44.6	100.2	94.8	45	105.2	117

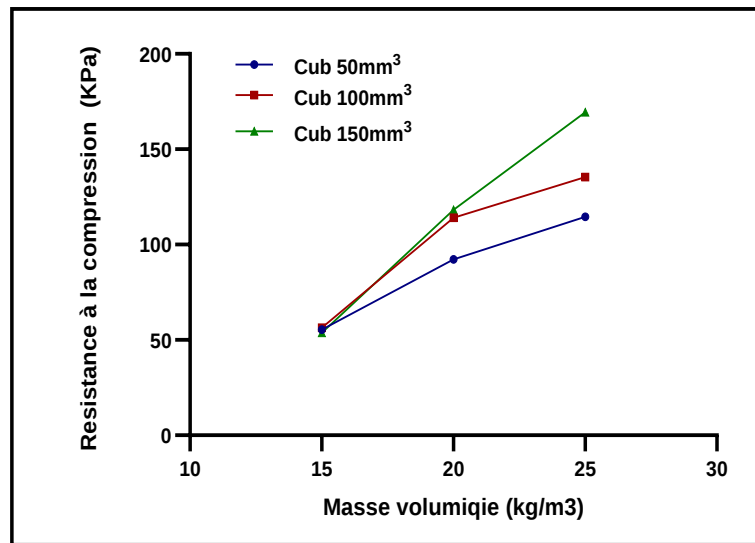


Figure V.2. Variation de la résistance à la compression $\sigma_{10\%}$ avec la masse volumique

V.2.2. Influence de l'immersion du polystyrène dans l'eau

La figure V.3 illustre le comportement des échantillons testés, sous compression uniaxiale, à l'état sec et immergé. Les valeurs de résistance dans le cas des éprouvettes immergées sont légèrement supérieures à celles de l'état sec, en raison du rôle joué par la quantité d'eau absorbée, ce qui signifie une augmentation de la rigidité, en particulier pendant la phase élastique. De plus, des chercheurs ont montré que l'absorption d'eau par le polystyrène (EPS) dépend de l'importance de la contrainte appliquée [168], ce qui n'est pas le cas dans notre étude. Aussi, la différence ou l'écart de résistance entre les deux cas (sec et immergé) pour chaque valeur de masse volumique appliquée est respectivement de 16,1 KPa (pour D15), 10,8 KPa (pour D20) et 3,2 KPa (D25).

Le polystyrène de masse volumique 25Kg/m³ n'est pas fortement affecté par ce changement de résistance, ce qui peut être dû à la faible absorption d'eau de l'échantillon le plus dense. En outre, on peut conclure que l'immersion dans l'eau du polystyrène Geofoam EPS n'est pas effectivement affectée par le temps d'immersion.

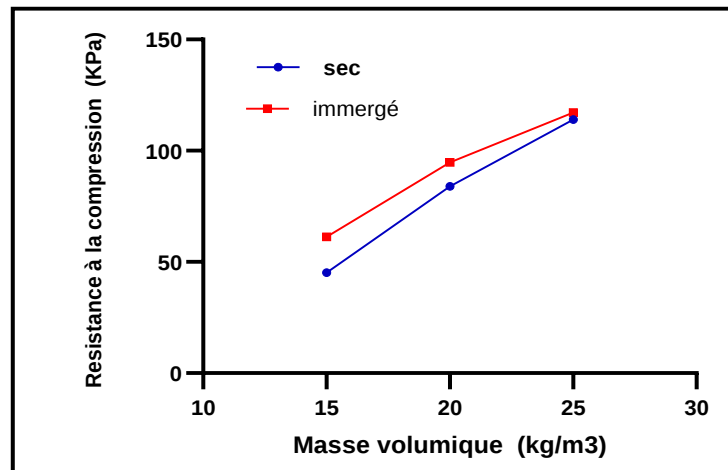
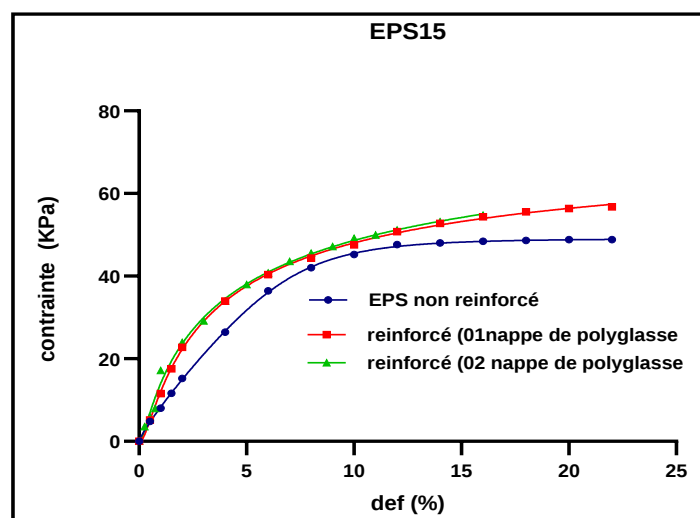


Figure V.3: Influence de la densité sur la résistance à la compression $\sigma_{10\%}$ pour des volumes de 50mm^3

V.2.3 Effet du renforcement par géo-membrane Polyglasse sur le comportement du polystyrène

La deuxième phase de notre étude porte sur la compression uni-axiale non confinée du polystyrène expansé EPS renforcé par la géomembrane "Polyglass". Les résultats montrent que les courbes contrainte-déformation, pour différentes masses volumiques et en fonction du nombre de couches de renforcement, traduisent l'évolution de la résistance à la compression du Polyglasse.

L'évolution de la résistance à la compression du polystyrène expansé EPS renforcé par la géo-membrane "Polyglass" est influencée par plusieurs paramètres. Tout d'abord, les courbes contrainte-déformation selon la masse volumique de l'éprouvette et le nombre de couches de renforcement, présentent des tendances similaires, composées de la phase élastique, la phase élasto-plastique et la phase plastique, (Figures V.4 (a), (b) et (c)).



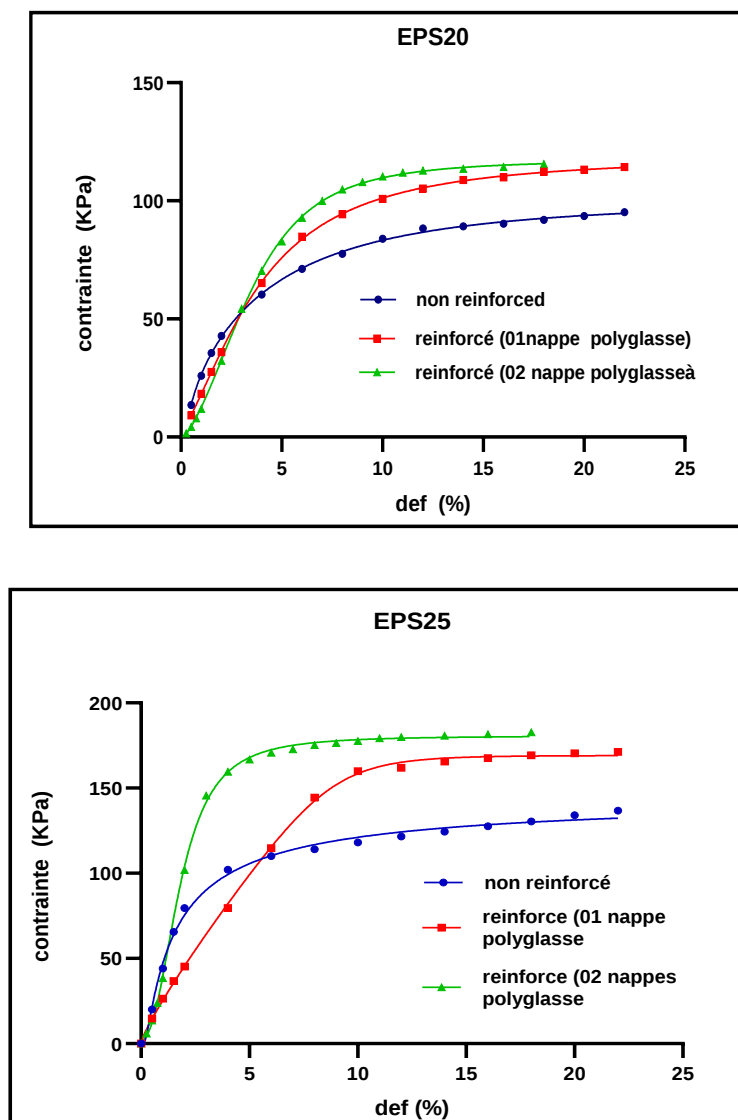


Figure V.4 (a,b,c) : Contrainte- déformation (D15, D20, D25)renforcé par polyglasse (volume 50mm³)

la résistance à la compression augmente linéairement avec la masse volumique(Figure V.5). L'effet du renforcement est également remarquable, et l'on observe un gain de résistance important pour les éprouvettes les plus renforcées, en particulier lorsque le cube de polystyrène est plus dense. Cet écart entre les valeurs de résistance est très minime pour les éprouvettes de faible masse volumique, mais il augmente lorsque'elle augmente. En effet, des recherches antérieures ont montré que le renforcement par d'autres matériaux a une influence significative sur la résistance à la compression [169] ce qui est confirme dans cette étude. Nous avons constaté que le gain de résistance est de 49,8% et 36,7%, respectivement pour une et deux couches de renforcement par "Polyglasse" par apport le cas non renforcépour la masse volumique 25Kg/m³. En revanche, ce gain est réduit à 9,2% et 13,7%, respectivement pour une et deux couches de renforcement pour la masse volumique 20Kg/m³, et est négligeable pour la masse voluique 15Kg/m³. Par conséquent, nous concluons qu'il est

préférable de renforcer par deux couches pour le polystyrène expansé le moins dense, et par une ou deux couches pour les masses volumiques intermédiaires et élevées à cause de l'amélioration constatée (Figure V.6).

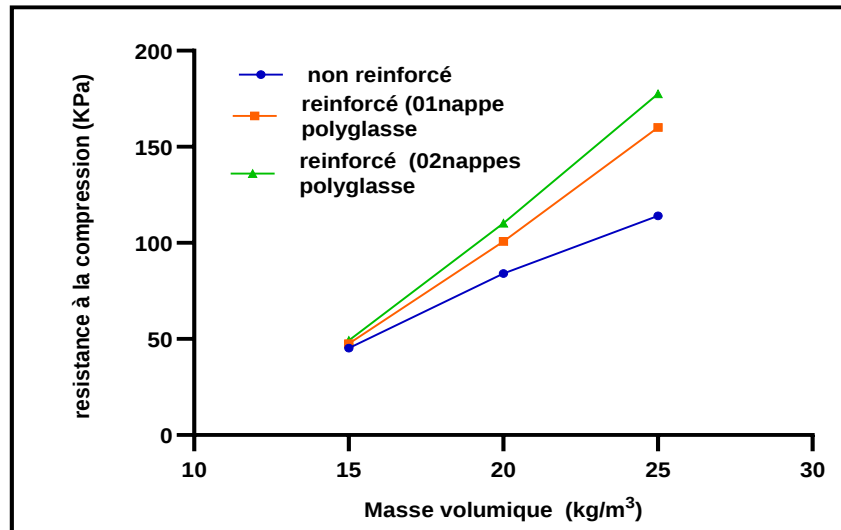


Figure V.5 : L'évolution de la résistance en fonction du renforcement à différentes masses volumiques pour des cubes de 50mm.

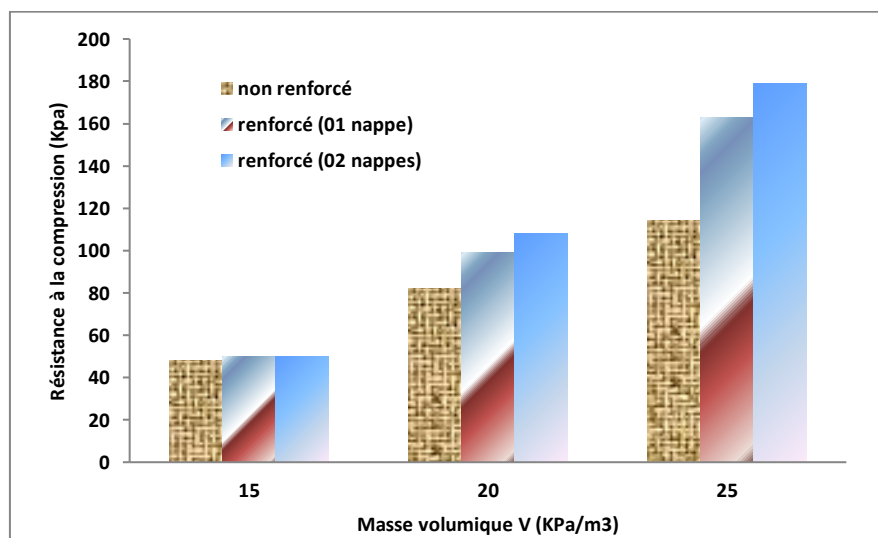


Figure V.6. Etat comparatif (Différence) de résistance à la compression à différentes masses volumiques (cubes 50mm)

V.2.4 Evolution du module d'élasticité pour l'ensemble des cas étudiés

Afin d'évaluer le module d'élasticité à partir des courbes contrainte-déformation (présentées précédemment) et de voir son évolution en fonction des paramètres étudiés (masse volumique, taille, immersion dans l'eau et renforcement), il est indispensable d'utiliser une méthode théorique basée sur le tâtonnement ou la corrélation [170, 171]. Pour la phase élastique de la courbe, l'échelle de déformation est divisée en intervalles uniformes ($\Delta\epsilon$) et pour chaque intervalle, une valeur de contrainte correspondante ($\Delta\sigma$) est mesurée.

Le rapport ($\Delta\sigma/\Delta\epsilon$) est ensuite calculé, représentant le module élastique de Young (E). De cette manière, nous pouvons tracer l'évolution de ce module (E) en fonction de la masse volumique. Ce module élastique du polystyrène expansé (EPS) a une valeur constante dans la région élastique linéaire. Le tableau V.2, résume les valeurs du module d'élasticité à différentes masse volumique pour l'ensemble des cas étudiés.

Tableau V.2 : Evolution du module E pour l'ensemble des essais

Masse volumique	Module d'élasticité E (KPa)					
	Section 50mm ³	Section 100mm ³	Section 150mm ³	Submerged 50mm ³	Reinf ^(*) 1nappe Polyglass	Reinf ^(*) 2 nappes Polyglass
15 kg/m ³	822	2200	2300	2530	965	1165
20 kg/m ³	1600	3720	5360	3910	1750	1760
25 kg/m ³	2637	5430	7900	5000	2835	4320

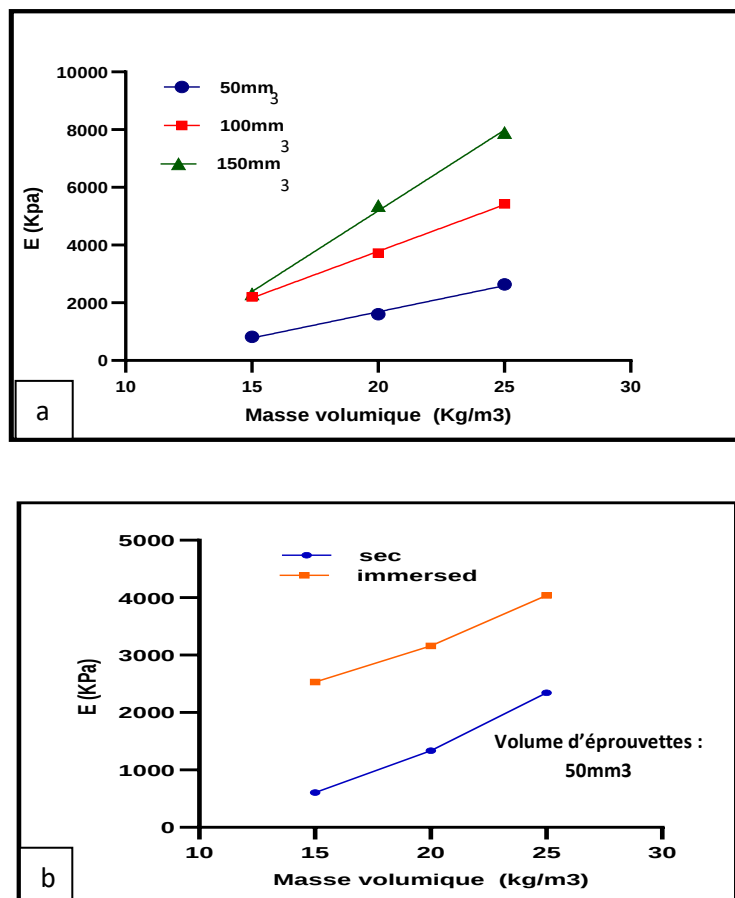
En comparant les valeurs obtenues, pour toutes les tailles (ou volumes) (Figure V.7 (a)), on constate que, pour la cubede 50 mm³ et, le taux d'augmentation (par rapport à la masse volumique 15Kg/m³), est de : 95% et 220% pour les masses volumiques de 20Kg/m³ et 25Kg/m³ respectivement, alors que l'augmentation est un peu moins pour le cube 100mm³, avec des taux de : 69% et 149%, pour les masses volumiques de 20Kg/m³ et 25Kg/m³ respectivement. En ce qui concerne le cube 150mm³, les taux sont beaucoup plus élevés et sont de : 133% et 243,5%, pour les masses volumiques 20Kg/m³ et 25Kg/m³ respectivement. Par conséquent, l'augmentation du module d'élasticité entre les éprouvettes de 50 mm³ et ceux de 150 mm³ varie respectivement de 179 % pour la masse volumique de 15 kg/m³, de 235 % pour une masse volumique de 20 kg/m³ et de 200 % pour une densité de 25 kg/m³.

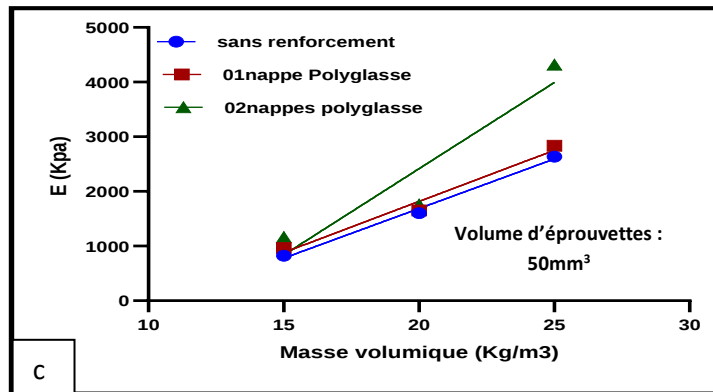
La teneur en eau (immersion dans l'eau) a un effet positif sur le module de Young (E), en l'augmentant, comme illustré dans la Figure V.7 (b). Cet effet est particulièrement notable pour l'éprouvette moins dense (D15), ce qui pourrait s'expliquer par une rigidité accrue due à l'eau absorbée et libérée lors de l'écrasement. Dans la Figure V.7 (c), on observe que le

renforcement avec deux couches de géo-membrane entraîne un module d'élasticité plus élevé, en fonction de la masse volumique.

En effet, un gain de 63.8 % pour le renfort bicouche et seulement 7,5% pour le renfort monocouche et ce, pour la masse volumique de 25 kg/m^3 . Cette grande différence peut être justifiée par le fait que lorsque la masse volumique du polystyrène dépasse 20 kg/m^3 , le renforcement avec d'autres matériaux sera plus efficace.

On peut conclure, que les échantillons ayant une masse volumique plus élevée et un renforcement suffisant par la Géo-membrane "Polyglass", ou autre type, peuvent être utilisés comme solution alternative pour faire face à la faible capacité portante des remblais légers [172].





Figures V.7: Évolution du module élastique en fonction de la masse volumique à différentes condition : (volume, état immergé et type de renforcement).

V.2.5 influence de la forme d'éprouvettes sur résistances à la compression ($\sigma_{1\%}$, $\sigma_{5\%}$, et $\sigma_{10\%}$).

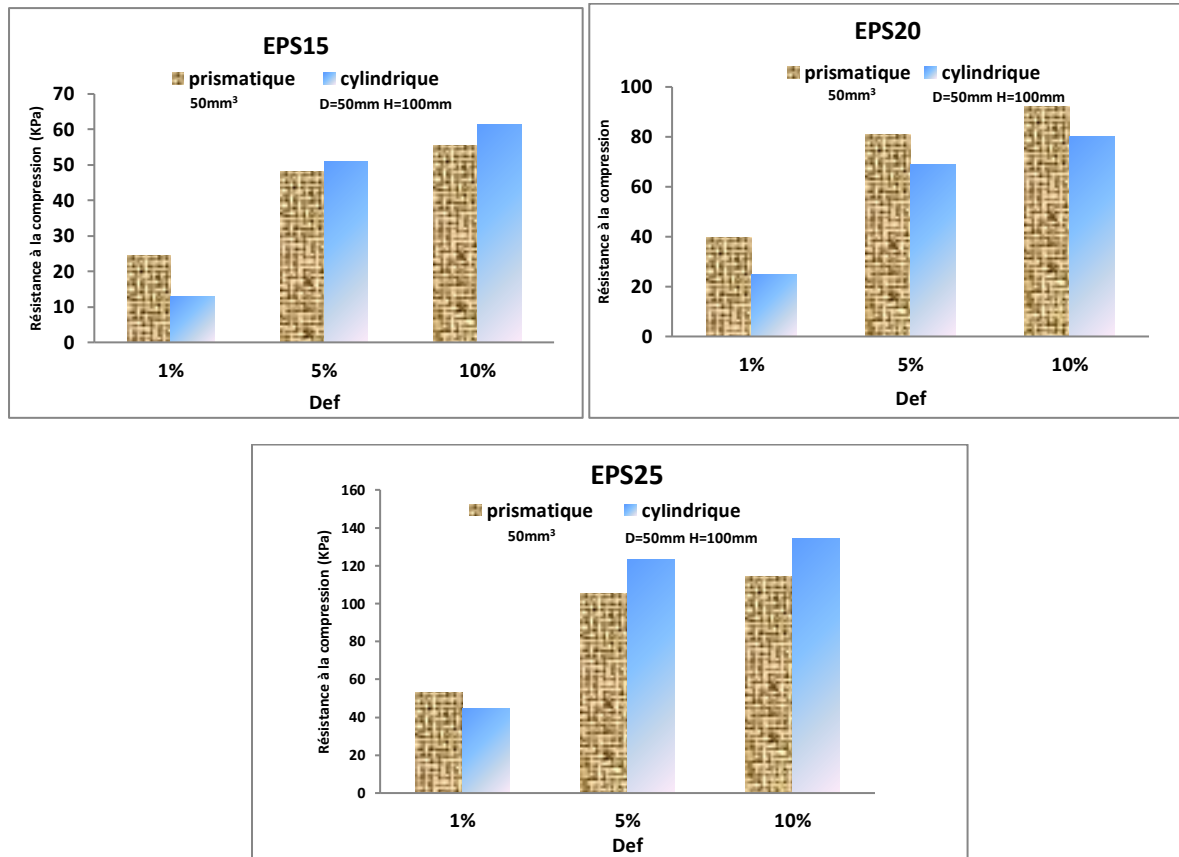
Les figures : V.9 (a), V.9 (b) et V.9 (c), donnent des représentations graphiques (histogrammes), de la plage de résistance à la compression ($\sigma_{1\%}$, $\sigma_{5\%}$ et $\sigma_{10\%}$), pour des éprouvettes prismatiques de 50 mm³ et des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur, constants, pour les trois masses volumiques 15Kg/m³, 20Kg/m³ et 25Kg/m³ (Figure V.8).



Figure V.8 : Eprouvettes cylindriques

Les graphes montrent que les valeurs de résistance de déformation augmentent avec l'augmentation des niveaux de déformation et de la masse volumique. Seulement lorsque le taux de déformation est de 1%, les valeurs de résistance à la compression des éprouvettes sous forme prismatique sont supérieures à celles des échantillons sous forme cylindrique pour l'ensemble des masses volumiques, et la proportion de cette augmentation diminue avec une masse volumique plus élevée. En revanche, pour les autres niveaux de déformation (5% et 10%), il apparaît que les valeurs de contrainte ne dépendent pas de la forme de l'échantillon.

Ainsi, la forme de l'échantillon ne gouverne pas son comportement sous les conditions de charge axiale non confinée. Par conséquent, la résistance à la compression ne dépend pas tant de la forme de l'éprouvette que de la masse volumique et du niveau de déformation.



Figures V.9: Représentation graphique des résistances à la compression ($\sigma_{1\%}$, $\sigma_{5\%}$ et $\sigma_{10\%}$) pour des éprouvettes prismatique et cylindrique à différentes masses volumique.

V.2.6 Comparaison du comportement contrainte- déformation entre état sec et après immersion

Pour plus de détail, concernant la comparaison du comportement, en terme de contrainte-déformation, des éprouvettes confectionnées et écrasées en état sec et d'autres confectionnées et écrasées après immersion dans l'eau, pendant 30 jours, et ce pour les masses volumiques 15Kg/m³, 20Kg/m³ et 25Kg/m³, la figure V.10, illustre les courbes obtenues qui nous ont de constater que le même comportement élasto-plastique et que les éprouvettes écrasées après immersion dans l'eau ont montrés une résistance encore meilleure aux déformations par rapport à l'état sec.

Les valeurs de résistance à la compression dans le cas des éprouvettes écrasées après immersion sont également supérieures à celles à l'état sec, grâce au rôle joué par la quantité d'eau absorbée qui augmente sensiblement la rigidité, en particulier dans la phase élastique. Cette petite amélioration peut être expliquée par la contre-pression générée lorsque l'eau sort

de l'éprouvette pendant la compression. Les courbes indiquent également que l'immersion dans l'eau a une influence négligeable sur le comportement contrainte-déformation si la masse volumique est égale à 20 kg/m^3 ou plus. En conclusion, ces observations montrent que l'EPS géomousse utilisé dans les remblais légers ne subit pas de modification significative de son comportement contrainte-déformation lorsqu'il est immergé dans l'eau, en raison de la faible quantité absorbée.

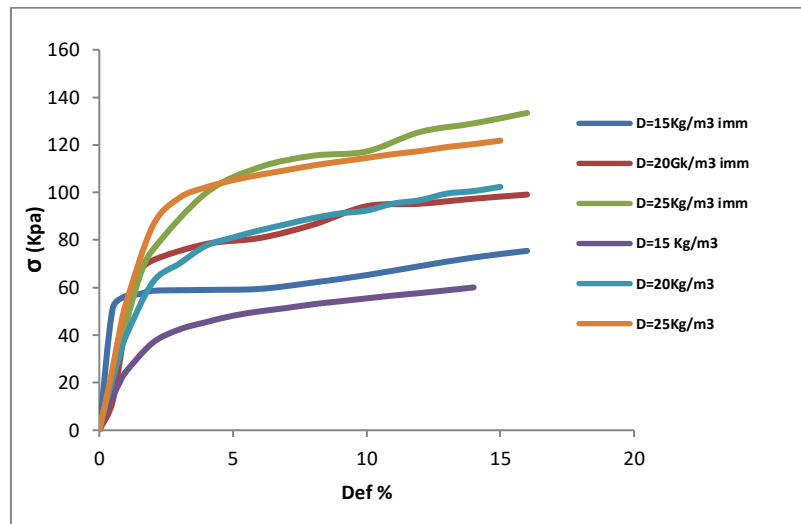


Figure V.10: Courbes contraintes – déformation (état sec et après immersion) pour des cubes de 50mm

V.2.7. Étude comparative de la résistance à la compression entre l'état sec et après immersion à différents niveaux de déformation.

Dans cette partie d'étude, notre objectif était de comparer les plages de résistance à la compression correspondantes aux valeurs de déformation de 1%, 5% et 10% pour les éprouvettes écrasées à l'état sec et après immersion à différentes masses volumiques. Les figures V.11 (a), V.11 (b) et V.11 (c), illustrent les courbes et mettent en évidence que la résistance à la compression dans l'état immergé est supérieure à celle de l'état sec pour tous les niveaux de déformation, avec un écart réduit à mesure que la masse volumique augmente. Les courbes de la figure V.11 (d), révèlent que la résistance augmente rapidement lorsqu'on passe de 1% à 5% de déformation, mais cette augmentation est moins significative lorsque la déformation est de 5% et qu'on passe à 10%. De plus, pour les masses volumiques de 20 kg/m^3 et 25 kg/m^3 , les courbes sont presque identiques. En revanche, pour la masse volumique de 15 kg/m^3 , les valeurs de résistance en état immergé sont supérieures à celles de l'état sec, surtout au niveau de 5% et 10% de déformation.

En somme, ces résultats démontrent que l'immersion dans l'eau améliore la résistance à la compression de l'EPS géomousse, avec des différences significatives observées à des masses volumiques plus faibles.

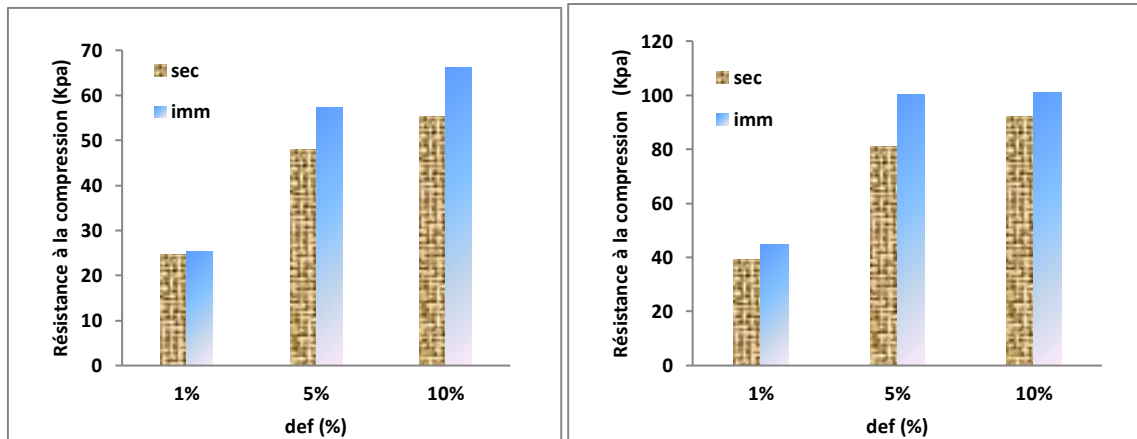


Figure V.11 (a) : Contrainte-déformation (D15) Figure V.11 (b) : Contrainte-déformation (D20)

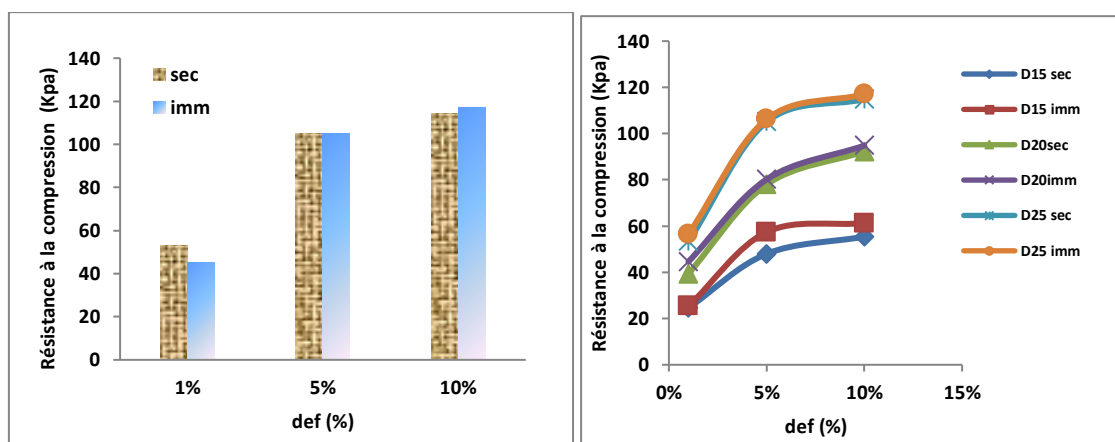


Figure V.11 (c) : Contrainte-déformation (D25) Figure V.11 (d) : Etat comparatif (Cont- défor.)

Figures V.11 : Évolution de résistance à la compression correspondante (1%, 5% et 10%) de déformation en état sec et état immergé en fonction de masse volumique pour des cubes de 50mm.

V.3 Étude du comportement au fluage sous charge statique

Les résultats, montrant l'évolution de la déformation verticale, au fil du temps, pour les trois niveaux de charge : 30%, 50% et 70% de la résistance à la compression ($\sigma_{10\%}$) que la figure V.13 illustre. Les courbes obtenues montrent que les déformations initiales sont respectivement : 0,5 %, 1 % et 1,3 %, respectivement, pour les niveaux de charge de 30%, 50% et 70%, concernant la compression $\sigma_{10\%}$. Les déformations finales (après la fin de la période de chargement), sont quant à elles de 0,9 %, 1,8 % et 3,2 % pour les mêmes niveaux de charge étudiés (Figure V.14).

En outre, la figure V.13, permet d'observer que dans le cas de charges équivalentes à 70% de $\sigma_{10\%}$, la déformation augmente rapidement, s'accélère et continue à augmenter par rapport aux cas de charges de 30% et 50% de $\sigma_{10\%}$. Cela signifie que si la géomousse est soumise à des charges supérieures à 50% de la résistance à la compression, des déformations de fluage plus importantes se produisent. En revanche, pour des niveaux de contrainte

inférieurs à 50% de $\sigma_{10\%}$, la géomousse EPS présente une déformation de fluage insignifiante. Ces mêmes conclusions ont été obtenues par des auteurs [175, 176]. Enfin, il est à noter que la déformation par fluage était négligeable pour l'échantillon soumis de 30 % de la résistance à la compression ($\sigma_{10\%}$).

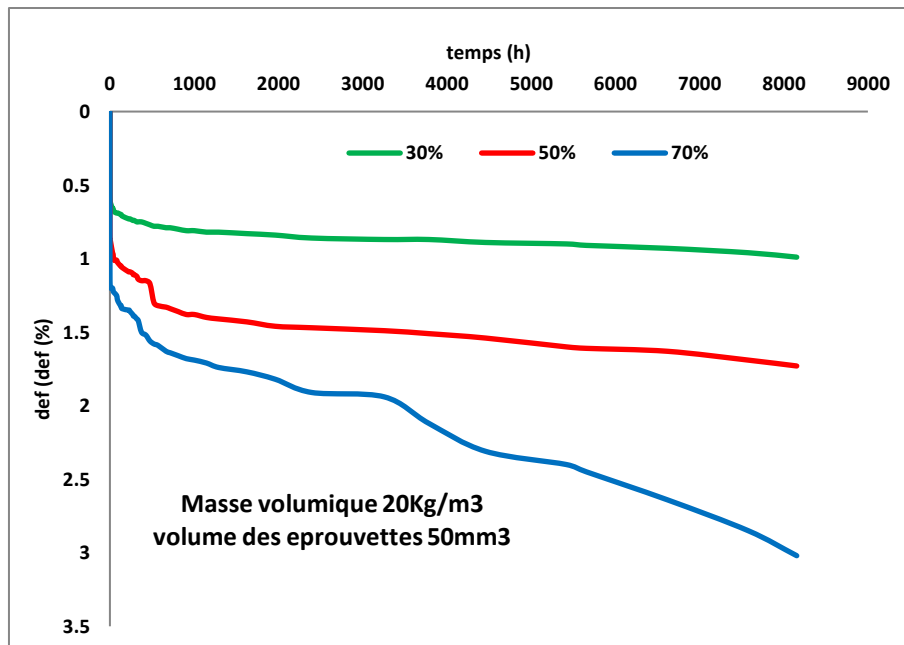


Figure V.12 : Comportement déformation – temps à différents taux de chargement

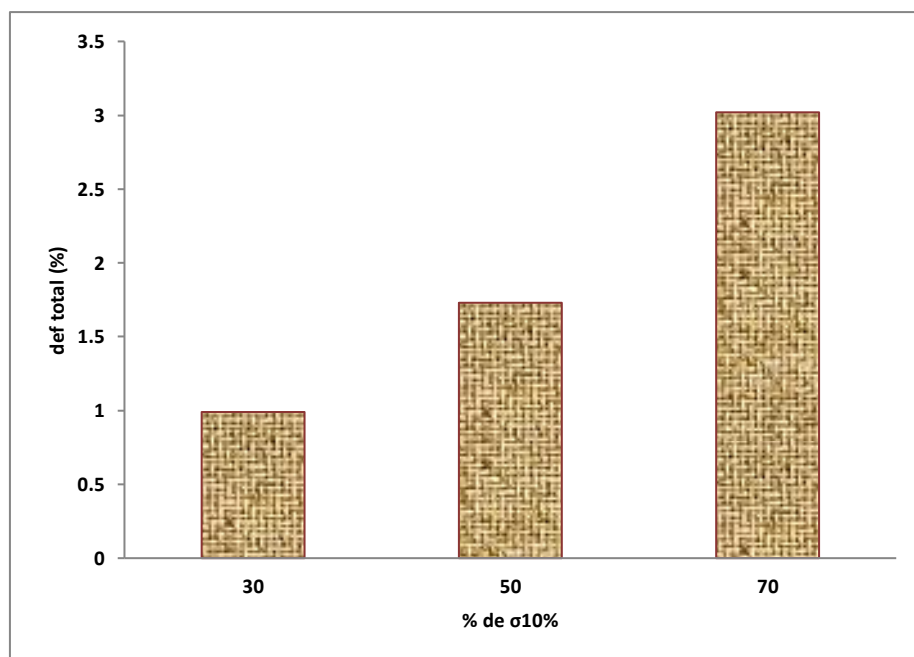


Figure V.13 : Déformation globale pour chaque parentage de chargement

V.4. Etude de comportement triaxial

V.4.1 Discussion des résultats

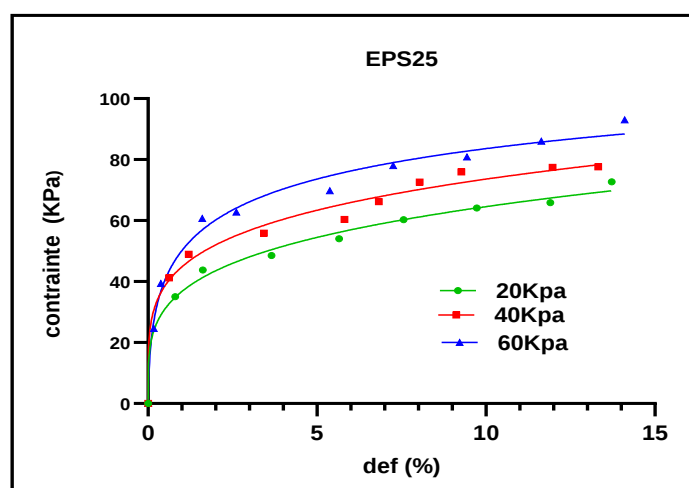
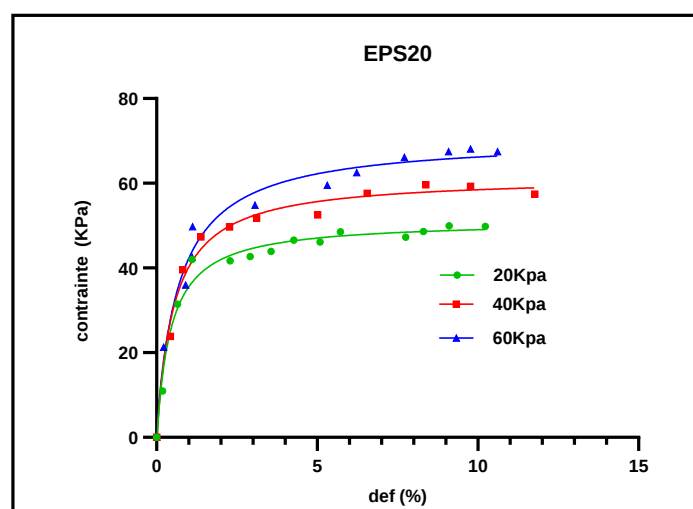
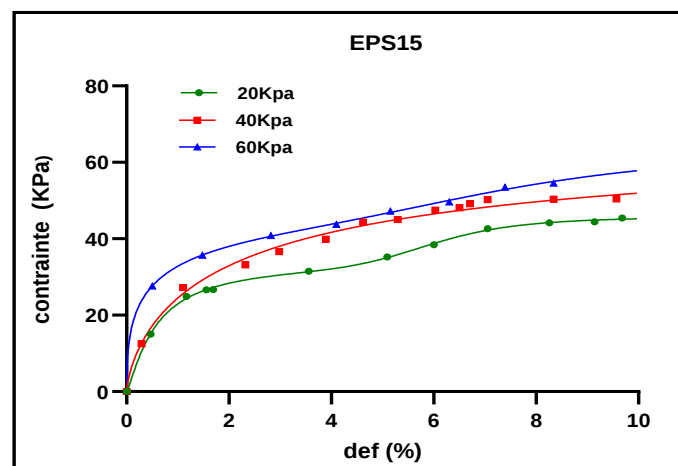
Les courbes de contrainte-déformation normalisées ont été tracées sur la figure V.16, montrant la relation entre la contrainte de cisaillement déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$) et la déformation. Les résultats obtenus indiquent une forte corrélation entre la densité et la contrainte de confinement avec la relation contrainte-déformation. Lorsque la masse volumique et la contrainte de confinement augmentent, la contrainte axiale et le module tangentiel initial augmentent également, sans aucune observation de surface de rupture.

Pendant la compression des échantillons, une expansion latérale suivie d'une torsion longitudinale s'est produite, les échantillons de masse volumique plus faible ont subi une plus grande déformation. Cette tendance a été observée pour toutes les masses volumiques et pressions de confinement appliquées (Figure V.15).



Figure V.14 : Etat d'écrasement des éprouvettes sous compression triaxial

Les courbes contrainte diviatorique -déformation, représentées sur les figures V.16 (a), V.16 (b) et V.16 (c), montrent un comportement linéaire jusqu'à 2% de déformation à différentes masses volumiques (15 kg/m^3 , 20 kg/m^3 et 25 kg/m^3) et à différentes pressions de confinement (20KPa, 40KPa et 60KPa). Ce comportement est fortement influencé par la masse volumique, avec une influence mineure de la pression cellulaire appliquée dans la phase élastique. Dans la plage de déformation de 0 à 1%, les courbes sont presque similaires, mais cette influence devient significative dans la phase plastique. De plus, les pressions cellulaires ont un effet différent selon la masse volumique, et la valeur de la contrainte limite d'élasticité augmente sensiblement pour les cas de 15 kg/m^3 et 20 kg/m^3 , tandis que pour le cas de 25 kg/m^3 , cette augmentation est un peu plus progressive avec la pression cellulaire appliquée.



Figures V.15 : Relation contrainte-déformation à différentes masses volumiques pour des éprouvettes de dimension D=50mm et H=100mm.

Les paramètres de résistance ont été calculés pour les différentes masses volumiques, à partir des cercles de Mohr, illustrées dans les trois figures : V.17 (a), V.17 (b) et V.17 (c). Les valeurs de cohésion et d'angle de frottement interne obtenues sont présentées dans les tableaux V.3, V.4 et V.5.

Tableau V.3 : les résultats des essais triaxiaux pour la masse volumique 15 kg/m³

σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$\epsilon(\%)$	Eti (Kpa)	C (kPa)	ϕ (°)
20	62,6	42,6	6,1	1.41	13,82	11,54
40	83,8	43,8	9,26	1.82		
60	118,7	58,7	12,36	3.82		

Tableau V.4 : les résultats des essais triaxiaux pour la masse volumique 20 kg/m³

σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$\epsilon(\%)$	Eti (Kpa)	C (kPa)	ϕ (°)
20	74,4	54,4	6,5	3.41	22,62	7,33
40	96,2	56,2	7,32	4.14		
60	125,3	65,3	9,02	4.44		

Tableau V.5 : les résultats des essais triaxiaux pour la masse volumique 25 kg/m³

σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	$\epsilon(\%)$	Eti (Kpa)	C kPa	ϕ (°)
20	89,1	69,1	12,59	4.38	27,59	11,3
40	114	74	17,86	6.65		
60	148,9	88,9	20,93	10.36		

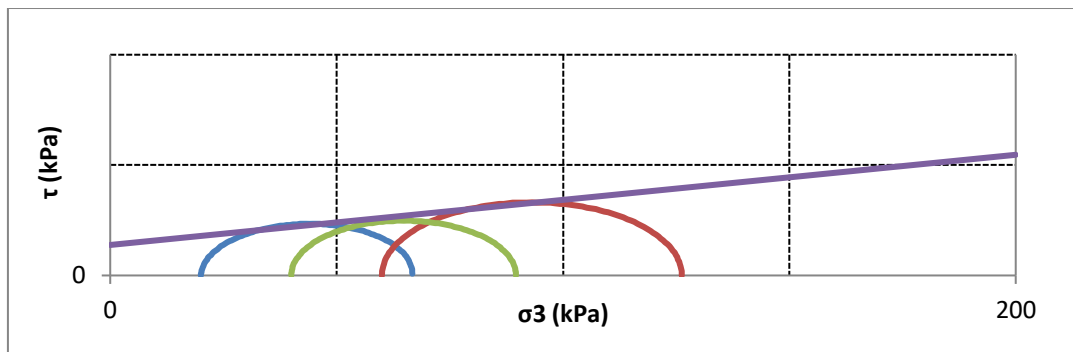


Figure V.16 (a) : Paramètres de résistance à partir des cercles de Mohr (D15)

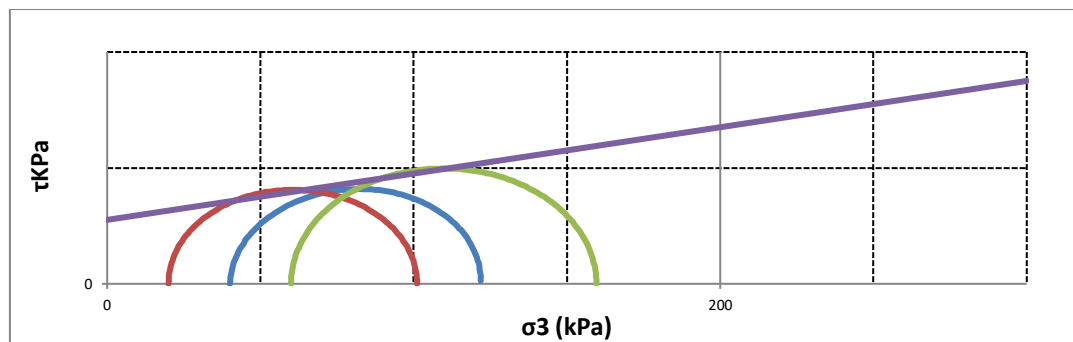


Figure V.16 (b) : Paramètres de résistance à partir des cercles de Mohr (D20)

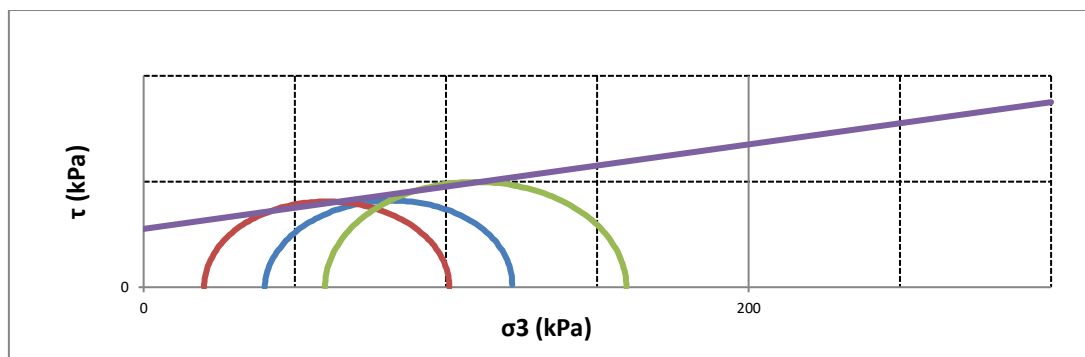


Figure V.16 (c) : Paramètres de résistance à partir des cercles de Mohr (D25)

Les résultats obtenus révèlent que la cohésion constitue un paramètre déterminant contribuant de manière significative à la résistance au cisaillement de l'EPS géomousse. Sa valeur varie sensiblement en fonction de la masse volumique, ce qui souligne son rôle clé dans les propriétés mécaniques du matériau. En revanche, l'angle de frottement interne semble indépendant des variations de masse volumique de l'EPS, suggérant une stabilité de ce paramètre dans ce contexte. L'analyse détaillée de l'évolution de la contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$), de la contrainte de confinement (σ_3), de la cohésion (C) et du module tangentiel initial (E_{ti}) en fonction de la masse volumique met en évidence que l'optimisation de la masse volumique constitue un levier essentiel pour améliorer les performances mécaniques de l'EPS.

géomousse. Ces observations apportent des perspectives précieuses pour les applications nécessitant un contrôle rigoureux des propriétés mécaniques de ce matériau.

La relation entre la contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$) et la contrainte de confinement (σ_3) (figure V.18 (a)) apparaît linéaire et légèrement croissante, indiquant une augmentation de la contrainte déviatorique avec la masse volumique, particulièrement lorsqu'une masse volumique élevée est atteinte. L'analyse de la relation entre le module tangent initial E_{ti} et la contrainte de confinement σ_3 (figure V.19) montre que le module tangent initial croît avec l'augmentation de la masse volumique. Cette augmentation est particulièrement marquée lorsque la pression cellulaire atteint 60 kPa pour l'EPS présentant une masse volumique plus élevée. Pour des masses volumiques inférieures ou égales à 20 kg/m³, la croissance du module reste modérée. En revanche, lorsque la masse volumique atteint 25 kg/m³, le module tangent initial évolue de manière plus significative en fonction de la pression cellulaire, traduisant un comportement mécanique sensiblement différent dans ce cas.

Nous observons également que pour $\sigma_3 = 20$ KPa, les valeurs de E_{ti} sont presque similaires lorsque la masse volumique est inférieure ou égale à 20 kg/m³, et lorsque $\sigma_3 = 60$ KPa, les valeurs de E_{ti} sont également presque similaires lorsque la masse volumique est supérieure ou égale à 20 kg/m³. En outre, les valeurs de ce module tangent initial obtenues par les essais triaxiaux ne sont pas très différentes par rapport aux valeurs déterminées par les essais de compression non confinés.

La courbe illustrée dans la (figure V.18 (b)), montre la relation entre les valeurs de cohésion et la masse volumique de l'EPS géomousse. Une analyse de régression a été effectuée pour différentes masses volumiques d'EPS géomousse et a permis d'ajuster une courbe qui est mieux décrite par l'équation 12.

$$Y = 1.377x - 6.196 \dots \dots \dots (12)$$

Avec : $Y = C'$ (cohésion en Kpa) , et $X = \rho$ masse volumique en kg/m³)

En examinant la courbe, on peut observer que la cohésion augmente plus rapidement dans la plage de la masse volumique allant de 15 kg/m³ à 20 kg/m³, comparé au passage de 20 kg/m³ à 25 kg/m³.

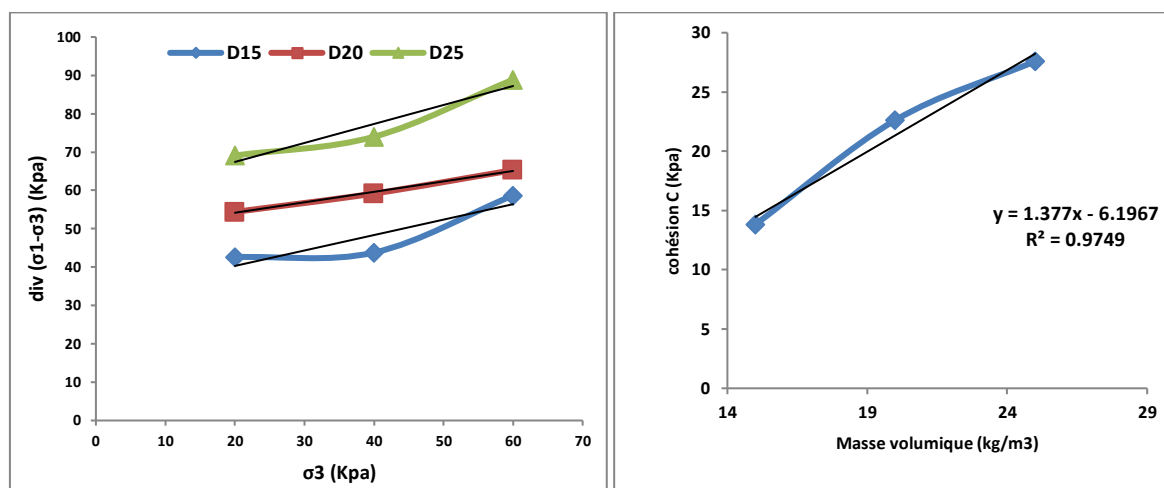


Figure V.17 : a/Relation contrainte déviatoire ($\sigma_1 - \sigma_3$) avec la contrainte de confinement (σ_3). b/ Relation de la cohésion C (Kpa) en fonction la masse volumique.

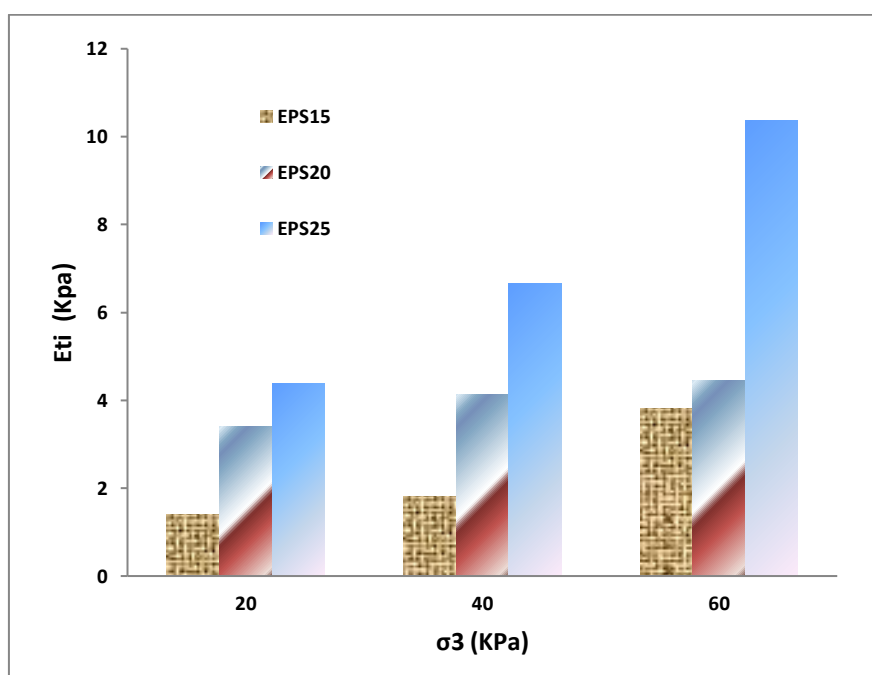


Figure V.18 : Variation du module E_{ti} (KPa) en fonction de la contrainte σ_3

Conclusion

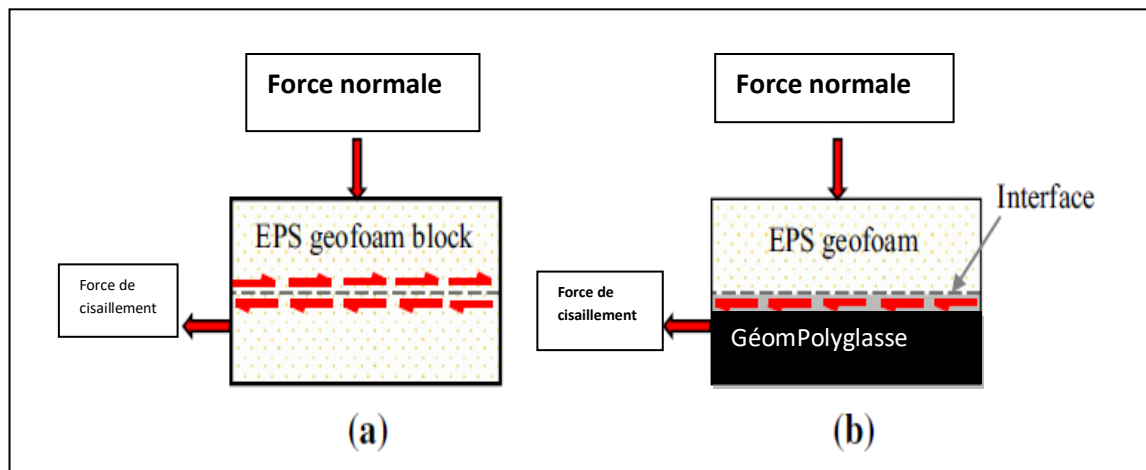
Dans cette section dédiée à la recherche expérimentale, des essais de compression uni-axiale et triaxiale, ont été réalisés afin d'analyser l'impact de la masse volumique sur divers paramètres mécaniques, notamment la résistance à la compression, le module d'élasticité, la contrainte de confinement, la cohésion et l'angle en tenant compte de différentes conditions expérimentales. Ces conditions incluent la taille et la forme des échantillons, l'immersion dans l'eau, ainsi que le renforcement par une géomembrane de type Polyglasse. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- La résistance à la compression est fortement influencée par la masse volumique et le volume des éprouvettes, tandis que la forme des éprouvettes n'a pas d'impact significatif sur son évolution. En condition d'immersion, la résistance est nettement supérieure à celle mesurée à l'état sec, grâce à une augmentation perceptible de la rigidité, particulièrement prononcée dans la phase élastique. Par ailleurs, le renforcement des blocs de polystyrène par la géomembrane Polyglasse améliore sensiblement les valeurs de résistance, surtout lorsque le polystyrène (EPS) présente une masse volumique élevée.
- La relation contrainte-déformation de l'EPS est influencée par sa masse volumique et la contrainte de confinement. À mesure que ces deux paramètres augmentent, la contrainte déviatorique et le module tangentiel initial augmentent également. Par ailleurs, dans la plage de déformation comprise entre 0 et 1 %, pour un EPS ayant la même masse volumique, la relation contrainte-déformation demeure pratiquement identique, quel que soit le niveau de pression cellulaire.
- L'étude révèle que la cohésion évolue en fonction de la masse volumique, tandis que l'angle de frottement semble rester insensible à ces variations.

V.5 Evolution de la résistance au cisaillement direct.

V.5.1 Introduction

Dans cette partie, l'étude se concentrera sur l'évolution de la résistance au cisaillement direct de monobloc EPS et renforcé par la géomembrane de type Polyglass. Pour cela, une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée afin d'évaluer la résistance au cisaillement et les paramètres d'interface de trois masses volumiques de la mousse (15Kg/m^3 , 20Kg/m^3 et 25Kg/m^3) de polystyrène expansé. Au total, 54 tests ont été effectués, dont 27 tests sur des monoblocs EPS et 27 tests de cisaillement interagissant avec Polyglass. La figure V.20, illustre de manière schématique le principe des essais de cisaillement direct sur les monoblocs d'EPS ainsi que des essais de cisaillement directe interagissant avec Polyglass, en montrant la répartition des forces de contraintes sur chaque bloc de polystyrène EPS.



Figures V.19. Représentation des essais de cisaillement direct et cisaillement direct EPS/Polyglass

V.5.2 Cisaillement directe de monobloc d'EPS

Dans les essais de cisaillement direct, un seul échantillon de polystyrène, appelé "monobloc", est soumis à une force de cisaillement à différentes contraintes normales de 50KPa, 100KPa et 150 KPa. La Figure V.21, ci-après, illustre l'état des échantillons après le cisaillement pour les masses volumiques de 15kg/m^3 , 20kg/m^3 et 25 kg/m^3 :



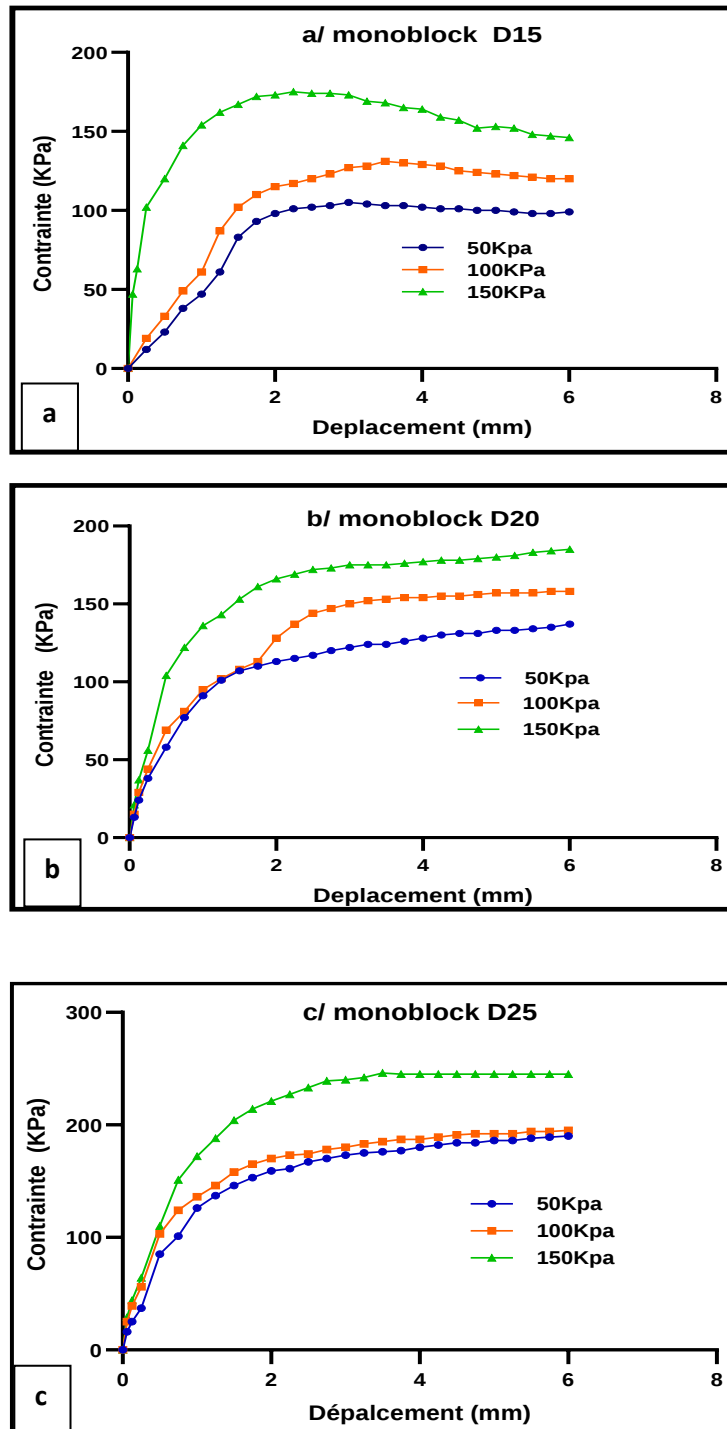
Figure V.20 : Etats des échantillons après cisaillement directe de mono-bloc EPS

Les résultats des différents essais effectués ont permis de déterminer les paramètres de cisaillement, la cohésion C , l'angle de frottement (ϕ), ainsi que le facteur de cisaillement (G), qui sont présentés dans le tableau V.6 ci-dessous. Les paramètres de cisaillement direct du polystyrène EPS sous différentes masses volumiques, ainsi que les courbes contrainte de cisaillement-déplacement (Figures V.22 (a,b et c)), révèlent une évolution très croissante de la résistance au cisaillement lorsque les déplacements se situent entre 0 et 2mm.

Tableau V.6 : Paramètres de cisaillement obtenus par essai de cisaillement direct

Densité	Caractéristiques mécaniques		Résistance au cisaillement (kPa)			Facteur de cisaillement (G)		
	C(kpa)	Angle φ		Contraint Normale σ (KPa)				
			50	100	150	50	100	150
D15	65	29.2	105	131	173	2.1	1.31	1.16
D20	110	25.6	131	158	185	2.62	1.58	1.23
D25	150	41.3	150	175	195	3.02	1.75	1.3

L'évolution, se réduit après la limite élasto-plastique (pic). Cependant, pour les éprouvettes possédant une masse volumique faible (15kg/m^3) soumises à une charge de 150 KPa, les courbes augmentent pour atteindre une limite de 170 KPa, puis se réduisent sensiblement jusqu'aux valeurs résiduelles. Pour les éprouvettes possédant les masses volumiques (20kg/m^3 et 25 kg/m^3), au-delà de la phase élasto-plastique, les courbes présentent des paliers inclinés en augmentation, avec des valeurs atteignant respectivement 175 KPa pour (20kg/m^3) et 250 KPa pour (25 kg/m^3).

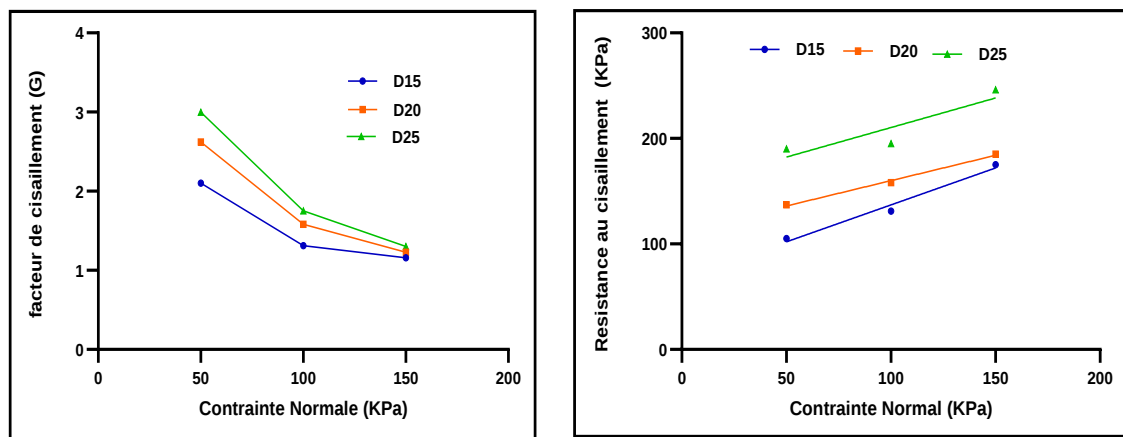


Figures V.21: Courbes de cisaillement- déplacement d'EPS monoblocà différentes masse volumique a/15Kg/m³, b/ 20Kg/m³ et c/ 25Kg/m³

Les résultats obtenus montrent une diminution significative du facteur de cisaillement (G), défini comme le rapport entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale [(A. H. Padade & J. N. Manda)/ (MuhammadImran Khan^{1,2} · Mohamed A. Meguid¹ 2018)], à mesure que la charge axiale (contrainte normale) augmente, comme illustré dans la figure V.23 (a). Cette tendance est observée pour des masses volumiques de 25 kg/m³, 20 kg/m³ et

15 kg/m³, avec des réductions du facteur de cisaillement respectives de -56 %, -53 % et -45 % sous l'effet de l'augmentation de la charge axiale.

En revanche, la résistance au cisaillement augmente avec la masse volumique du polystyrène EPS, comme le montre la figure V.23 (b). Les taux d'augmentation de la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte axiale sont respectivement de 65 %, 42 % et 30 % pour des masses volumiques de 15 kg/m³, 20 kg/m³ et 25 kg/m³. Il convient également de souligner, comme indiqué dans le tableau V.6, qu'aucun plan de cisaillement net n'a été observé pour l'ensemble des éprouvettes, quelle que soit la masse volumique. Cependant, il est notable que l'adhérence (cohésion C) augmente de manière significative avec la masse volumique. En revanche, l'angle de frottement interne (ϕ) semble indépendant de la masse volumique, confirmant les conclusions de l'étude précédente[179].



Figures V.22 (a) et (b) : L'influence de la contrainte normale sur : **a/** le facteur de cisaillement (G) et **b/** la résistance au cisaillement τ (KPa)

V.5.3 Cisaillement direct renforcé EPS/Polyglasse

Les essais réalisés sur le bloc hybride, composé de polystyrène EPS et de géomembrane Polyglasse, avaient pour objectif d'analyser le comportement de l'interface entre ces deux matériaux en termes de frottement. Le tableau V.7, ci-dessous présente l'évolution des paramètres de cisaillement la cohésion C (KPa) et angle de frottement (ϕ), la résistance au cisaillement (τ) et le facteur de cisaillement (G) en fonction de la contrainte normale.

Les résultats indiquent que l'adhérence (cohésion C) entre ces deux matériaux augmente de manière proportionnelle à la masse volumique du polystyrène, avec des taux de 122,6 % (entre 15Kg/m³ et 25Kg/m³) et 109 % (entre 15Kg/m³ et 20Kg/m³). Par contre, l'angle de frottement (ϕ) est diminué de 10,5 % (entre 15Kg/m³ et 20Kg/m³) et de 44,5 % (entre 15Kg/m³ et 25Kg/m³). Les résultats indiquent également que l'inclusion de la géo-membrane Polyglasse entraîne une augmentation considérable de la résistance au cisaillement. De plus, l'incorporation de la géomembrane Polyglasse a modifié le mécanisme de résistance de la

géomembrane/polystyrène EPS, qui est passé d'un comportement cohésif à cohésif-frictionnel[180, 181].

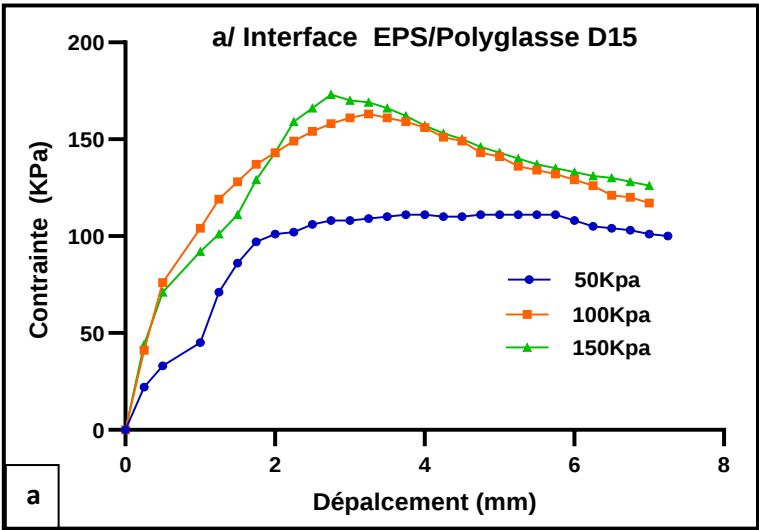
Les figures V.24 (a, b et c) illustrent le comportement contrainte de cisaillement – déplacement horizontal pour différentes masses volumiques. Elles mettent en évidence une augmentation notable de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal et de la charge axiale (contrainte normale). Les valeurs obtenues sont les suivantes :

- Pour une contrainte normale de 150 kPa : 173 kPa, 216 kPa et 256 kPa pour des masses volumiques de 15 kg/m³, 20 kg/m³ et 25 kg/m³, respectivement.
- Pour une contrainte normale de 100 kPa : 165 kPa, 193 kPa et 233 kPa pour les mêmes masses volumiques.
- Pour une contrainte normale de 50 kPa : 111 kPa, 185 kPa et 201 kPa.

Ces résultats soulignent l'influence combinée de la masse volumique, du déplacement horizontal et de la contrainte normale sur la résistance au cisaillement.

Tableau V.7 : Paramètres de cisaillement obtenus par essai de cisaillement directerenforcé

Densité	Caractéristiques mécaniques		Résistance au cisaillement (kPa)			Facteur de cisaillement (G)		
	C(kpa)	Angle φ		Contraint Normale σ (KPa)				
			50	100	150	50	100	150
D15	80.4	31.7	111	165	173	2.22	1.63	1.15
D20	168	28.8.	185	193	216	3.70	1.93	1.44
D25	179	17.6	201	233	256	4.02	2.33	1.70



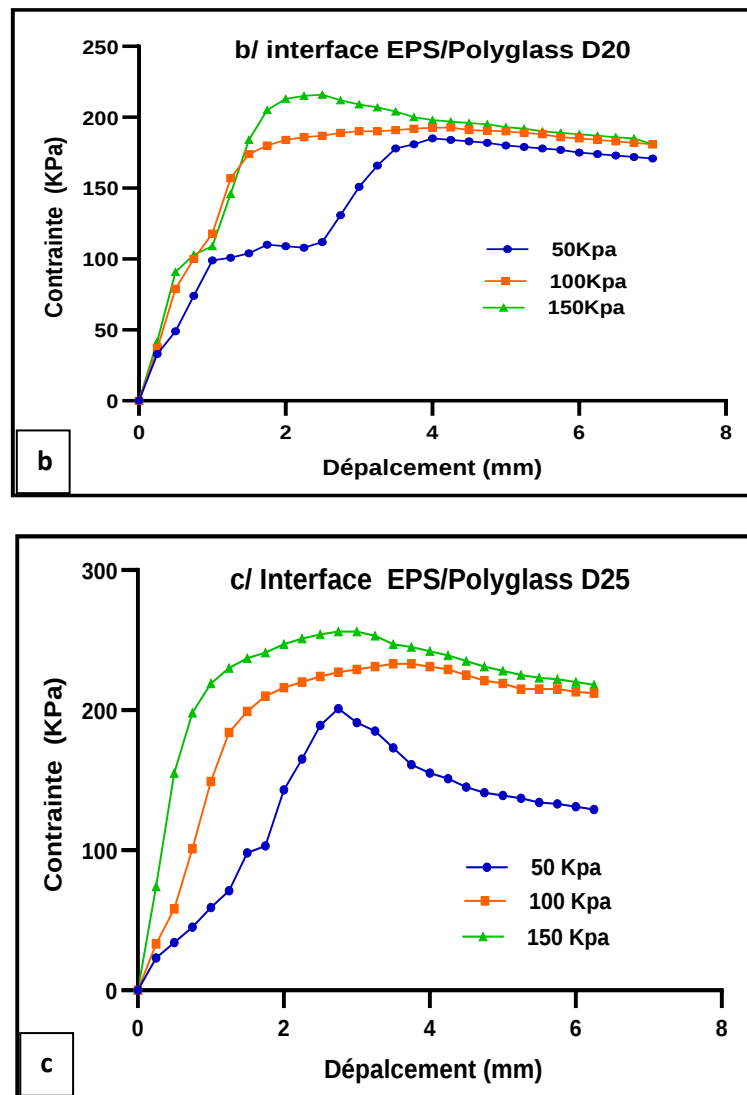
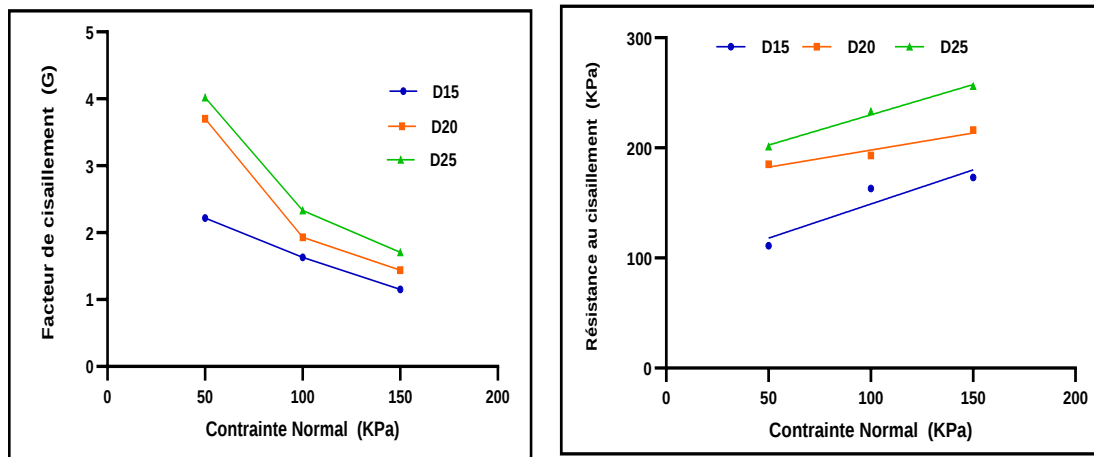


Figure V.23 (a,b,c) : Cisaillement-déplacement renforcé EPS/ Polyglasse

Les résultats précédents révèlent une diminution marquée du facteur de cisaillement ($\sqrt{G}$) à mesure que la contrainte normale augmente, comme le montre la figure V.25 (a). Cette diminution est quantifiée par des réductions de -58 %, -61,4 %, et -48 % pour des masses volumiques respectives de 25 kg/m³, 20 kg/m³ et 15 kg/m³.

En parallèle, la résistance au cisaillement montre une augmentation significative en fonction de la masse volumique du polystyrène, en particulier pour la masse volumique la plus élevée (25 kg/m³), comme illustré dans la figure V.25 (b). Les taux d'augmentation sont respectivement de 55 %, 16,8 % et 27,3 % pour des masses volumiques de 15 kg/m³, 20 kg/m³ et 25 kg/m³.

De plus, il convient de souligner que, conformément aux observations précédentes, une augmentation de la contrainte normale (charge axiale) s'accompagne également d'une élévation de la contrainte de cisaillement.



Figures V.24 (a,b) : Influence de la contrainte normale sur le facteur de cisaillement (G) la résistance au cisaillement (τ KPa)

V.5.4 Relation entre cisaillement directe et cisaillement directe renforcé EPS/Polyglasse

Les résultats des deux types d'essais de cisaillement (précédents), à savoir le cisaillement directe du monobloc EPS et le cisaillement directe interagissant avec la geomembrane Polyglasse, ont montré que les valeurs des paramètres suivants étaient supérieures pour le cisaillement renforcé par Polyglasse : la cohésion C (KPa), la résistance au cisaillement τ (KPa) et le facteur de cisaillement "G" (Tableau V.8). L'écart observé était respectivement de 19 %, 34 % et 16 % pour la cohésion, de 8 %, 25 % et 32 % pour la résistance au cisaillement et de 9 %, 29 % et 32 % pour le facteur de cisaillement G pour les masses volumiques de 15 kg/m^3 , 20 kg/m^3 et 25 kg/m^3 .

Tableau V.8 Comparaison (paramètres) : Essais cisaillement direct et cisaillement directe renforcé

Densité	C (Kpa)		τ (Kpa) (ave)*		Factur G (ave)*	
	Cisaillement directe	Cosaillement renforcé	Cisaillement directe	Cisaillement renforcé	Cisaillement directe	Cisaillement renforcé
D15	65	80,4	137	149,6	1,52	1,66
D20	110	168	158	198	1,81	2,35
D25	150	179	173,3	230	2,02	2,68

(ave)* : valeur moyenne

La figure V.26 (histogrammes), illustre le récapitulatif des résultats trouvés, en terme de paramètres de comparaison, pour les deux types d'essais de cisaillement direct renforcé et non renforcé, concernant les trois masses volumiques d'EPS.

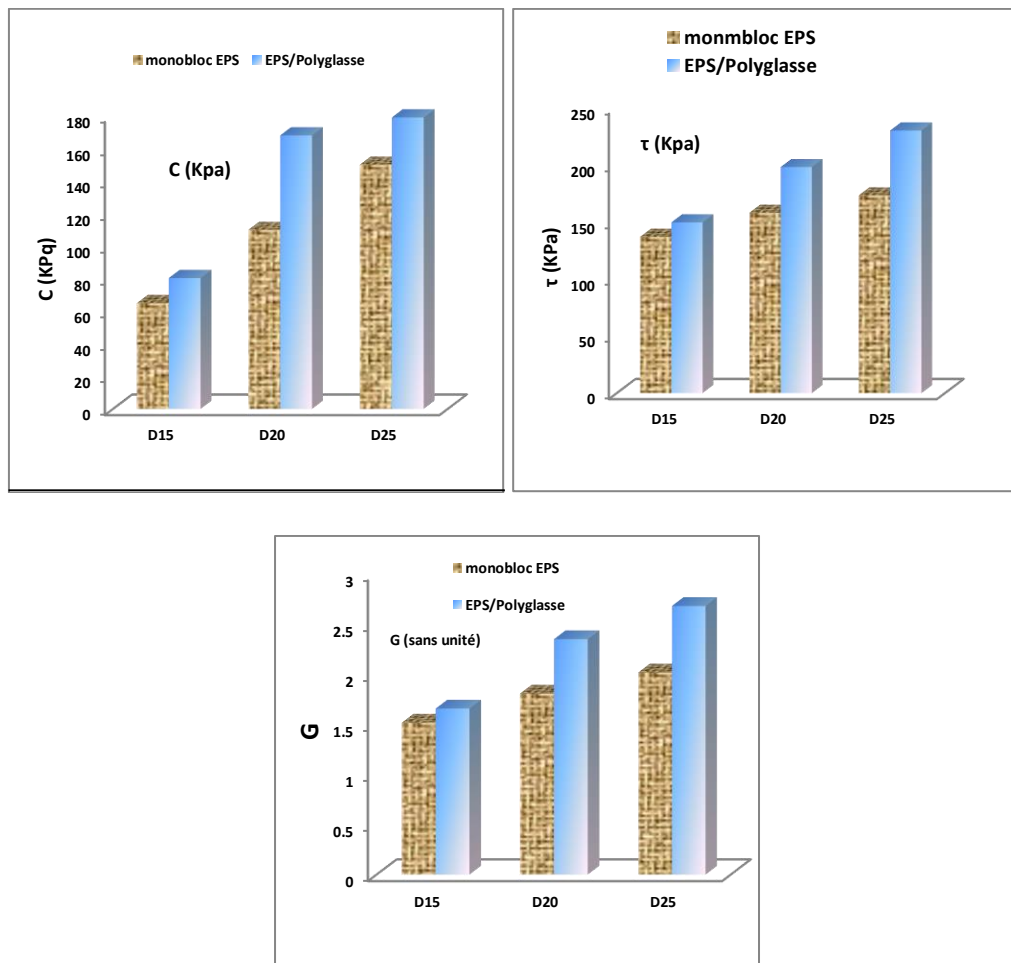


Figure V.25 : Comparaison paramétrique (C (KPa), τ (KPa) et G) entre le cisaillement directe d'EPS et cisaillement directe renforcé EPS/Polyglasse

Conclusion

Dans cette deuxième partie consacrée à la recherche expérimentale, des essais de cisaillement direct ont été effectués sur des monoblocs d'EPS, ainsi que sur leur interaction avec une géomembrane de type Polyglasse. Ces tests visent à évaluer l'impact de la masse volumique sur plusieurs paramètres mécaniques, notamment la résistance au cisaillement, la cohésion, l'angle de frottement et le facteur de cisaillement. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Les résultats obtenus montrent que la résistance au cisaillement ainsi que la cohésion (C , en kPa) augmentent avec l'accroissement de la masse volumique, que ce soit dans le cas du cisaillement de monoblocs ou de leur interaction avec la géomembrane Polyglasse. En revanche, le facteur de cisaillement (G) diminue dans les mêmes conditions.
- La comparaison entre les deux types d'essais révèle que la résistance au cisaillement, le facteur de cisaillement (G) et la cohésion (C , en kPa) obtenus lors des essais de cisaillement direct EPS/Polyglasse sont supérieurs à ceux mesurés lors des essais de cisaillement direct sur l'EPS seul. Cette amélioration peut être attribuée à la rugosité élevée de la géomembrane utilisée, qui influence positivement les performances mécaniques pour l'ensemble des masses volumiques étudiées.

Conclusion générale et recommandations

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDTIONS

Dans les tracés des projets routiers, on est souvent contraint de traverser des reliefs médiocres de faibles portances et surtout dans les zones à climats de grandes pluviométries, ce qui engendrent lors de leur exploitation, des problèmes géotechniques (tassements, tassement différentiels, glissements dangereux). En plus, l'utilisation des matériaux de remblais traditionnels ne favorisent pas la stabilité permanente de la chaussée routière et les dégradations naissent et se développent rapidement. La technique de remblais légers en polystyrène expansé semble être une solution alternative, qui permet de réduire (voire éliminer) ces dégradations et ce, en raison de ses caractéristiques mécaniques adéquates, tels que la résistance à la compression et au cisaillement. Cette recherche a fait l'accent sur l'étude du comportement mécanique d'un type de polystyrène fabriqué en Algérie et ce, dans des conditions de charge uni-axial et triaxial. Ainsi, cette étude a visé, en outre, l'évolution de sa résistance au cisaillement de polystyrène expansé et interagissant avec la géo-membrane (type Polyglasse).

Cette étude expérimentale porte sur l'analyse des propriétés mécaniques de monoblocs en polystyrène expansé (EPS) et de leur interaction avec une géomembrane de type Polyglasse. Pour ce faire, des essais de compression uni-axiale et triaxiale, ainsi que des essais de cisaillement direct, ont été réalisés. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de la masse volumique sur divers paramètres mécaniques, tels que la résistance à la compression, le module d'élasticité, la contrainte de confinement, la résistance au cisaillement, la cohésion, l'angle de frottement et le facteur de cisaillement. Ces essais ont été conduits en tenant compte de différentes conditions expérimentales, notamment : la taille et la forme des échantillons, l'immersion dans l'eau, et le renforcement par une géomembrane de type Polyglasse. Les principales conclusions de cette étude mettent en lumière l'influence de ces facteurs sur les performances mécaniques des matériaux étudiés. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- La résistance à la compression est fortement influencée par la masse volumique et le volume des éprouvettes, tandis que la forme des éprouvettes n'a pas d'impact significatif sur son évolution. En condition d'immersion, la résistance est nettement supérieure à celle mesurée à l'état sec avec un écart en fonction des masses volumiques 15Kg/m^3 ; 20Kg/m^3 , 25Kg/m^3 est de 16,1 KPa , 10,8 KPa et 3,2 KPa respectivement. Par ailleurs, le renforcement des blocs de polystyrène par la géomembrane Polyglasse améliore sensiblement les valeurs de résistance, avec un gain de 49% et 36%, respectivement pour (01) et (02) couches de renforcement par "polyglass" par rapport le cas non renforcé pour la masse volumique 25Kg/m^3 et de 9% et 13%, pour la masse volumique 20Kg/m^3 , et est négligeable pour le cas de la masse volumique de 15Kg/m^3 . Par conséquent, L'augmentation du module d'élasticité observée entre les échantillons de 50 mm^3 et ceux de 150 mm^3 varie significativement en fonction de la masse volumique. Cette augmentation est de 179 % pour une masse volumique de 15 Kg/m^3 , de 235 % pour 20 Kg/m^3 , et de 200 % pour 25 Kg/m^3 . Par ailleurs, l'utilisation d'un renforcement bicouche

avec une géomembrane se traduit par un module d'élasticité nettement supérieur, proportionnel à la masse volumique. Pour une masse volumique de 25 kg/m³, le renforcement bicouche permet un gain de 63,8 %, contre seulement 7,5 % pour un renforcement monocouche. Cette différence notable s'explique par le fait qu'à partir d'une densité de polystyrène de 20 kg/m³, le renforcement par des matériaux supplémentaires devient particulièrement efficace, renforçant significativement les propriétés mécaniques du matériau.

- Les résultats montrent que la déformation verticale évolue avec le temps pour les trois niveaux de charge, à savoir 30 %, 50 % et 70 % de ($\sigma_{10\%}$). Ces déformations sont respectivement de 0,5 %, 1 % et 1,3 % au début du chargement, et atteignent 0,9 %, 1,8 % et 3,2 % en fin de chargement.
- Les résultats obtenus montrent que la résistance au cisaillement ainsi que la cohésion (C, en kPa) augmentent avec l'accroissement de la masse volumique, que ce soit dans le cas du cisaillement de monoblocs ou de leur interaction avec la géomembrane Polyglasse. En revanche, le facteur de cisaillement (G) diminue dans les mêmes conditions. Et la comparaison entre les deux types d'essais révèle que la résistance au cisaillement, le facteur de cisaillement (G) et la cohésion (C, en KPa) obtenus lors des essais de cisaillement direct EPS/Polyglasse sont supérieurs à ceux mesurés lors des essais de cisaillement direct sur l'EPS seul. L'écart observées étaient respectivement de 19 %, 34 % et 16 % pour la cohésion, de 8 %, 25 % et 32 % pour la résistance au cisaillement et de 9 %, 29 % et 32 % pour le facteur de cisaillement G pour les masses volumiques de 15 Kg/m³, 20 Kg/m³ et 25 Kg/m³. Cette amélioration peut être attribuée à la rugosité élevée de la géomembrane utilisée, qui influence positivement les performances mécaniques pour l'ensemble des masses volumiques étudiées.
- L'étude révèle que la cohésion évolue en fonction de la masse volumique, tandis que l'angle de frottement semble rester insensible à ces variations.

Cette étude a démontré que l'utilisation du polystyrène expansé renforcé par la géomembrane *Polyglasse* constitue une solution pertinente et fiable pour les infrastructures routières et autres plateformes d'infrastructures linéaires. Ce matériau, utilisé comme remblai léger sur des sols à faible capacité portante, présente des caractéristiques mécaniques remarquables qui justifient son adoption. Pour les futurs travaux de recherche, il serait pertinent d'approfondir l'analyse sous l'angle économique en réalisant des études comparatives technico-économiques. Ces études pourraient notamment intégrer les paramètres suivants : réduction des coûts grâce à l'utilisation de matériaux non importés et adaptation à l'environnement, en tenant compte de l'absence de pollution lors de leur utilisation. De plus, des analyses numériques ou des approches basées sur l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones ou d'autres méthodes avancées, sont recommandées. Ces outils permettraient de valider et de généraliser les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, en offrant une modélisation précise et une optimisation des solutions proposées.

Références Bibliographiques

ReferencesBibliographiques

- [1] Youwai, S., Kongkitkul, W., Sripobink, T., &Measamuth, N. (2011), Application of EPS for remedial work of bridge bearing unit on Bangkok Soft Clay: A case study. In 4th international conference on geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, pp: 6-8.
- [2] Maleska, T., Nowacka, J., &Beben, D. (2019), Application of EPS geofoam to a soil–steel bridge to reduce seismic excitations. *Geosciences*, Vol.9, N°10, pp :448.
- [3] Özer, A. T., &Akinay, E. (2022), Construction of geofoam block embankments atop existing transportation infrastructure. *Geosynthetics International*, pp : 1-19.
- [4] Arellano, D., Özer, A. T., Bartlett, S. F., &Vaslestad, J., (2018), 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications.
- [5] Edinçliler, A., &Toksoy, Y. S., (2022), Effects of geogrid reinforcement on the seismic performance of lightweight embankments. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1260, N° 1, pp: 012020), IOP Publishing.
- [6] Luo, Y. H., Hu, H. Y., Huang, Z. X., & Zhang, Y. C., (2014), Characteristics of EPS Materials and the Application in Road and Bridge Projects. *Applied Mechanics and Materials*, Vol.501, pp : 1418-1423.
- [7] Srivastava, D. K., Srivastava, A., Misra, A. K., &Sahu, V., (2019). Sustainability assessment of EPS-geofoam in road construction: a case study. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(5), pp:341-348. <https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1508319>.
- [8] Ngugi, H. N., Kaluli, J. W., &Abiero-Gariy, Z. (2017), Use of expanded polystyrene technology and materials recycling for building construction in Kenya. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 2(5), pp: 64-71.
- [9] Chavasse, D. C., Lines, J. D., Ichimori, K., Majala, A. R., Minjas, J. N., &Marijani, J. (1995). Mosquito control in Dar es Salaam. II. Impact of expanded polystyrene beads and pyriproxyfen treatment of breeding sites on *Culexquinquefasciatus* densities. *Medical and veterinary entomology*, 9(2), pp :147-154.
- [10] Kehinde, O., Ramonu, O. J., Babaremu, K. O., & Justin, L. D., (2020). Plastic wastes: environmental hazard and instrument for wealth creation in Nigeria. *Heliyon*, Vol.6, N° 10.
- [11]Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., &Leshchinsky, D., (2004). Geofoam applications in the design and construction of highway embankments. *NCHRP web document*, Vol.65, pp : 24-31.
- [12] Horvath, J. S., (1994), Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an introduction to material behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.13, N° 4, pp: 263-280.

- [13] Mohajerani, A., Ashdown, M., Abdihashi, L., & Nazem, M., (2017), Expanded polystyrene geofoam in pavement construction. *Construction and Building Materials*, 157, 438-448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.113>.
- [15] Chun, B. S., Lim, H. S., Sagong, M., & Kim, K. (2004). Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(4), 223-237.
- [16] Elragi, A. F., (2006). Selected engineering properties and applications of EPS geofoam. PhD Thesis, State University of New York College of Environmental Science and Forestry.
- [17] Mohajerani, A., Ashdown, M., Abdihashi, L., & Nazem, M. (2017). Expanded polystyrene geofoam in pavement construction. *Construction and Building Materials*, 157, pp : 438-448.
- [18] Le Groupe Laterlite (2021), Documents techniques et commerciaux, Argile expansée - mortier et bétons en sac, Montée du Plantin, 122 69380 Chasselay – France, 25 pages.
- [19] Alfheim, S., Flaate, K., Refsdal, G., Rygg, N., & Aarhus, K. (2011). The first EPS geoblock road embankment–1972. NRRL, Norwegian Public Roads Administration, Road Authority of Akershus County, Norwegian Public Roads Administration, pp: 1-10.
- [20] Li, S. (2014). Evaluation and numerical modeling of deflections and vertical displacement of rail systems supported by Expanded Polystyrene (EPS) geofoam embankments (Doctoral dissertation, The University of Utah)
- [21] Lyrtzakakis, A., Tsompanakis, Y., & Psarropoulos, P. N. (2021). Mitigating high-speed train vibrations with EPS blocks for various soil conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106482. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106482>.
- [22] Tepper H., (2011), EU product standard for eps and performance requirements. Paper presented at the 4th international conference on EPS geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, 6–8 June 2011.
- [23] Raza, M., Al Abdallah, H., Kozal, M., Al Khaldi, A., Ammar, T., & Abu-Jdayil, B. (2023). Development and characterization of Polystyrene–Date palm surface fibers composites for sustainable heat insulation in construction. *Journal of Building Engineering*, 106982. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106982>.
- [24] Ait Gana L., Mehani A. (2017), Etude et Conception d'un Moule-Palette en Polystyrène Expansé pour un Réfrigérateur ENIEM, Mémoire de Master Académique, Département Génie Mécanique, Université de TiziOuzou, 172 pages.
- [25] Solomon, A. A., & Hemalatha, G. (2020). Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. *Structures*, Vol. 23, pp. 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.10.019>.
- [26] Vaslestad, J., Liveroed, J. E., Damtew, T., Singstad, S., & Loevestad, D. (2019). Geofoam EPS used in bridge abutment, E18 Farris bridge. In 5th International Conference on Geofoam

Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018, pp: 49-55, Springer International Publishing.

[27] Özer, A. T., &Akınay, E. (2019). First geofoam roadway embankment application in Turkey. In 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018, pp: 71-80, Springer International Publishing.

[28] Özer, A. T., &Akay, O. (2021). Shear strength characteristics of interlocked EPS-block geofoam-sand interface. *Geosynthetics International*, Vol.28, Issue 5, pp : 521-540.<https://doi.org/10.1680/jgein.21.00009>.

[29]Ku, P. L. (1988). Polystyrene and styrene copolymers. I. Their manufacture and application. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, Vol.8, Issue 2, pp: 177-196.

[30] Viswanathan, A., Jouaneh, M., Datseris, P., & Palm, W. (1996). A manufacturing system for automated production of polystyrene molds. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol.3, N°3, pp: 39-43.

[31] Horvath, J. S. (2011). Manufacturing quality issues for block-molded expanded polystyrene geofoam. Research Rep. No.CEEN/GE-2011, 2.

[32] Santiago, E. L. (2014). An investigation of expanded polystyrene geofoam mechanical properties (Doctoral dissertation, Polytechnic University of Puerto Rico).

[33]Hartlén, J., &Wolski, W. (1996), (Book-Eds.).*Embankments on organic soils*.Elsevier, 424 pages.

[34] Park, S. J., Cheng, Z., Yang, H., Morris, E. E., Sutherland, M., McSpadden Gardener, B. B., &Grewal, P. S. (2010). Differences in soil chemical properties with distance to roads and age of development in urban areas. *Urban Ecosystems*, 13, 483-497.

[35] Miki, G. (1996). EPS construction method in Japan.In *Proceedings of International Symposium on Eps (Expanded Poly-Styrol) Construction Method (EPS TOKYO'96)*.

[36] Magnan, J. P., &Serratrice, J. F. (1989). Propriétés mécaniques du polystyrène expansé pour ses applications en remblai routier. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, N°64, pp : 25-31.

[37] “Styropor®; Processing; Measurements/Tests.” (1990), Technical Information Bulletin No. 0- 220e, BASF AG, Ludwigshafen, Germany 4 pp.

[38] Beju, Y. Z., &Mandal, J. N. (2017). Expanded polystyrene (EPS) geofoam: preliminary characteristic evaluation. *Procedia engineering*, N°189, pp: 239-246.<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.038>.

[39] Stuedlein, A. W. (2003). Instrumentation, Performance, and Numerical Modeling of Large Geofoam Embankment Structures (Doctoral dissertation, Syracuse University).

Références Bibliographiques

- [40] BASF- Technical Information – Styropor TI 1-800 e June 1991 ,Styropor foam as a lightweight construction material for road base- courses.
- [41] Norwegian Road Research Laboratory (NRRL) (1987), Plastic Foam in Road Embankments, Meddelelse nr. 61, Oslo.
- [42] Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., &Leshchinsky, D. (2004). Geofoam applications in the design and construction of highway embankments. NCHRP web document, N°65, pp: 24-31.
- [43] Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., &Leshchinsky, D. (2004). Geofoam applications in the design and construction of highway embankments.NCHRP web document, 65, 24-31.
- [44] Utah Department of Transportation Research Division, (2012) , Design and evaluation of expanded polystyrene geofoam embankment for the I-15 reconstruction project, Salt Lake , UTAH.
- [45] Guide Technique (1990) “Utilisation de PolystyreneExpanse en Remblai Routier;,” Laboratoire Central Ponts et Chaussées/SETRA, France 18 pages.
- [46] Thompsett, D. J., Walker, A., Radley, R. J., &Grievesson, B. M. (1995). Design and construction of expanded polystyrene embankments: practical design methods as used in the United Kingdom. *Construction and building materials*, 9(6), pp :403-411.
- [47] Arellano D., (2005), (Book). Guidelines for the Use of Expanded Polystyrene (EPS)-Block Geofoam for the Function of Lightweight Fill in Road Embankment Projects. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [48] The Final Report of International Symposium on EPS Construction Method (in English and Japanese), EPS Construction Method Development Organization, Tokyo, Japan (undated) 161 pages.
- [49] Riad, H. L., & Horvath, J. S. (2004). Analysis and design of EPS-geofoam embankments for seismic loading. In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, pp: pp. 2028-2037.[https://doi.org/10.1061/40744\(154\)198](https://doi.org/10.1061/40744(154)198).
- [50] Bartlett, S. F., Lawton, E. C., Trandafir, A. C., &Lingwall, B. N. (2011). Applications of EPS Geofoam in design and construction of earthquake resilient infrastructure.In EPS 2011 Conference, Oslo, Norway.
- [51] Yildiz, Ö, (2022), (Book), Use of EPS in Geotechnical Engineering. Architectural and Engineering Research and Practice, p. 179.
- [52] Taneichi, K., Nishi, T., Konami, T., Kubota, T., Koseki, J., Kyokawa, H., &Yasuhara, K. (2019). Shaking table test of scaled 1/5 EPS embankment model. In *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018* (pp. 367-373). Springer International Publishing.

- [53] Ammon, C. J., Lay, T., Kanamori, H., & Cleveland, M. (2011). A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth, Planets and Space*, 63, 693-696.
- [54] Taneichi, K., Konami, T., Tsukamoto, H., Kubota, T., & Yasuhara, K. (2019). Opening traffic for a temporarily remediated EPS road after the 2016 kumamoto earthquake: a world first. In *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018* (pp. 351-359). Springer International Publishing.
- [55] Horvath J. S. (1995), *GeofoamGeosynthetic*, Transport Research Laboratory, ITRD, Accession Number: 00720036, Horvath Engineering, P.C., Scarsdale, NY, 217 pages.
- [56] Mann G, Stark TD (2007) Slope stabilization using geofoam. Paper presented at the proceedings of Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics, GSP 161 Embankments, Dams, and Slopes, ASCE, 18–21 Feb 2007.
- [57] Reuter GR (2001). Use of geofoam for landslide stabilization-CTH “A”, Bayfield County, Wisconsin. Paper presented at the 3rd international conference on geofoam blocks in construction applications, Salt Lake City, USA, 10–12 Dec 2001.
- [58] Akay O (2016) Slope stabilisation using EPS block geofoam with internal drainage system. *GeosynthInt* 23(1):9–22.
- [59] Duškov, M., & de Jongh, J. (2019). Dutch A4all tramway EPS embankment with vertical sides. In *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018* (pp. 41-48). Springer International Publishing.
- [60] Duškov, M., den Uil, M., & Fütterer, M. (2019). Dutch A76 highway widening using EPS embankment with a vertical side. In *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018* (pp. 81-87). Springer International Publishing.
- [61] Sinnathamby, G., Korkiala-Tanttu, L., & Gustavsson, H. (2019). Post-use examination of EPS block characteristics: Finnish case histories. In *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018* (pp. 99-109). Springer International Publishing.
- [62] Greeley, T. R. (1997). A review of expanded polystyrene (EPS) properties, performance and new applications. *ASTM special technical publication*, 1320, 224-242.
- [63] Farnsworth C.F, Bartlett S.F, Negussey D, Stuedlein A. (2008) Construction and post-construction settlement performance of innovative embankment systems. I-15 Reconstruction Project, Salt Lake City, Utah. *J GeotechGeoenvironmentalEng ASCE* 134:289–301.
- [64] Birhan, A. (2014). Effect of confinement and temperature on the behavior of EPS geofoam (Doctoral dissertation, Syracuse University).
- [65] Atmatzidis, D. K., Missirlis, E. G., & Chrysikos, D. A. (2001). An investigation of EPS Geofoam behaviour in compression. *Proceedings of EPS Geofoam*, pp: 1-12.

- [66] Greeley, T. R. (1997). A review of expanded polystyrene (EPS) properties, performance and new applications. ASTM special technical publication, N°1320, pp: 224-242.
- [67] Stuedlein A.W. (2003), Instrumentation, Performance, and Numerical Modeling of Large Geofam Embankment Structures.
- [68] Negussey, D. (2007). Design parameters for EPS geofam. Soils and Foundations, Vol.47, N°1, pp: 161-170.<https://doi.org/10.3208/sandf.47.161>.
- [69] Standards Australia 1992, Rigid cellular plastics sheets for thermal insulation –Part 3: Rigid Cellular Polystyrene – Moulded (RC/PS-M), AS 1366.3-1992. Available from: Australian Standards. Accessed 23 May 2017.
- [70] Özer, A. T., & Akınay, E. (2022). Construction of geofam block embankments atop existing transportation infrastructure. Geosynthetics International, 1-19.<https://doi.org/10.1680/jgein.22.00284>.
- [71] ASTM D578/D578M, (2023), Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation Vol. 04.06, USA.
- [72] Papacharalampous, G., & Sotiropoulos, E. (2011, June). First time application of expanded polystyrene in highway projects in Greece. In 4th international conference on geofam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway (pp. 6-8).
- [73] O'Brian, A.S. (2001). Design and construction of the UK's first polystyrene embankment for railway use. Paper presented at the 3rd international conference on geofam blocks in construction applications, Salt Lake City, USA, 10–12 December 2001.
- [74] ASTM D 578-95, (1999), Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation, Vol. 04.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [75] Prasittisopin, L., Termkhajornkit, P., & Kim, Y. H. (2022). Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. Journal of Cleaner Production, 366, 132919.
- [76] Horvath J. S. (1995), GeofamGeosynthetic, Transport Research Laboratory, ITRD, Accession Number: 00720036, Horvath Engineering, P.C., Scarsdale, NY, 217 pages.
- [77] Yildiz, Ö. (2022), (Chapter), Use of EPS in Geotechnical Engineering. Architectural and Engineering Research and Practice, 179 pages.
- [78] RamliSulong, N. H., Mustapa, S. A. S., & Abdul Rashid, M. K. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. Journal of Applied Polymer Science, 136 (20), 47529.
- [79] Sarlin, J., JARVELA, P., & TORMALA, P. (1987). Dependence of the strength and structure of expanded polystyrene on processing in the block moulding method. Plastics and rubber processing and applications, 7(4), 207-214.

- [80] Imad, A. (2001). Experimental analysis of decohesive phenomenon in expanded polystyrene under bending and tensile loading conditions. *Cellular polymers*, 20(5), 339-358.
- [81] Mosleh, Y., VandenBosche, K., Depreitere, B., Vander Sloten, J., Verpoest, I., & Ivens, J. (2018). Effect of polymer foam anisotropy on energy absorption during combined shear-compression loading. *Journal of Cellular Plastics*, 54(3), 597-613. [https://doi: 10.1177/0021955X17720156](https://doi.org/10.1177/0021955X17720156).
- [82] Timothy, D. S., Steven, F. B., & David, A. (2012). Expanded polystyrene (EPS) geofoam applications & technical data. The EPS Industry Alliance 1298 Cronson Boulevard Suite 201 Crofton.
- [83] Bartlett, S., Negussey, D., Kimble, M., and Sheeley, M, (2000). Use of Geofoam as Super- Lightweight Fill for I-15 Reconstruction (Paper Pre-Print. Transportation Research Record 1736, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [84] Grégoire, C., Dethy, B., Detry, J., & Correia, A. G. (2009). Load bearing analysis of EPS-block geofoam embankments. In *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, Two Volume Set (pp. 235-244). CRC Press.
- [85] Eriksson, L., and Tränk, R., (1991), Properties of Expanded Polystyrene-Laboratory Experiments.” *Expanded Polystyrene as Light Fill Material; Technical Visit around Stockholm*, 1991, Stockholm.
- [86] Mohajerani, A., Ashdown, M., Abdihashi, L., & Nazem, M. (2017). Expanded polystyrene geofoam in pavement construction. *Construction and Building Materials*, 157, 438-448.
- [87] Akis, E., Guven, G., & Lotfisadigh, B. (2022). Predictive models for mechanical properties of expanded polystyrene (EPS) geofoam using regression analysis and artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 34(13), 10845-10884.
- [88] Anderson, O. L., & Demarest Jr, H. H. (1971). Elastic constants of the central force model for cubic structures: Polycrystalline aggregates and instabilities. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1349-1369.
- [89] Tao, H., Zheng, W., Zhou, X., Zhou, L., Li, C., Yu, Y., & Jiang, P. (2023). Study on Dynamic Modulus and Damping Characteristics of Modified Expanded Polystyrene Lightweight Soil under Cyclic Load. *Polymers*, 15(8), 1865..
- [90] Mater, Y. M., El Shahat, A. M., & AbdelSalam, S. S. (2023). Experimental and numerical characterization of EPS using elastoplastic response in ABAQUS. *Materials Today: Proceedings*.
- [91] Srirajan, S., Negussey, D., & Anasthas, N. (2001). Creep behavior of EPS geofoam. In *Proceedings of EPS Geofoam 3rd International Conference* (pp. 10-12).
- [92] Beju, Y. Z., & Mandal, J. N. (2016). Compression creep test on expanded polystyrene (EPS) geofoam. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(4), 401-408.

Références Bibliographiques

- [93] Chun, B. S., Lim, H. S., & Shin, Y. W. (2001). Application of constitutive model to predict the behavior of EPS-geofoam. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 5, 175-183.
- [94] Heger, F. J., Dietz, A. G., & Chambers, R. E. (1979). Design of Plastics Structural Components: Proposed ASCE Manual. *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 105(2), 429-450.
- [95] Puppala, A. J., Ruttanaporamakul, P., & Congress, S. S. C. (2019). Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 295-305.
- [96] Wu, Y. (1996). An investigation of long-term deformation behavior of EPS block under static & repeated loads, Doctoral dissertation, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City.
- [97] Wong, H., & Leo, C. J. (2006). A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(5), 299-310.
- [98] Roderich Hillmann b a BASF AG, (1998), EPS in Road Construction Current Situation in Germany Giselher Beinbrech a &, Ludwigshafen, Germany b German Federal Highway Research Institute, Bergisch Gladbach, Germany.
- [99] Hazarika, H. (2006). Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications. *Geotextiles and geomembranes*, 24(2), 79-90.
- [100] Negussey, D. (2007). Design parameters for EPS geofoam. *Soils and Foundations*, 47(1), pp. 161-170.
- [101] Yeo, S. S., & Hsuan, Y. G. (2006). The Compressive Creep Behavior of an Expanded Polystyrene Geofoam. In 8^o Congresso Internacional de Geossintéticos. Yokohama, Japão, pp. 1639-1642.
- [102] Wankhade, S. R., Rajurkar, V. J., & Dahale, P. (2014). Improvement of Swelling-shrinkage Behaviour of Expansive Soil Using EPS Beads. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(2), 223-228.
- [103] Khalaj, O., Siabil, S. M. A. G., Tafreshi, S. N. M., Kepka, M., Kavalir, T., Křížek, M., & Jeníček, Š. (2020). The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 723, N°1, p. 012014. IOP Publishing.
- [104] Padade, A. H., & Mandal, J. N. (2012). Behavior of expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial loading conditions. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2542-2553.
- [105] Basti, T. H., Chenari, R. J., Payan, M., & Senetakis, K. (2021). Monotonic, cyclic and post-cyclic shearing behavior of sand-EPS geofoam interface. *Geosynthetics International*, 28(3), 259-278.

Références Bibliographiques

- [106] Leo, C. J., Kumruzzaman, M., Wong, H., and Yin, J. H. (2008). Behaviour of EPS Geofoam in true triaxial compression test, *Geotextiles and Geomembranes*, N°26, pp. 175-180.
- [107] Padade A. H., Mandal J. N. (2014), Interface strength behavior of expanded polystyrene (EPS) Geofoam., *Int. Journal Geotech. Engineering* 8(1), pp: 66-71, <https://doi.org/10.1179/1938636213Z.00000000056>.
- [108] Basti, T. H., Chenari, R. J., Payan, M., & Senetakis, K. (2021). Monotonic, cyclic and post-cyclic shearing behavior of sand-EPS geofoam interface. *Geosynthetics International*, 28(3), 259-278.
- [109] Khan, M. I., & Meguid, M. A. (2018). Experimental investigation of the shear behavior of EPS geofoam. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4, 1-12.
- [110] AbdelSalam, S. S., & Azzam, S. A. (2016). Reduction of lateral pressures on retaining walls using geofoam inclusion. *Geosynthetics International*, 23(6), 395-407.
- [111] Duskov, M. (1994). EPS as a light weight sub-base material in pavement structures. Publication of: Defilt University of Technology, Faculty of civil Engineering, (7-94-211-6).
- [112] Neto, J. A., & Bueno, B. (2012). Laboratory research on EPS blocks used in geotechnical engineering. *Soils Rock*, 35(2), 169-180.
- [113] Abdelrahman, G. E., Duttine, A., & Tatsuoka, F. (2010). Interface friction properties of EPS geofoam blocks from direct shear tests. In *Characterization and Behavior of Interfaces: Proceedings of Research Symposium on Characterization and Behavior of Interfaces*, 21 September 2008, Atlanta, Georgia, USA (p. 113).
- [114] Moss, A. L., & Anderson, L. R. (2000). Cylinder direct shear: A new test method. In *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics* (pp. 106-116).
- [115] Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., & Leshchinsky, D. (2004). Geofoam applications in the design and construction of highway embankments. NCHRP web document, 65, 24-31.
- [116] Tolga Özer, A., & Akay, O. (2022). Interface shear strength of EPS-concrete elements of various configurations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022102.
- [117] Jutkofsky, W. S. (1998). Geofoam Stabilization of an Embankment Slope: A Case Study of Route 23A in the Town of Jewett, Greene County. *Geotechnical Engineering Bureau*, New York State Department of Transportation, 42 pages.
- [118] Refsdal, G. (1987), Frost Protection of Road Pavements, *Frost Action in Soils* - No. 26, Committee on Permafrost, ed., Oslo, Norway pp. 3-19.
- [119] Bassani, M., & Sacchi, E. (2011). Experimental investigation into speed performance and consistency of urban roundabouts: an Italian case study. In *3rd International Conference on Roundabouts*, Transportation Research Board, Carmel, Indiana (US) (pp. 18-20).

Références Bibliographiques

- [120] Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., & Leshchinsky, D. (2004). Geofoam applications in the design and construction of highway embankments. NCHRP web document, 65, 24-31.
- [121] Lin, L. K., Chen, L. H., & Chen, R. H. (2010). Evaluation of geofoam as a geotechnical construction material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(2), 160-170.
- [122] Bartlett, S. F. (2018). Lightweight Alternatives for Embankments on Soft Ground: A Focus on Railway Systems. *GeoStrata Magazine Archive*, 22(5), 40-46.
- [123] D. Arellano et al. 2019, 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, https://doi.org/10.1007/978-3-319-78981-1_8.
- [124] Tsukamoto H. (2011), History of R&D and design code for EDO-EPS method in Japan. Paper presented at the 4th international conference on EPS geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, pp: 6–8.
- [125] Afnor Edition, Normes NF EN 14933 (2008), Produits isolants thermiques et de remblayage pour les applications de génie civil - Produits manufacturés en polystyrène expansé (EPS) – Spécification, 53 pages.
- [126] Serratrice, J. F. (1994). Comportement mécanique du polystyrène expansé. In *Journées des Sciences de l'Ingénieur du réseau des Laboratoire des Ponts et Chaussées*.
- [127] Serratrice, J. F. (2017). Expanded polystyrene foam used as material with crushing threshold Laboratory test results (Doctoral dissertation, Cerema Méditerranée).
- [128] Kim, H., Choi, B., & Kim, J. (2010). Reduction of earth pressure on buried pipes by EPS geofoam inclusions. *Geotechnical Testing Journal*, 33(4), 304-313.
- [129] Bartlett, S. F., & Farnsworth, C. B. (2004). Monitoring and modeling of innovative foundation treatment and embankment construction used on the I-15 reconstruction project, project management plan and instrument installation report. UDOT Research Rep. No. UT, 4.
- [130] Stuedlein, A. W. (2003). Instrumentation, Performance, and Numerical Modeling of Large Geofoam Embankment Structures (Doctoral dissertation, Syracuse University).
- [131] Ramli Sulong, N. H., Mustapa, S. A. S., & Abdul Rashid, M. K. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(20), 47529.
- [132] Balla, A. (1962). Bearing capacity of foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 88(5), 13-34.
- [133] Kaya, Z., & Erol, A. (2021). Comparison of bearing capacities of undisturbed organic soils by empirical relations and 2D finite element analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 1975.

Références Bibliographiques

- [134] Aabøe, R., Frydenlund, T. (2011), 40 years of experience with the use of EPS geofoam blocks in road construction. Paper presented at the 4 Conference EPS Norway.
- [135] Kubota, T., (2011), Case history of EDO-EPS method in Japan. Paper presented at the 4th international conference on geofoam blocks in construction applications, Lillestrøm, Norway, 6–8 June 2011.
- [136] Akay, O., Özer, A. T., Fox, G. A., Bartlett, S. F., & Arellano, D. (2013). Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow. *Geotextiles and Geomembranes*, 37, 81-98.
- [137] Horvath, J. S. (1999). Discussion of “Status of ASCE Standard on Design and Construction of Frost Protected Shallow Foundations” by Larry S. Danyluk and Jay H. Crandell. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(2), 166-167.
- [138] Akay, O., Özer, A.T., Fox GA, (2012), Experimental investigation of failure mechanism of expanded polystyrene block geofoam slope system under seepage. Paper presented at the 5 European geosynthetics congress, EuroGeo5, 16–19 of September, Valencia, Spain.
- [139] Özer, A.T, Akay, O., Fox GA et al (2014) A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofoam. *GeotextGeomembr* 42(2), pp:166–180.
- [140] Akay, O. (2016), Slope stabilisation using EPS block geofoam with internal drainage system., *Geosynth Int.* 23(1), pp:9–22.
- [141] Riad, H. L., & Horvath, J. S. (2004). Analysis and design of EPS-geofoam embankments for seismic loading. In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects* (pp. 2028-2037).
- [142] Zarnani S, Bathurst RJ (2008) Numerical modeling of EPS seismic buffer shaking table test. *GeotextGeomembr* 26:371–383.
- [143] Neupane, R. (2015), Expanded polystyrene geofoam embankment for support of railways and bridges. PhD Dissertation, University of Utah, SLC, UT, USA.
- [144] Edinçliler, A., & Toksoy, Y. S. (2019). The Effect of EPS Geofoam Thickness on the Seismic Performance of Quay Walls. In *5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications: Proceedings of EPS 2018* (pp. 339-350). Springer International Publishing.
- [145] Eriksson, L., Tränk, R., (1991), Properties of Expanded Polystyrene-Laboratory Experiments, Expanded Polystyrene as Light Fill Material; Technical Visit around Stockholm, 1991, Stockholm.
- [146] Kavazanjian Jr, E., Matasovic, N., Hadj-Hamou, T., & Sabatini, P. J. (1997). *Geotechnical Engineering Circular No. 3: Design Guidance. Geotechnical Earthquake Engineering for Highways. Volume I-Design Principles* (No. Report No: FHWA-SA-97-076).

Références Bibliographiques

- [147] Hunt, R. E., (1986), Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation, McGraw-Hill, Inc., New York, 729 pp.
- [148] Arellano, D., Tatum, J. B., Stark, T. D., Horvath, J. S., & Leshchinsky, D. (2010). Framework for design guideline for expanded polystyrene block geofom in slope stabilization and repair. Transportation research record, 2170(1), 100-108.
- [149] Azizian, M., Tafreshi, S. M., & Darabi, N. J. (2020). Experimental evaluation of an expanded polystyrene (EPS) block-geogrid system to protect buried pipes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 129, 105965.
- [150] Ramli Sulong, N. H., Mustapa, S. A. S., & Abdul Rashid, M. K. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. Journal of Applied Polymer Science, 136(20), 47529.
- [151] El-sakhawy, N., Nabil, M., & Elsayed, M. (2023). Decreasing Earth Thrust with EPS Geofom. In E3S Web of Conferences (Vol. 368). EDP Sciences.
- [152] Prasittisopin, L., Termkhajornkit, P., & Kim, Y. H. (2022). Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. Journal of Cleaner Production, 366, 132919.
- [153] Thompson, D. J., Walker, A., Radley, R. J., & Grieveson, B. M. (1995). Design and construction of expanded polystyrene embankments: practical design methods as used in the United Kingdom. Construction and building materials, 9(6), 403-411.
- [154] Polyglasse SPA Registered Office, (2017), Technical Specifications, Viale Jenner, 4 - 20159 Milano Head Office: Via dell'Artigianato, 34 - 31047, 2017, Ponte di Piave (TV) - Italy.
- [155] Vuorinen L., Martinsuo M., (2019), Value-oriented stakeholder influence on infrastructure projects, International Journal of Project Management, Vol. 37, Issue 5, pp: 750-766, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.10.003>.
- [156] Trandafir, A. C., Bartlett, S. F., & Lingwall, B. N. (2010). Behavior of EPS geofom in stress-controlled cyclic uniaxial tests. Geotextiles and Geomembranes, 28(6), 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.01.002>.
- [157] Roy, S., & Bhalla, S. K. (2017). Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. Resources and Environment, 7(4), 103-109. <https://doi.org/10.5923/j.re.20170704.03>.
- [158] Afnor boutique Editions, Normes & Recueils |(2013), P19-810-4, Produits préfabriqués en béton - Systèmes de planchers à poutrelles et entrevous - Partie 4 : entrevous en polystyrène expansé, NF EN 15037-4+A1 Septembre 2013.
- [159] Gnip, I. Y., Kesulis, V., Vejelis, S., Vaitkus, S. (2006), Water absorption of expanded polystyrene boards, Polymer Composites, Vol. 25, Issue 5, pp: 635-641. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.04.002>.

- [160] Ayırlmis, N., Taşdemir, M., Akbulut, T. (2017), Water absorption and mechanical properties of PP/HIPS hybrid composites filled with wood flour, *Polymer Composites*, Vol.3, Issue 5, pp: 863- 869. <https://doi.org/10.1002/pc.23647>.
- [161] Polyglasse SPA Registered Office, Technical Specifications (2017), Viale Jenner, 4 - 20159 Milano Head Office: Via dell' Artigianato, 34 - 31047 Ponte di Piave (TV) – Italy.
- [162] Khalaj, O., Siabil, S. M. A. G., Tafreshi, S. N. M., Kepka, M., Kavalir, T., Křížek, M., & Jeníček, Š. (2020). The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 723, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- [163] Arvin, M. R., Ghafary, G. R., Hataf, N., & Ghafary, A. R. (2021). Shear behavior of EPS geofom reinforced with polypropylene fiber. *Geomechanics and Engineering*, 25(5), 347.
- [164] Khan, M. I., & Meguid, M. A. (2018). Experimental investigation of the shear behavior of EPS geofom. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4, 1-12.
- [165] Boutique AFNOR Editions (2016), Normes & Recueils, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, ASTM D 1621 Janvier 2016, France.
- [166] Atmatzidis, D. K., Missirlis, E. G., & Chrysikos, D. A. (2001). An investigation of EPS Geofom behaviour in compression. *Proceedings of EPS Geofom*, 1-12., The 3rd International Conference, (2001), 10–12 December, Salt Lake City, UT, USA.
- [167] Ghotbi Siabil, S. M. A., Moghaddas Tafreshi, S. N., Dawson, A. R., & Parvizi Omran, M. J. G. I. (2019). Behavior of expanded polystyrene (EPS) blocks under cyclic pavement foundation loading. *Geosynthetics International*, 26(1), 1-25, pp. 1-25. <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00033>.
- [168] Ossa, A., & Romo, M. P. (2012). Confining stress influence on EPS water absorption capability. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, pp: 132-137. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.03.003>.
- [169] Babavalian, A., Ranjbaran, A. H., & Shahbeyk, S. (2020). Uniaxial and triaxial failure strength of fiber reinforced EPS concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118617. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118617>.
- [170] Ayırlmis N., Taşdemir M. and Akbulut T. (2017), Water absorption and mechanical properties of PP/HIPS hybrid composites filled with wood flour, *Polymer Composites*. Vol. 3, Issue 5, pp: 863- 869. <https://doi.org/10.1002/pc.23647>.
- [171] Tang, N., Lei, D., Huang, D., & Xiao, R. (2019). Mechanical performance of polystyrene foam (EPS): Experimental and numerical analysis. *Polymer Testing*, 73, 359-365. <http://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.12.001>.
- [172] Al-Subari, L., Hanafi, M., & Ekinci, A. (2020). Effect of geosynthetic reinforcement on the bearing capacity of strip footing on sandy soil. *SN Applied Sciences*, 2, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03261-5>.

- [173] Kang, Y. A., Li, X. F., & Tan, J. C. (2008). Uniaxial tension and tensile creep behaviors of EPS. *Journal of Central South University of Technology*, 15(Suppl 1), 202-205.
- [174] Park, J. M., Lee, G. Y., Kim, D. H., & Jung, H. M. (2022). Creep Simulation and Validation for a Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene-Based Cushioning Systems. *Applied Sciences*, 12(24), 12663.
- [175] Van Dorp, T. (1988), Expanded Polystyrene Foam as Light Fill and Foundation Material in Road Structures (preprint paper), The International Congress on Expanded Polystyrene: Expanded Polystyrene- Present and Future, Milan, Italy.
- [176] Duškov, M. (1997). Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 15(1-3), 147-181.
- [177] Preber, T., Bang, S., Chung, Y., & Cho, Y. (1994). Behavior of expanded polystyrene blocks. *Transportation research record*, 36-36.
- [178] Alaie, R., & JamshidiChenari, R. (2019). Dynamic properties of EPS-sand mixtures using cyclic triaxial and bender element tests. *Geosynthetics International*, 26(6), 563-579.
- [179] TolgaÖzer, A., & Akay, O. (2022). Interface shear strength of EPS-concrete elements of various configurations. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022102.
- [180] Neto, J. A., & Bueno, B. (2012). Laboratory research on EPS blocks used in geotechnical engineering. *Soils Rock*, 35(2), 169-180.
- [181] Carvalho, D., Kassouf, R., Scatena, P., & Scatena, V. (2021). Expanded Polystyrene in Soil Reinforcement. In *Advancements in Geotechnical Engineering: The official 2020 publications of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE)* (pp. 121-135). Springer International Publishing.

Publication Internationale

EXPERIMENTAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF LIGHT EMBANKMENTS MADE OF A NEW POLYSTYRENE REINFORCED BY A POLYGLASS GEO-MEMBRANE

METTAI MOHAMED, ABDESSEMED MOULOUD *

Laboratory of Geo-Materials and Civil Engineering (LGMCE), Department of Civil Engineering, University of Blida1, Soumaa Road – P.O.Box 270, 250320 - Blida, Algeria

The technique of light embankment in expanded polystyrene (EPS) has become a favoured solution, since it can delay the onset of degradation, especially at the level of road and railroad bases, by virtue of its high mechanical characteristics. This paper proposes the study of the mechanical behavior of a type of polystyrene geomaterial, recently manufactured in Algeria, under uni-axial loading conditions. An experimental work was developed to evaluate its mechanical behavior while it's reinforced by a geomembrane "polyglass" type. The uni-axial compressive strength, the shear strength and the shear stress at the interface (EPS-polyglass) will be studied. A number of one hundred (100) samples were made and classified into two categories, differing in density, dimensions, effect of immersion in water and reinforcement by the geomembrane. This new material gave sufficiently good results, with an increase in Young's modulus (as a function of density variation and sample size). We observed percentages gains ranging from 69 to 240%. Furthermore, it was noticed that the compressive and shear strengths were directly influenced by the indicated parameters. This new expanded polystyrene, can be used as a lightweight backfill material and can contribute to solve some problems of road geotechnics and subgrade, with a reduction of costs (non-imported material) and an adaptation to the environment (non-pollution during its use).

Keywords: Experimental, behavior, polystyrene, light backfill, polyglass, uni-axial, reinforcement.

1. Introduction

The backbone of the transport system is the road and highway network, which has a direct impact on the economic development of a country investing in basic infrastructure [1]. In the projects of the routes, it is often necessary to cross poor reliefs, with low bearing capacity and especially in areas with high rainfall, which generate geotechnical problems during their operation, related to settlements and dangerous landslides [2]. In addition, the use of traditional backfill materials does not promote permanent stability of the pavement and the resulting degradations develop and spread rapidly. Since during the operation of roads by persistent loads of traffic, especially those exceptional and heavy, the problem of instability and settlement arises in compressible soils at low bearing capacity, for this reason, researchers have considered more reassuring and adequate solutions. The use of expanded polystyrene (EPS) is among the effective solutions, as it is a lightweight backfill material with a density of about one hundredth of the density of earth and has good thermal insulation properties, with some stiffness and compressive strength, comparable to that of medium clay [3]. This expanded polystyrene (EPS), which has been proven in engineering applications [4], for more than seventy years and it has been used to reduce settlements under embankments, dampen noise and vibrations and reduce lateral pressure on basements [5,6]. This has been confirmed by several experimental laboratory investigations, which have shown that this

polystyrene can be, even, successfully used in geotechnical applications, especially in pavement and embankment bases [7-10]. In addition, polystyrene behaves differently from soils, in terms of stresses and strains, due to its low density and chemical composition (plastic/polymer with a chemical composition of C8H8) [11]. Gouda [12], in addition to the influence of its density on its mechanical behavior. The choice of the geomembrane, type "Polyglass", in our study, is justified by the fact that it is a waterproof product to all types of infiltration (rainwater, wastewater, hydrocarbon fluids and lubricants), in addition to the aspect of its surface that seems rigorous, converging towards the improvement of the interface friction in contact with other products (such as polystyrene). Also, it has been found that the use of this type of polyglass ensures an improvement in the compressive strength compared to other reinforcements used. The effect of strain rate on the static and dynamic behavior of EPS polystyrene was the study subject by Chen [13], where static and dynamic compression and tensile tests on lightweight polystyrene sandwich blocks, with densities of 13.5 kg/m³ and 28 kg/m³, at different strain rates, were performed. However, the studies that mention the insertion of "Polyglass" geomembranes for the reinforcement of lightweight polystyrene embankments are minimal (see rare). In this article, we propose the analysis of the mechanical behavior of a new type of polystyrene, recently manufactured in Algeria, under uni-axial loading conditions. These are expanded polystyrene blocks produced and supplied locally by

*Autor corespondent/Corresponding author,
E-mail: abdesmoul@yahoo.fr

a packaging plant located in the province of Boumerdes (46 km/ East of the capital Algiers). The manufacture was done by styrene (translucent granules) with the incorporation of a blowing agent and the expansion obtained by molding [14]. This study will aim, first, at the characterization of this new material, then the evolution of its shear strength and the study of the shear of the interface in contact with this type of geomembrane "Polyglass". This choice is made, since the polyglass has rot-proof qualities and excellent mechanical performances, such as the elongation at break and the great resistance to the perforation as well. Our experimental work, in laboratory, proposes a number of 117 test specimens, divided into three categories. The first category concerns the uniaxial compression tests (composed of 63 specimens), with taking into account the three different densities: 15, 20 and 25 kg/m³ (21 specimens for each density). For the second and third category, intended for direct shear and interface shear tests, there will be 54 specimens, with the same density variation as before, giving 18 specimens for each density.

2. Experimental program

2.1 Principle of investigations

The main objective of this investigation is the applicability of Algerian polystyrene as a new lightweight material in the construction of embankments. It is research that revolves around the characterization and study of the predominant repetitive stresses involved in the construction of road embankments, namely compression, shear and interface shear. For that, an experimental program allowing extracting the required mechanical parameters (strength, modulus of elasticity, shear modulus) is envisaged.

2.2 Test methods

The experimental investigation will concern the tests of compressive strength, direct shear strength and interface shear strength. The objective is to study the behavior of the EPS polystyrene, alone, then reinforced by the geomembrane "Polyglass Elastoflexe HP" [15]. The densities of the EPS polystyrene used are: 15, 20 and 25 kg/m³. The materials were available in cubic form with different specimen sizes and were taken in accordance with ASTM D7557-09 [16] for different tests. The specimen cutting work was done at Packshield Industries limited, which is a manufacturer and supplier of EPS geomembrane in Mumbai, India [17]. A series of 117 specimens, divided into two test categories (compression and shear) were proposed. Sixty-three (63) specimens divided into three modes (the first without reinforcement, the second with reinforcement by one layer and the third with reinforcement by two layers). All the

reinforcements are carried out by application of the geomembrane "Polyglass". For the first category, the tests will be carried out in uni-axial compression, with variable densities of: 15kg/m³, 20kg/m³ and 25kg/m³, while the second and third categories, are intended for direct shear and interface shear tests, where 54 specimens distributed, the variable densities are identical to those of the first category.

2.3 Material properties

2.3.1 Geoflex EPS polystyrene

The expanded polystyrene blocks used in this study are locally produced. The manufacturing process is done by styrene (translucent granules) with the incorporation of a blowing agent and the expansion obtained by molding. Three densities were selected: 15 kg/m³ (called D15), 20 kg/m³ (called D20) and 25 kg/m³ (called D25). The identification of polystyrene is done by density confirmation tests carried out in accordance with standards: NF EN 15037-04 [18], after allowing the samples to dry and stabilize for three days in the open air from the date of manufacture. The results obtained were 15.39 kg /m³, 20.13 kg /m³ and 24.16 kg /m³, respectively, for the three densities, D15, D20 and D25. Water absorption tests were performed by placing samples of the different densities in a container filled with water and covered with a steel net to prevent the samples from floating on the water surface and to keep them submerged in water for 30 days [19,20]. For all tests, polystyrene blocks of three different cubic dimensions with volumes: 50 mm³, 100 mm³ and 150 mm³, with varying nominal densities (15 kg /m³, 20 kg/ m³ and 25 kg/ m³) (Fig.1) were prepared. The samples are referenced in this report using the symbol EPS and the nominal density, for example (EPS 15).



Fig.1 - Prepared EPS Expanded Polystyrene Blocks

2.3.2 Polyglass Elastoflexe HP

It is a prefabricated, ultra-high performance elastomeric waterproofing membrane consisting of a blend of distilled bitumen and a high elasticity thermoplastic resin (SBS), comprising a high weight continuous yarn non-woven polyester reinforcement, reinforced with longitudinal glass fibers [21]. This reinforcement is considered a membrane with excellent mechanical properties of elongation at break and high punching resistance, as well as dimensional stability, which will ensure perfect adhesion to substrates and layers.

Table 1

Technical characteristics of Polyglass Elastoflexe HP		
Technical characteristics	Unity	Nominal value
Length	M	≥ 10
Width	M	≥ 1
Thickness	Mm	5 ± 0.2
Tear resistance	N /mm ²	≥ 0.8
Shear strength	N/mm ²	≥ 0.25
Crack resistance	C°	≤ 15
Tensile elongation	%	50% (± 15)
Dimensional stability	%	≤ 20

Table 2

Identification of specimens made for shear tests						
Density	Direct shear (kPa)			Interface shear (kPa)		
	50	100	150	50	100	150
D15	3	3	3	3	3	3
D20	3	3	3	3	3	3
D25	3	3	3	3	3	3

below summarizes the technical characteristics of this product.

2.4 Preparation of test specimens

In this experimental program, three categories of specimens with different contact cross-sections were made for testing: uni-axial (unconfined), direct shear, and interface shear. The total number of test specimens is 117, divided into: 54 samples for the 1st test, 27 for the 2nd and for the 3rd test as well.

2.4.1 Uni-axial compression

Uni-axial compression was performed to evaluate the influence of density, the effect of water immersion, the effect of sample size, and the behavior of EPS polystyrene specimens reinforced with the Polyglasse HP membrane. For each density taken, sections of three different dry volumes were made. Water immersion is treated for the submerged case and two reinforcements (one layer and two layers of Polygalss geo-membrane) (Table 2). Figs. 3 and 4, illustrates the unreinforced and reinforced blocks, respectively for the three densities D15, D20 and D25. For the uni-axial test, for the three densities (D15, D20 and D25), three (03) specimens of each dry section of 50 mm³, 100 mm³, 150 mm³, three specimens for the section immersed in water, three specimens for the case of reinforcement by a layer of polyglass and finally, six specimens for the case of reinforcement by two layers of polyglass were taken. A total of 21 specimens for each density.

2.4.2 Direct shear and interface shear

The objective of the direct shear test on expanded polystyrene (EPS) blocks is an attempt to understand the behavior of the shear strength parameters of EPS [22]. The direct shear test is performed on the EPS block with three different densities, namely, 15kg/m³, 20kg/m³, and 25kg/m³,



Fig.2 - Unreinforced polystyrene samples



Fig.3 - Reinforced polystyrene samples



Fig.4 - Apparatus and direct compression test

under three different values of normal stress of 50kPa, 100 kPa, and 150 kPa. For the interface shear tests, the same procedure was adopted, with the three densities already listed and the same normal stress values. Table 2, gives the values taken for both types of shear tests. Khan et al [23], illustrated very clearly the principle of each direct

shear and EPS/PVC interface shear test, on each EPS polystyrene block and the distribution of stress forces.

2.5 Test procedure

2.5.1 Uni-axial direct compression

The purpose of the direct compression is to evaluate the effects of the following parameters: the strength of the specimen by varying the density, the effect of moisture by immersing the specimens in water for a period of 30 days, the size of the specimen by taking three different volumes, and finally, the effect of the reinforcement by the polyglass geo-membrane. All tests were performed according to ASTM D1621-10 [24], with room temperature, at a head speed equal to 1mm/min. All the samples (specimens), were compressed between the upper (fixed) and lower (mobile) plates of the universal electromechanical machine (UTM-0108), ensuring the continuity of the loading until the distance between the upper and lower plates reached a specific predetermined value (Fig.4).

2.5.2 Direct shear and interface EPS-Polyglasse

For the direct shear test, the automatic direct/residual shear machine UTS-2060 was used (Fig.5). And a total of 27 tests were performed. The



Fig.5 - Automatic shearing machine UTS-2060

maximum load on the specimen was in the range of 5kN. The sample dimensions tolerated by this machine are (60 × 60 × 20) mm. The shear is driven by a high-resolution servo motor and a set of gearboxes. The speed is fully variable in steps over the range of 0.00001 to 9.99999mm/ min with a reverse value of 10mm/min. All tests were conducted in accordance with ASTM D3080 [25], under three different normal stresses: 50 kPa, 100 kPa and 150 kPa. Horizontal displacement was applied at the recommended rate of 1mm/min and all tests terminated when the maximum displacement was reached automatically and stopped by shearing. If no maximum response is observed, maximum shear is considered at 10% horizontal displacement. In the EPS/Polyglass Elastoflexe HP interface tests, the geomembrane was placed in the upper box, while the Polyglass sample was put in the lower box. This arrangement was adopted because the Polyglass geomembrane

is considered incompressible with respect to the geomembrane under the applied load and, therefore, ensuring that the shear surface remains aligned with the separation plane between the upper and lower parts of the box. Another advantage of this configuration is that it minimizes the tilt that can be experienced if the lower block deforms unevenly during loading.

3. Results and discussion

3.1 Uni-axial compression without reinforcement

3.1.1 Stress - strain behavior

The average stress-strain curves, shown in Figures 6a, 6b and 6c, are obtained from the compression tests (uniaxial). They show the elastoplastic behavior without peaks. Three phases are visible; the elastic phase (linear), the elastoplastic phase (curvature) and the pseudo-plastic phase with bearing. This is confirmed by the results of previous research, such as those of: Atmatzidis in 2001 [26] and Ghotbi in 2019 [27]. The values obtained for: yield strength, compressive strength, and initial modulus of elasticity, are summarized in Table 3 for the three densities D15, D20 and D25, regardless of the shape of the specimen (dry or immersed). Quantitatively, the compressive stresses at the elastic limit (for the 1% deformation) influence the results obtained, with gains of 212% (for density 15 kg/m³), 100% (for density 20 kg/m³) and 113.7% (for density 25 kg/m³). The influence of sample size and density is shown in Fig.7, where it is observed that the stress increases with density and sample size. This gives significant values for the elastic modulus (E) of polystyrene, with values of 2.3MPa, 5.3MPa and 7.9MPa, respectively for densities D15, D20 and D25, for large sample sizes (150mm³). Concerning the limit of the elastoplastic phase (deformation at 5%), the same remarks are observed, with percentages of 43.8%, 67% and 51%, respectively for densities D15, D20 and D25 and with a decrease of 33% for the immersed case.

Table 3

Compressive strength at different strain rates									
Density (kg/m ³)	D15			D20			D25		
	Constraint			Constraint			Constraint		
	Values σ (kPa)			Values σ (kPa)			Values σ (kPa)		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
Cube 50	8	32	45.2	26	63	84	43	104	114
Cube 100	12	45	56.4	32	103	114	44	122	135.2
Cube 150	24.5	46	53.7	52	107	118	94	157	169.4
Submerged	25	25.4	61.3	45	100.2	94.8	45	105	117.2

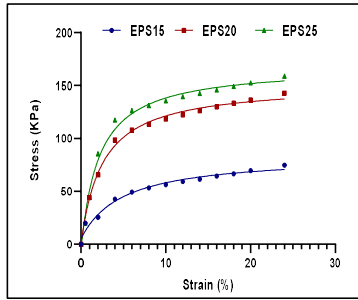


Fig.6a - Stress-strain curves for 50mm³

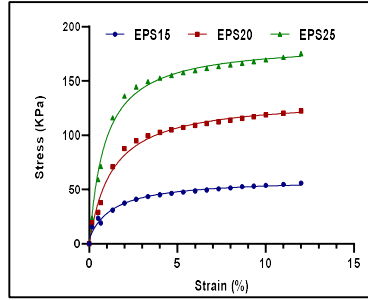


Fig.6b - Stress-strain curves for 100mm³

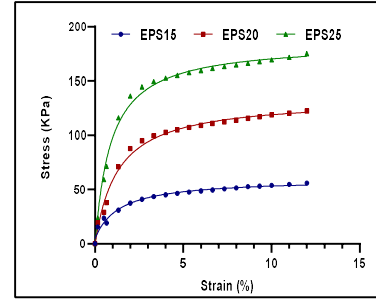


Fig.6c - Stress-strain curves for 150mm³

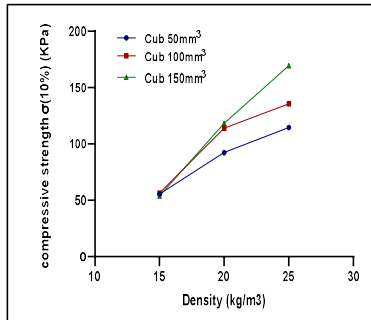


Fig. 7 - Variation compressive strength $\sigma_{10\%}$ with density

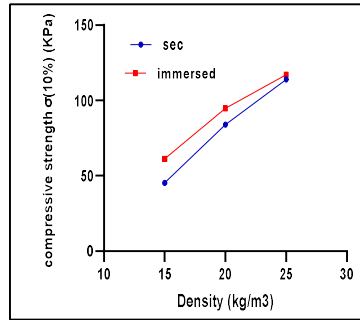


Fig.8 - Influence density on the compressive strength $\sigma_{10\%}$

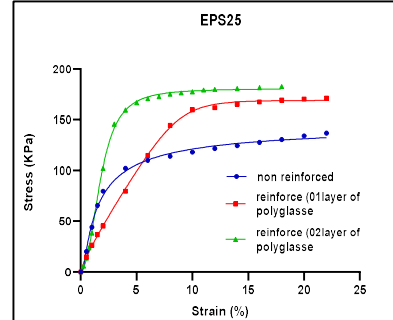


Fig.9 - Stress-strain behavior of EPS reinforced by polyglass

3.1.2 Influence of the polystyrene immersion in water

Fig.7, illustrates the behavior of the tested specimens, under uniaxial compression, in a dry and immersed state. The strength values in the case of immersed specimens are slightly higher than those in the dry state, due to the role played by the amount of water absorbed, which means an increase in stiffness and especially during the elastic phase. In addition, researchers have shown that the absorption of water by polystyrene (EPS) depends on the magnitude of the applied stress [28], which is not the case in our study. Also, the difference in strength between the two cases (dry and submerged) for each value of applied density is 16.1 KPa (for D15), 10.8 KPa (for D20) and 3.2KPa (D25), respectively. The D25 density polystyrene is not strongly affected by this change in strength and this may be due to the low water absorption of the denser specimen. Furthermore, it is concluded that the water immersion of Geofoam EPS polystyrene, is not seriously affected by the immersion time.

3.1.3 Effect of reinforcement on polystyrene behaviour

For the study of the direct compression of the polystyrene EPS Geofoam reinforced by the geomembrane "Polyglass" (second phase of our study), we will present the results obtained by the curves: stress - strain, according to the density of the specimen and the number of layers of reinforcement. These results show that the mode (number of layers) of reinforcement influences the compressive strength, for any density taken. The most reinforced specimens give better strength

values and the best performing density is D25. This is confirmed, as the evolution of compressive strength increases linearly with density, which explains that reinforcement has a remarkable influence on strength [29], especially when the polystyrene is denser. We observe a gain of 49.8% and 36.7% (in compressive strength), respectively for one and two layers of polyglass reinforcement for density D25 (Fig.9). This gain is reduced by 9.2% and 13.7%, respectively for one and two layers for density D20. The gain is negligible for density D15. We conclude that it is better to reinforce with two layers for the densest polystyrene, and with one layer for the least dense polystyrene.

3.1.4 Evolution of the modulus of elasticity

The modulus of elasticity of the tested block evolves according to the studied parameters (density, reinforcement, water immersion), for this, it is essential to use a theoretical method, based on trial and error or correlation [30]. For this purpose, for the elastic phase of the curve, the strain scale is divided into uniform strain intervals ($\Delta\epsilon$) and for each of them a corresponding stress value ($\Delta\sigma$) is measured. In this way, the ratio ($\Delta\sigma/\Delta\epsilon$) is calculated, which represents Young's modulus of elasticity (E). In this way, the evolution of this modulus (E) as a function of density can be traced. This elastic modulus of polystyrene (EPS) has a constant value in the linear elastic region. Table 4 summarizes the values of the modulus of elasticity at different densities for all cases studied. For dry sections, the modulus E increases with density and specimen size. Comparing the values obtained with

Table 4

Evolution of modulus E for all uniaxial compression tests						
Section	50 mm ³	100 mm ³	150 mm ³	Submerged 50mm ³	1 nappe polyglas	2 nappes polyglass
Density	Modulus E (kPa)					
15	822	2200	2300	2530	1165	1165
20	1600	3720	5360	3910	1750	1760
25	2637	5430	7900	5000	2637	4320

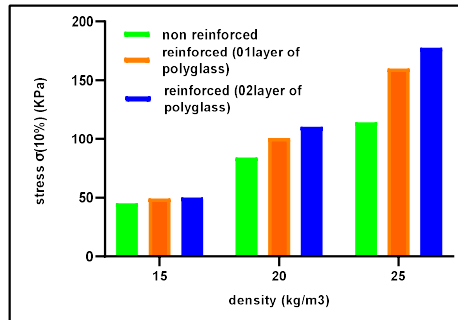


Fig.10 - Difference in stress with case study

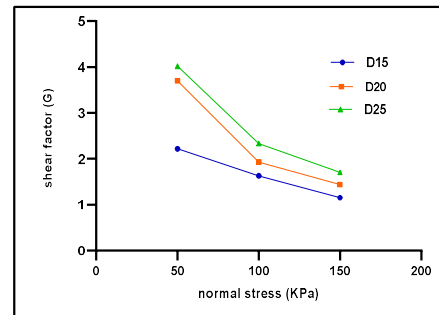


Fig.11 - Shear factor with normal stress

respect to the density D15, for all sizes, we can see: For the section 50 mm³ and, the rate of increase is: 95% and 220% for densities D20 and D25 respectively, while the increase is lower for the section 100mm³, with rates of: 69% and 149%, for densities D20 and D25 respectively.

What is for the section 150mm³, the rates are much higher and are of: 133% and 243.5%, for densities D20 and D25 respectively. This represents an increase of 207.8% for a density of 15 kg /m³, 144.5% for a density of 20 kg/m³ and 90% for a density of 25 kg/m³. The water content (water immersion) has a positive influence by increasing Young's modulus (E), especially for the less dense section, which can be explained by a stiffness developed by the amount of water absorbed and generated during the crushing test. It seems that the 2-layer reinforcement gives a higher modulus of elasticity depending on the density of the specimen. Indeed, a gain of 112% for the two-layer reinforcement and only 16.5% for the single-layer reinforcement and this, for the density of 25 kg/m³ (Fig.10). This large difference can be justified by the fact that when the density of polystyrene exceeds 20 kg/m³, reinforcement with other materials is more effective and more loaded. Specimens with a higher density and sufficient reinforcement by the "Polyglass" geomembrane can be used as an alternative solution to cope with the low load-bearing capacity of lightweight embankments.

3.2 Direct shear and interface shear

For the shear tests, whether direct (polystyrene mono-block) or interface geo-membrane polystyrene / Polyglass, we studied the relationship: a/shear stress-horizontal displacement, b/evolution of shear strength with the variation of the shear

factor with the normal stress. This study will be with the different values of densities [31]. It was found that for the geomembrane - EPS polystyrene interface, the adhesion (C-cohesion) and friction angle (ϕ) of the interface increased slightly with the increase of the density of the polystyrene. Similarly, the measured shear strength of the interface showed proportionality with density and mechanical characteristics. In addition, the incorporation of the "Polyglass" geomembrane changed the strength mechanism of the EPS polystyrene from cohesive to cohesive-frictive [32].

3.2.1 Direct shear of polystyrene

The shear parameters, resulting from the different tests carried out, gave results, including a very increasing evolution of the shear strength when the displacements are between 0 and 2mm and this evolution reduces, after the elasto-plastic limit for the least dense specimens (D15) and with the highest normal stress of 150 kPa, the values increase to reach the limit of 173 kPa, then they decrease significantly until the residual values. For specimens D20 and D25, beyond the elasto-plastic phase, the values reach 166 kPa (for D20) and 221 kPa (for D25). The ratio of the shear stress at failure to the normal stress applied at that point, which results from the shear factor (G), shows a decreasing trend as the normal stress is increased (Fig. 11). These results show that when the load is increased axially (normal stress), this factor (G) decreases significantly, with differences of -61%, -54%, and -42%, respectively for densities D25, D20, and D15. Similarly, the shear strength increases with polystyrene density, with 70%, 43%, and 27% increases, respectively, for densities D15, D20, and D25. As the axial load increases when the

density is equal to 20 and 25 kg /m³, the shear strength also increases, which is considered an advantage for the interface joint.

3.2.2 Interface shear (Polystyrene –Polyglass)

The study of the interface behavior between the two materials polystyrene EPS and polyglass showed that the adhesion (cohesion C) increased proportionally with the density of polystyrene, with rates of 122.6% (between D15 and D25) and 109% (between D20 and D25). While the angle of friction (ϕ), decreased only from 10.5 to 44.5% and does not seem to obey the density variation. The results indicate that the inclusion of the geomembrane "Polyglass" leads to a considerable increase in shear strength, which allows us to conclude, that the shear stress, increases significantly with horizontal displacement. The axial load (normal stress) of 150 kPa, gave a higher elasto-plastic limit, with values of 175 kPa, 220 kPa and 260 kPa, respectively for densities D15, D20 and D25. For the shear factor (G), there is a decreasing trend when the normal stress is increased. These results show that as the normal stress increases, the factor (G) decreases significantly, with deviations of -58%, -56.4% and -41%, respectively for densities D25, D20 and D15. Regarding the shear strength, it increases as a function of the density of polystyrene, with rates of increase of 55%, 32% and 26.5%, respectively for densities D15, D20 and D25.

3.2.3 Relationship direct shear and interface shear

Based on the results obtained from the two test cases direct shear of the EPS monoblock and shear of the EPS/Polglasse interface, we observed that the values related to the EPS/Polglasse interface shear tests are higher than the contribution of the direct shear for the following parameters: cohesion, shear strength τ (Kpa) and the shear factor G (Fig. 12), with differences of 19. 15%, 34.5% and 16.2% for cohesion, 8.42%, 20.2% and 24.65% for shear strength and 8.4%, 23% and 24.6% for shear factor G for densities D25, D20 and D15 respectively. On the other hand, the friction angle ϕ seems not to be subject to this comparison, as it concerns the molecules of each material separately.

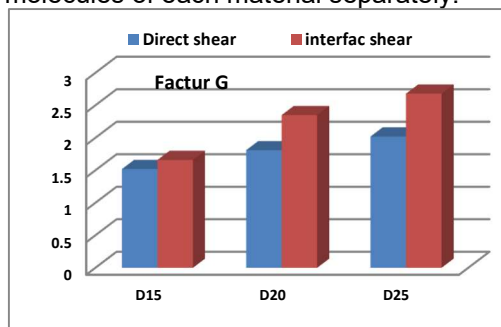


Fig. 12 - Comparison direct shear/interface shear with Polyglasse of shear factor G

4. Conclusions

Different series of tests were carried out on samples of a new expanded polystyrene EPS, manufactured in Algeria, which is intended to be used as a lightweight backfill material. Several parameters were studied in order to estimate their influence on the behavior of the tested specimens, namely: density, size, humidity (dry and immersed states), as well as the reinforcement with the polyglass geomembrane. Based on the results obtained, the general behavioral trend of this new type of polystyrene was in good agreement with previous research.

From the test results, it is observed that the stress-strain relationship of EPS, is closely related to the density and size of the specimens and no shear failure was observed in the uni-axial compression test. Regarding the compressive behavior of EPS, increasing density results in better compressive stress at the yield point with gains up to 212%. The higher density test specimens (D25) failed at lower strain due to the increase in stiffness.

The compressive stress-strain curve for EPS shows three phases: an elastic linear, an approximate plateau followed by a rapid increase in stress due to compaction and cell densification. The behavior of EPS depends, therefore, significantly on the density and size of the specimen, which explains the values found for the elastic modulus (E) of the largest size polystyrene (150 mm³), with values of 2.3Mpa (density D15), 5.3MPa (density D20) and 7.9MPa (density D25). As the water absorption by the polystyrene (EPS) depends on the amplitude of the applied stress, which is not the case in our study, it turned out predicated on our results, that the immersion in water of the Geofoam EPS polystyrene, is not seriously affected by the immersion time, especially for the case of the highest density (D15).

For the reinforcement of polystyrene blocks (EPS) with Polyglass, the most reinforced specimens (two layers) give better resistance values for the highest density (D25), gains from 37 to 50%. It's advocated to reinforce with two layers the densest polystyrene, and with one layer for the least dense polystyrene (D15 and D20). Regarding the ideal location of the membrane "Polyglass", the study of the behavior of the interface between the two materials polystyrene EPS and polyglass, showed that the adhesion (cohesion C) increases proportionally with the density of polystyrene, with rates ranging from 109 to 122.6%. The results indicate that the inclusion of the "Polyglass" geomembrane leads to a considerable increase in shear strength. Also, the results show that when the normal loading stress increases, the shear factor (G), characterizing the shear of the EPS/Polyglass interface, decreases significantly, with deviations ranging from -58 to -41%. The shear strength

increases as a function of the density of the polystyrene, with rates of increase that vary from 27 to 55%. It is preferable (or even necessary) to place the "Polyglass" or another type of geomembrane at the interface, because of the shear strength values that are better than those obtained in case of direct shear of the EPS.

This study has shown that the use of the new expanded polystyrene, reinforced with the "polyglass" geomembrane, can be considered a suitable and reassuring solution for light embankment road infrastructures with low bearing capacity, considering the mechanical characteristics it presents. In addition, this new expanded polystyrene can be used as a light backfill material and can contribute to solving the problems related to road geotechnics, with a reduction in costs (non-imported material) and environmental adaptation (non-pollution when used).

Acknowledgements:

The authors would like to thank the Laboratory of Geomaterials and Civil Engineering (University of Blida1), as well as the Ministry of Public Works in Algiers and all the people who brought their help for the success of the experimental part and the realization of this work.

REFERENCES

- [1] L. Vuorinen, M. Martinsuo, Value-oriented stakeholder influence on infrastructure projects, *International Journal of Project Management*, 2019, 37(5), 750 – 766. <http://doi.org/10.1016/j.ijproman.2018.10.003>.
- [2] S. Roy, S.K. Bhalla, Role of Geotechnical Properties of Soil on Civil Engineering Structures Resources and Environment, 2017, 7(4), 103 – 109. <https://doi.org/10.5923/j.re.20170704.03>.
- [3] A. Mohajerani, M. Ashdown, L. Abdihasni, M. Nazem, Expanded polystyrene geofoam in pavement construction, *Construction and Building Materials*, 2017, 157, 438-448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.113>.
- [4] A.E. Rodriguez-Sanchez, E.R. Plascencia-Mora, E. Ledesma-Orozo, D.A. Aguilera-Gomez, M. Gomez, Numerical analysis of energy absorption in expanded polystyrene foams, *Journal of Cellular Plastics*, 2020, 56, 411-434. <https://doi.org/10.1177/0021955X19880506>.
- [5] A.C. Trandafir, S.F. Bartlett, B.N. Lingwall, Behavior of EPS geofoam in stress-controlled cyclic uniaxial tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 28(6), 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2010.01.002>.
- [6] A. Malai, S. Youwai, K. Watcharasawe, P. Jongpradist, Bridge approach settlement mitigation using expanded polystyrene foam as light backfill: Case study and 3D simulation, *Transportation Geotechnics*, 2022, 35, 100794. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100794>.
- [7] J.S. Horvath, Expanded polystyrene (EPS) geofoam - An introduction to material behavior, *Geotextiles & Geomembranes*, 1994, 13(4), 263-280. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90048-5).
- [8] A.H. Padade, J.N. Mandal, Interface strength behavior of expanded polystyrene (EPS) Geofoam, *International Journal Geotechnical Engineering*, 2014, 8(1), 66-71. <https://doi.org/10.1179/1938636213Z.00000000056>.
- [9] Y.Z. Beju, J.N. Mandal, Compression creep test on expanded polystyrene (EPS) geofoam, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 10 (4), 401-408. <http://doi.org/10.1080/19386362.2016.1155260>.
- [10] K.Omid, Z. Reza, N. Seyed, T. Moghaddas, M. Bohuslav, S. Ctibor, Experimental and numerical investigation of expanded polystyrene (EPS) geofoam samples under monotonic loading, *Geomechanics and Engineering*, 2020, 21 (6), 475-488. <https://doi.org/10.12989/GAE.2020.22.6.475>.
- [11] Y.Z. Beju, J.N. Mandal, Expanded polystyrene (EPS) geofoam, preliminary characteristic evaluation, *Procedia Engineering*, 2017, 189, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.038>.
- [12] M. Gouda, H. Riham, M. Moenes, An investigation on the mechanical behavior of expanded polystyrene (EPS) geofoam under different loading conditions, *International Journal of Plastics Technology*, 2017, 21(1), 123–129. <https://doi.org/10.1007/s12588-017-9175-6>.
- [13] W. Chen, H. Hao, D. Hughes, Y. Shi, J. Cui, Z.X. Li, Static and dynamic mechanical properties of expanded polystyrene, *Materials & Design*, 2015, 69(15), 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.024>.
- [14] P.L. Ku, Polystyrene and styrene copolymers. I. Their manufacture and application, *Advances in Polymer Technology*, 1988, 8(2), 177-196. <https://doi.org/10.1002/adv.1988.060080204>.
- [15] Polyglasse SPA Registered Office, Technical Specifications, Viale Jenner, 4 - 20159 Milano Head Office: Via dell'Artigianato, 2017, 34 – 31047, Ponte di Piave (TV) – Italy.
- [16] ASTM D7557-09, Standard Practice for Sampling of Expanded Polystyrene Geofoam Specimens, Book of Standards, 2010, 04.13, Developed by Subcommittee: 3 (2). <https://doi.org/10.1520/D7557-09>.
- [17] Packshield Industries, Ghatkopar, Mumbai, Maharashtra, GST 27AAGPM7190P1ZX, D'silva Compound, N.s.s. Road, Asalfa Village, Ghatkopar, Mumbai-400084, 1994, Maharashtra, India.
- [18] Norme NF EN 15037-4+A1, Produits préfabriqués en béton - Systèmes de planchers à poutrelles et entrevous - Partie 4 : entrevous en polystyrène expansé, Afnor boutique Editions, 2013, 19(810-4).
- [19] I.Y. Gnip, V. Kesulis, S. Vejelis, S. Vaitkus, Water absorption of expanded polystyrene boards, *Polymer Composites*, 2006, 25(5), 635-641. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.04.002>.
- [20] N. Ayrlimis, M. Tasdemir, T. Akbulut, Water absorption and mechanical properties of PP/HIPS hybrid composites filled with wood flour, *Polymer Composites*, 2017, 3(5), 863- 869. <https://doi.org/10.1002/pc.23647>.
- [21] O. Khalaj, S.M.A.G. Siabil, S.N.M. Tafreshi, M. Kepka, T. Kavalir, M. Křížek, S. Jeníček, The experimental investigation of behaviour of expanded polystyrene (EPS), *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 723- 012014. <http://doi:10.1088/1757-899X/723/1/012014>.
- [22] V.C. Xenaki, G.A. Athanasopoulos, Experimental investigation of the interaction mechanism at the EPS Geofoam – Sand interface by direct shear testing, *Geosynthetics International*, 2001, 8(6), 471-499. <https://doi.org/10.1680/gein.8.0204>.
- [23] M.I. Khan, M.A. Meguid, Experimental Investigation of the Shear Behavior of EPS Geofoam, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2018, 4(2), 12. <https://doi.org/10.1007/s40891-018-0129-7>.
- [24] ASTM D1621-10, Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics, Book of Standards Volume: 08.01, Developed by Subcommittee, 2016, 22-5, 2016. <http://doi:10.1520/D1621-10>.
- [25] ASTM D3080-04, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, Book of Standards Volume: 04.08, Developed by Subcommittee, 2012, 5(7). <http://doi:10.1520/D3080-04>.

- [26] D.K. Atmatzidis, E.G. Missirlis, D.A. Chrysikos, An Investigation of EPS Geofoam behavior in compression, In: EPS Geofoam", Proceedings of the 3rd International Conference, 2001, 10–12, Salt Lake City, UT, USA.
- [27] S.M.A. Ghotbi Siabil, S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, M. Parvizi Omran, Behavior of expanded polystyrene (EPS) blocks under cyclic pavement foundation loading, Geosynthetics International, 2019, 26(1), 1-25. <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00033>.
- [28] A. Ossa, M.P. Romo, Confining stress influence on EPS water absorption capability, Geotextiles and Geomembranes, 2012, 35, 132-137. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.03.003>.
- [29] A. Babavalian, A.H. Ranjbaran, S. Shahbeyk, Uniaxial and triaxial failure strength of fiber reinforced EPS concrete, Construction and Building Materials, 2020, 247(18617). <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118617>.
- [30] N. Tang, D. Lei, D. Huang, R. Xiao, Mechanical performance of polystyrene foam (EPS): Experimental and numerical analysis, Polymer Testing, 2019, 73, 359-365. <http://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.12.001>.
- [31] M.A. Meguid, M.I. Khan, On the role of geofoam density on the interface shear behavior of composite geosystems, International Journal of Geo-Engineering, 2019, 10(6). <http://doi.org/10.1186/s40703-019-0103-9>.
- [32] M.R.Arvin, M. Abbasi, H.K. Fahlani, Shear behavior of geocell-geofoam composite, Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(1), 188-195. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.09.012>
