

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1



قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil

Mémoire de Master 2
Spécialité : Génie Civil
Option : Géotechnique

Thème

**Consolidation des remblais légers par
Application des polystyrènes
Cas d'étude**

Présenté par :

MESKINE Youcef Islam
BENLALAM Yacine

Encadré par :

Dr M.ABDESSEMED

Année universitaire : 2019-2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACES

Grace à la volonté du Dieu, le Tout puissant, on a pu achever ce travail que je dédie :

À nos parents, qui nous soutenu pendant toute notre vie et nos études, et surtout dans l'accomplissement de ce mémoire, Nous prions le Bon Dieu de les accorder sa grâce infinie et les garde pour nous.

À toutes nos familles pour leur soutien et leur affection.

On veut surtout dédier ce travail à nos très chers camarades de promotion Master « Génie civil », avec lesquels, on a passé des moments précieux et inoubliables, nous souhaitons pour tous une vie plein de joie et de bonheur et une carrière plein de succès et que vous achevez tout ce que vous désirez dans la vie.

À tous nos enseignants qui m'ont apporté leur savoir et tout ce que nous connaissons maintenant et qui ont contribué énormément dans notre éducation. Nos enseignants de primaire, de Cem et de lycée, nos enseignants de l'Université, vous trouvez nos sincères gratitude.

A tout ce qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

À notre très cher pays l'Algérie.

On vous dit merci

MESKINE YUCEF ISLAM

BENLALAM YACINE

REMERCIEMENTS

Nous remercions, Dieu le Tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement du Dr M. ABDESSEMED, notre enseignant et Vice-Recteur à l'université de Blida1. On le remercie pour la qualité de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur et son disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous présentons nos sincères remerciements aux membres de jury Dr "Abed Y" et Pr "Amar Bouzid", pour avoir accepté à examiner notre travail, malgré les conditions très pénibles causées par la pandémie "Covid19".

Nous remercions s'adressent également à tous nos enseignants du Département de Génie Civil, pour leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Nous remercions vont également à toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin.

Résumé

L'Algérie compte plus 150 000 km de réseau routiers et un nombre très important d'infrastructures linéaires et de base (routes, autoroutes, aérodromes, chemins de fer) qui, beaucoup d'entre ont été réalisées sur des sols compressibles et de mauvaises caractéristiques mécaniques. C'est pourquoi, beaucoup de cas pathologiques (affaissements, effondrements, tassements, créations des vides), sont observés dans le temps, pendant la phase de service de ces infrastructures. Les remblais en matériaux légers sont utilisés depuis une vingtaine d'années pour la traversée de zones de sols compressibles et pour y remédier à ces problèmes. Cette technique a connu un renouveau au début des années 1970 avec l'emploi du polystyrène.

Nous proposons dans ce travail, une étude de ces phénomènes, par une revue bibliographiques des problèmes généraux de construction des remblais légers ; on y rappelle, en particulier, les caractéristiques de divers matériaux couramment utilisés pour la réalisation de ce type d'ouvrages. Des travaux expérimentaux, au laboratoire réalisés par des chercheurs pour mettre en évidence le comportement des sols compressibles, des sols compressibles avec remblais légers en polystyrènes, ont été largement évoqués dans la pratique. Pour cela, nous analyserons des résultats des les modèles choisis, et qui feront l'objet de un cas d'étude et conclure les résultats d'une analyse numérique basée sur la méthode des éléments finis, par l'utilisation du logiciel Ansys 16.0 (option Workbench).

ملخص

تمتلك الجزائر أكثر من 150.000 كم من شبكة الطرق وعدد كبير جداً من البنى التحتية الخطية والأساسية (الطرق والطرق السريعة والمطارات والسكك الحديدية) والتي تم تنفيذ العديد منها في التربة القابلة للانضغاط والفقيرة من حيث الخصائص الميكانيكية. هذا ما تسبب في العديد من الحالات الباثولوجية (هبوط، انهيارات، مستوطنات، خلق فراغات) يتم ملاحظتها بمرور الوقت، خلال مرحلة خدمة هذه البنى التحتية. تم استخدام الردم المصنوع من مواد خفيفة الوزن لمدة عشرين عامًا لعبور مناطق من التربة القابلة للانضغاط ومعالجة هذه المشكلات.

شهدت هذه التقنية انتعاشاً في أوائل السبعينيات باستخدام البولسترين. نقترح في هذا العمل، دراسة هذه الظواهر، من خلال مراجعة بيبليوغرافية للمشاكل العامة لبناء السدود الخفيفة؛ و يذكر، على وجه الخصوص، بخصائص المواد المختلفة المستخدمة بشكل شائع لتحقيق هذا النوع من العمل. سيتم ذكر العمل التجريبي، في المختبر الذي قام به الباحثون لإثبات سلوك التربة القابلة للانضغاط، والتربة القابلة للانضغاط ذات السدود المصنوعة من البولسترين الخفيف، على نطاق واسع في الممارسة العملية لهذا، سنقوم بتحليل نتائج النماذج المختارة، والتي ستكون موضوع دراسة حالة ونستنتج نتائج التحليل العددي بناءً على طريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج

Ansys 2016

Abstract

Algeria has more than 150,000 km of road network and a very large number of linear and basic infrastructures (roads, highways, airfields, railways) which, many of which were carried out on compressible soils and poor mechanical characteristics. This is why many pathological cases (subsidence, collapses, settlements, creation of voids) are observed over time, during the service phase of these infrastructures. Backfills made of lightweight materials have been used for twenty years to cross compressible soil zones and to remedy these problems. This technique experienced a revival in the beginning of 1970 with the use of polystyrene.

We propose in this work, a study of these phenomena, by a bibliographical review of the general problems of construction of light embankments; it reminds, in particular, the characteristics of various materials commonly used for the construction of this type of work. Experimental work, in the laboratory by researchers to demonstrate the behavior of compressible soils, compressible soils with light polystyrene backfills, has been widely mentioned in practice. For this, we will analyze the results of the selected models, which will be the subject of a case study and conclude the results of a numerical analysis based on the finite element method, by the use of the Ansys 16.0 software (Workbench option).

SOMMAIRE

<i>Dédicaces</i>	3
<i>Remerciements</i>	4
<i>Résumé</i>	5-6
<i>Sommaire</i>	7-8

Chapitre I : Introduction générale

<i>I.1 Problématique</i>	11
<i>I.2 introduction</i>	14

Chapitre III : Remblai en polystyrène

<i>Historique</i>	31
<i>III .1 introduction</i>	31
<i>III.2. normes</i>	33
<i>III .3.PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES</i>	34
<i>III .4.FABRICATION</i>	37
<i>III .5.CONCEPTION ET CRITÈRES</i>	39
<i>III .6.COMPORTEMENT</i>	41
<i>III .7.REGLE DE L'ART DE LA MISE EN ŒUVRE</i>	44
<i>III .8.CONTEXTES D'UTILISATION</i>	45

Chapitre IV : Remblais léger

<i>IV .1) PRINCIPE</i>	49
<i>IV 2) MATERIAUX UTILISES – CARACTERISTIQUES</i>	50
<i>IV 3) MISE EN ŒUVRE</i>	50
<i>IV 4) DOMAINES D'EMPLOI</i>	52
<i>IV 5).DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES</i>	53
<i>IV 6)DISPOSITIONS PRISES PAR L'ENTREPRISE POUR ASSURER LA QUALITE</i>	53
<i>IV 7) LES EXIGENCES ESSENTIELLES EUROPEENNES</i>	53
<i>IV 8.) ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX, DE SANTE ET D'HYGIENE</i>	54
<i>IV 9.) QUELQUES CHANTIERS DE REFERENCE</i>	54
<i>IV 10) CONSTITUTION DE CHAUSSEE</i>	55
<i>IV 11.) LES DISPOSITIFS DE PROTECTION</i>	56
<i>IV 12) PAREMENTS</i>	56
<i>IV 13.) PRECAUTIONS PARTICULIERES</i>	56
<i>IV 14.)PROTECTION VIS-A-VIS DU VENT</i>	57
<i>IV 1.1) CARACTERISTIQUES DU PRODUIT ET DU PROCEDE</i>	61
<i>IV 1.2). COMPORTEMENT EN PLACE RESULTAT DES ENQUETES</i>	62
<i>IV 1.3) DOMAINE D'UTILISATION ET LIMITES D'EMPLOI</i>	62
<i>IV 1.4). PROCEDURES A RESPECTER</i>	63

Chapitre V : Geosynthétique et géotechnique routières et ferroviaires

<i>V. 1)Définition</i>	65
<i>V. 2)Origine des géo synthétiques</i>	65
<i>V. 3)Différents types des géo-synthétiques</i>	66

V. 3.1)Géotextiles.....	66
V. 3.2)Géogrille.....	68
V. 3.3)Géofilet.....	69
V. 4)Domaines d'application.....	70
V. 5)Autre application.....	72
V. 6)Géo-composite.....	73
V. 7)Infrastructure de transport.....	74
V.7. 1)Éléments de définition plus précise.....	74
V. 7.2)Réseau routier.....	75
V. 7.3)Réseau ferroviaire.....	75
V. 7.4)Aéroport.....	76

Chapitre VI: Méthode élément finis & Logiciel Ansys

V.I.1)Introduction à la méthode des éléments finis.....	79
V.I.2)Utilisation d'un logiciel éléments finis.....	79
V.I.3) ANSYS.....	83

Chapitre VII: Analyse Numérique et Cas d'étude

VII.1)CAS D'ETUDE	
VII.2) RENFORCEMENT REMBLAI PAR Polystyrène.....	87
VII.3)RESULTATS.....	88
VII .3. A)SANS RENFORCEMENT.....	89
VII .3.B) AVEC RENFORCEMENT.....	91
VII.4) Comparaison et commentaires.....	93
VII.4) conclusion.....	94
Références	95-97

Chapitre I :
Introduction Générale

Introduction Générale

PROBLÉMATIQUE

Le besoin croissant de nouvelles routes peut, dans de nombreux cas, exiger la construction sur les sols mous, compressibles ou lâches qui sont incapables de supporter des charges supplémentaires. Des techniques de construction novateurs pour construire sur des sols molles ou lorsque des services publics ou des zones humides existent déjà tout en accélérant le calendrier des projets.

L'utilisation de matériaux légers pour réduire la charge d'un remblai routier sur les dépôts argileux compressibles est devenue pratique courante au plusieurs pays à l'occasion de la construction de remblais neufs ou de la correction de remblais existants. Le recoure à cette méthode permet de diminuer les tassements sous-jacents, de diminuer la vitesse des tassements ainsi que l'entretien récurrent aux approches des structures, de contrôler le fluage latéral des dépôts argileux préjudiciable aux culées de ponts et aux pieux de fondation, de diminuer les déformations qui nuisent à la sécurité des usagers et de résoudre les problèmes de stabilité du remblai. Les calculs de stabilité ont montré que le facteur de sécurité passe d'environ 1,0 pour un remblai classique à environ 1,7 pour un remblai léger. (11)

La conception de la construction des remblais en matériaux légers aux milieux compressibles, en vue de l'implantation d'une voie routière est déjà ancienne. Depuis plus de trente ans, des remblais légers ont été réalisés dans différents pays à partir de sciure de bois, d'écorce, de déchets de béton cellulaire, d'argile expansée et de tourbe, dont la masse volumique varie entre 200 et 1000 kg/m³.

L'une des innovations les plus récentes pour la construction de remblais en milieu urbain a été l'utilisation de matériaux légers. Le polystyrène expansé (EPS), un type de mousse plastique, est apparu comme le matériau de choix pour la plupart des terrassements qui utilisent un matériau léger.

Au début des années 70, l'utilisation d'un matériau nettement super léger, le polystyrène expansé d'une densité de 20 kg/m³, a connu un développement croissant à l'initiative du laboratoire de recherche routière Norvégien. En France, un premier remblai routier en polystyrène expansé a été mis en service en 1983 et depuis, plus de vingt chantiers ont été réalisés en utilisant cette technique. (10)

EPS en blocs (geofoam), lorsqu'il est utilisé comme remblai léger, il est typiquement moulé sous forme de blocs prismatiques qui sont de l'ordre de 600x1200x2400 millimètres, bien que les blocs plus longs soient de plus en plus courants. Dans ce formulaire, EPS est appelé EPS-block geofoam. Les blocs peuvent être utilisés en taille normale ou en usine pour répondre aux exigences géométriques spécifiques au projet.

EPS a un rapport résistance / densité remarquablement élevé et les types de matériaux standard disponibles dans le monde sont capables de supporter des contraintes de compression à long terme allant jusqu'à environ 100 kPa. (7)

Les remblais légers en polystyrènes sont généralement placés sur des sols médiocres (mous, compressibles, lâche) de mauvais comportement géotechnique qui sont normalement ou sur consolidés, possédants une résistance au cisaillement relativement faible. La conception et la construction de remblais légers est basée sur l'évitement de la défaillance pendant la construction en assurant une stabilité adéquate et en limitant les tassements issus de la construction. (2)

Sur sols compressibles, en réparation ou en construction neuve, la substitution de tout ou partie d'un remblai classique par l'EPS permet de réduire ou d'éviter les tassements, en particulier à proximité des points durs tels que les culées d'ouvrage d'art où les tassements différentiels sont inacceptables et où les efforts horizontaux et les frottements négatifs doivent être limités. En construction neuve, permet d'édifier des remblais d'accès qui peuvent réduire la longueur des ouvrages d'art. (9)

Le polystyrène expansé est le matériau léger par excellence; il offre de bonnes caractéristiques, résistance élevée à la compression lui permet de supporter adéquatement les charges de trafic associées mais il coûte cher par aux autres alternatives. (11) (3)

Chapitre III :
Remblai en polystyrène

Remblai en polystyrène

Historique :

III.1 INTRODUCTION

Expanded polystyrène EPS est également appelé « geofom ». Ce terme générique est utilisé pour décrire le polystyrène expansé formé en blocs de plastique cellulaire de faible densité pour être utilisé comme remblai léger, stable, inerte et sans danger pour l'environnement.

Geofom de polystyrène expansé (EPS) a été utilisé comme un matériau léger pour résoudre certains problèmes géotechniques depuis les années 1950. Le geofom EPS n'est pas un matériau de remplacement de sol, mais elle est destinée à résoudre des problèmes d'ingénierie, et a été produite en blocs qui peuvent être coupés dans diverses formes et tailles et une gamme de résistances à la compression - pour répondre aux besoins spécifiques du projet, Sa densité est environ un centième de celle du sol et moins de 10% du poids d'autres alternatives légères de remplissage. Il a de bonnes propriétés d'isolation thermique avec une rigidité et une résistance à la compression comparable à l'argile moyenne. Il est utilisé pour réduire le tassement au-dessous des talus, l'amortissement du bruit et des vibrations, réduire la pression latérale sur les sous-structures, réduire les contraintes sur les conduits enterrés rigides et les applications connexes. (13)

Le polystyrène a été utilisé dans la construction de routes en Europe depuis le début des années 1970 et a été utilisé pour la première fois à New York en 1996.

L'utilisation de matériaux comme remblais légers, y compris les blocs du polystyrène comme alternative à l'amélioration du sol, a augmenté au cours des années 1990 en vue de quatre raisons importantes. (1,2)

D'abord Le temps de construction plus court résulte de la simplicité de placer les blocs et la capacité de placer les blocs dans adverses conditions plutôt des sols ordinaires.

Deuxièmement, les matériaux légers produisent des quantités relativement petites de consolidation, tandis que les méthodes traditionnelles d'amélioration des sols, comme le pré-chargement, produisent généralement des quantités de drainage et de consolidation relativement importantes.

Troisièmement, les matériaux légers diminuent les coûts d'entretien en raison de minimisation des tassements,

Quatrièmement, la durabilité du polystyrène a été prouvée par des projets achevés dans les années 1970.

Polystyrène expansé, EPS, a été utilisé avec succès dans un certain nombre de pays dans le monde entier. Certains de ces pays sont la Norvège, les Pays-Bas, les États-Unis, le Japon (en 1985, Miki, H., 1996) où 470 mètres cubes ont été utilisés dans le projet), en l'Allemagne (1960 a été utilisé comme couche de protection contre le gel dans les chaussées) et en Malaisie (1992 comme matériau de remplissage léger) (14).

Le polystyrène est intrinsèquement multifonctionnel, ce qui rend efficace à utiliser dans une grande variété d'applications. Il offre des avantages spéciaux pour la construction sur sol mou, dans les chaussées routières et aéroportuaires et les systèmes de voie ferrée, sous des bâtiments de stockage frigorifiques, des arénas de sport et des réservoirs de stockage pour prévenir la congélation et le soulèvement au sol et dans les segments de bâtiment en sous-sol pour réduire les besoins saisonniers de chauffage et de refroidissement. (13)

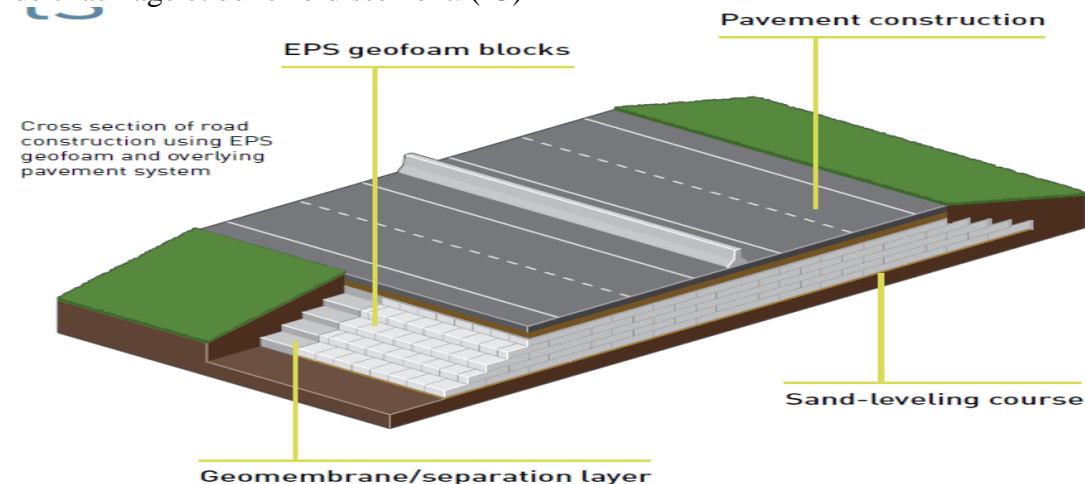


Figure 1 : utilisation du polystyrène comme remblai légers

Table 2-1 Types of Lightweight Materials (after Miki, H., 1996)

Lightweight Material	Unit Volume Weight (tf/m ³)*	Description
EPS Blocks	0.01 ~ 0.03	Ultra lightweight, expandable synthetic resins
Expanded Beads Mixed Lightweight Soil	0.7 approx. or more	Variable density; similar compaction and deformation characteristics to soil; can use excess construction soil
Air Foamed Mortar and Air Foamed Lightweight Stabilized Soil	0.5 approx. or more	Density adjustable; flow able; self-hardening; and can use excess construction soil
Coal Ash, Granulated Slag, etc.	1.0 ~ 1.5 approx.	Granular material; self hardening
Volcanic Ash Soil	1.2 ~ 1.5	Natural material

Hollow Structures	1.0 approx.	Corrugated pipes, box culverts, etc.
Wood Chips	0.7~ 1.0	Usually to be used below ground water level; anti leaching measures needed
Shells	1.1 approx.	Sized 12 to 76 mm; interlocking effects
Tire Chips	0.7~ 0.9	Usually used above ground water level; cover soil layer at least 0.9m is required

* 1tf ≈ 10000 N

III.2. NORMES

Le polystyrène est disponible dans différents types de matériaux. Selon l'ASTM International a établi trois normes qui le concernent : **(13)**

La norme ASTM D6817 Spécification pour le polystyrène cellulaire rigide fournit des informations sur les propriétés physiques et les dimensions du polystyrène expansé destiné à être utilisé comme géofaom.

Le guide standard ASTM D7180 pour l'utilisation de la géofaom expansée en polystyrène (EPS) dans les projets géotechniques couvre les considérations de conception pour l'utilisation de l'EPS dans les applications géotechniques.

La norme ASTM D7557 pour l'échantillonnage des échantillons peut être utilisée pour l'assurance de la qualité.

Une autre norme **NF T 56 – 201** qui a été modifiée en juillet 1988, caractérise le polystyrène expansé selon treize références dont les caractéristiques essentielles sont indiquées dans le tableau suivant **(20)** :

extrait de la norme NF T 56-201	plaque moulées en continu						plaque découpées dans des blocs moulés						
	BC	CC	DC	EC	FC	GC	AM	BM	CM	DM	EM	FM	GM
contrainte en KPa pour $\epsilon = 10\%$	30	50	70	100	150	200	-	30	50	70	90	140	190
masse volumique minimal (kg/m ³)	10	13	15	20	25	30	7	10	13	15	19	24	29

En remblai routier, seules les qualités EC et EM de polystyrène expansé doivent être employées et éventuellement les qualités FC et FM pour les chantiers où il est important de limiter les déformations du remblai allégé. La précédente version de la norme définissait cinq catégories de polystyrène expansé notées de Q1 à Q5, la qualité Q4 étant la plus couramment employée pour la construction de remblai ultra- léger. **(20)**

D'après l'expérience de **la Norvège**, où la technique est utilisée depuis plus de vingt ans, le polystyrène expansé a un bon comportement au vieillissement et, de plus, certains essais font apparaître une amélioration de la résistance à la compression sur des blocs prélevés dans des ouvrages anciens. **(20)**

En mai 2008 apparaît une nouvelle norme européenne (NF EN 14933) relative aux produits utilisés pour « l'isolation des bâtiments, de leurs équipements, des installations industrielles et des applications du génie civil ». Elle complète la norme NF EN 13163 et « spécifie les exigences auxquelles doivent satisfaire les produits manufacturés en polystyrène expansé utilisés pour l'isolation thermique des routes, des chemins de fer, des zones à forte circulation, des remblais allégés pour la réduction de la poussée verticale et horizontale des terres et autres applications du génie civil ».

Ces documents divisent en différents « types » les produits en polystyrène expansé, chaque type doit satisfaire deux conditions différentes en même temps afin de garantir les performances du produit. **(19)**

Ces deux conditions qui définissent la classification des produits EPS sont :

- la contrainte en compression σ_{-10} (kPa). L'essai consiste à « comprimer l'éprouvette à l'aide du plateau mobile à une vitesse constante de déplacement égale à $d/10$ par minute avec une tolérance de $\pm 25\%$, d étant l'épaisseur de l'éprouvette en millimètres. Conduire l'essai jusqu'à la limite de résistance de l'éprouvette et en déduire une valeur de la résistance à la compression, ou

jusqu'à 10 % de déformation relative et en déduire une contrainte en compression à 10 % de déformation relative » (Norme NF EN 826).

- la résistance à la flexion (kPa).

III .3.PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES

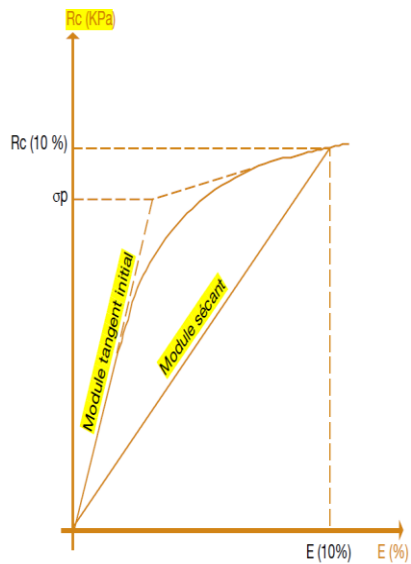
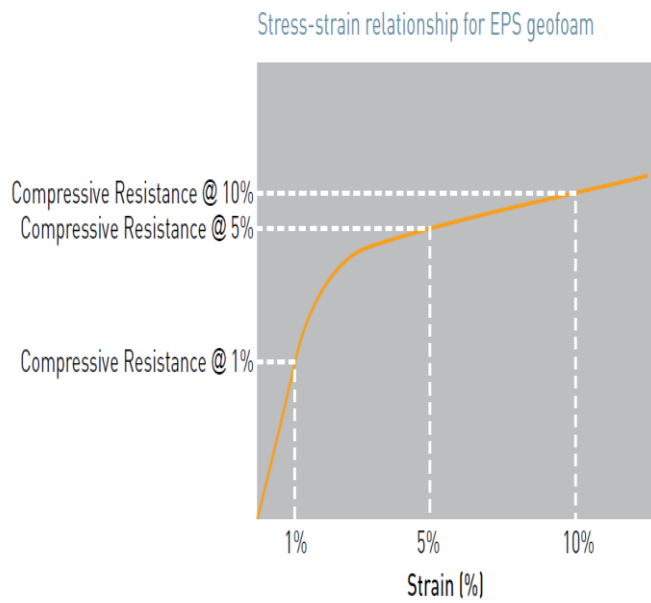
3.1Densité

La densité du polystyrène peut être considérée comme l'indice principal dans la plupart de ses propriétés. La force de compression, la résistance au cisaillement, la résistance à la traction, la résistance à la flexion, la rigidité, le comportement au fluage et d'autres propriétés mécaniques dépendent de la densité.

Les densités du polystyrène pour des applications civiles pratiques oscillent entre 11 et 30 kg / m³. **(14)**

3.2 Résistance à la compression

Polystyrène se comporte comme un matériau élastique linéaire jusqu'à une contrainte d'environ 1% comme l'indiqué la (figure 02) ci-dessous qui représentent la réponse contrainte-déformation . En conséquence, la recommandation de conception est de limiter le chargement à la résistance à la compression à 1% de contrainte. La contrainte correspondante 1% est appelée **contrainte limite élastique** mesurée dans un essai standard de compression rapide. A l'exception des applications compressibles spéciales, une contrainte de compression plus élevée, par exemple 5 ou 10%, n'est pas utilisée pour estimer la résistance à l'EPS car ces déformations dépassent la limite d'élasticité et ceci peut conduire à des déformations permanentes indésirables. **(13)**



Courbe "contrainte-déformation" lors d'un essai de compression

Figure 02 : courbe contrainte – déformations

Le tableau ci-dessous mentionne certaines propriétés physiques du polystyrène expansé à différentes densités suivant l'ASTM internationale. **(13)**

ASTM D6817 Physical Property Requirements of EPS Geofoam

Type	EPS12	EPS15	EPS19	EPS22	EPS29	EPS39	EPS46
Density, min., kg/m ³ (lb/ft ³)	11.2 (0.70)	14.4 (0.90)	18.4 (1.15)	21.6 (1.35)	28.8 (1.80)	38.4 (2.40)	45.7 (2.85)
Compressive Resistance, min., kPa (psi) at 1 %	15 (2.2)	25 (3.6)	40 (5.8)	50 (7.3)	75 (10.9)	103 (15.0)	128 (18.6)
Compressive Resistance, min., kPa (psi) at 5 %	35 (5.1)	55 (8.0)	90 (13.1)	115 (16.7)	170 (24.7)	241 (35.0)	300 (43.5)
Compressive Resistance, min., kPa (psi) at 10 % ^A	40 (5.8)	70 (10.2)	110 (16.0)	135 (19.6)	200 (29.0)	276 (40.0)	345 (50.0)
Flexural Strength, min., kPa (psi)	69 (10.0)	172 (25.0)	207 (30.0)	240 (35.0)	345 (50.0)	414 (60.0)	517 (75.0)
Oxygen index, min., volume %	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0

The typical design load limit for EPS Geofoam is the compressive resistance at 1%. Please refer to section 4.2 for additional information.

3.3 Fluage

Le comportement de fluage du polystyrène est minime à des niveaux de contrainte inférieurs à 1%, ce qui est une autre raison d'utiliser une résistance à la compression à 1% de contrainte pour la conception. Les effets de fluage augmentent significativement à des déformations plus élevées, par exemple 5 et 10%. En résumé, une résistance à la compression à 1% garantit des performances adéquates et un comportement de fluage acceptable dans les applications. **(13)**

3.4 Absorption de l'eau

Polystyrène a une structure de cellules fermées qui limite l'absorption d'eau. On peut s'attendre à une augmentation de la densité de l'EPS en fonction de l'absorption d'eau si les blocs sont installés dans une application submergée. **(13)**

3.5 Résistance chimique

Polystyrène n'est pas soluble dans l'eau, résistant à la température ambiante, et à différentes substance à savoir : (•alcalis •acides inorganiques dilués• plâtre • la plupart des alcools • ciment portland • huile de silicone • bitume sans solvant), par contre peut être endommagées et ne doivent pas entrer en contact avec certains matériaux à savoir : (hydrocarbures chlorés •solvants organiques cétones • diesel et essence• acides concentrés• les huiles végétales • graisses et huiles animales • paraffine).

La protection du polystyrène contre le contact avec les matériaux agressifs pendant la construction et après l'achèvement des travaux doit être assurée en utilisant une géomembrane résistant. **(13)**

3.6 Module élastique initial

La courbe de contrainte de polystyrène, a une portion linéaire initiale. La valeur de la pente de cette partie initiale est définie comme le module tangent initial. Il est aussi connu comme module de Young ainsi que le module d'élasticité. Le module initial est une fonction de la densité. Les chercheurs ne s'entendent pas sur une valeur constante

pour chaque densité. Pour une densité de 20kg / m³, le module initial varie entre 5Mpa et 7,75Mpa, ce qui signifie une différence de 55%. La relation est linéaire pour certains chercheurs (Horvath, 1995b et Miki, H., 1996) alors qu'elle n'est pas linéaire pour d'autres (Duskov, 1997 et Eriksson et Trank, 1991) sachant que les chercheurs ont utilisé des échantillons de dimensions variables.

3.7 Coefficient de Poisson

La valeur de coefficient de poisson est comprise entre 0,05 et 0,5 pour le polystyrène, comme le montre le tableau suivant. Ces valeurs vont d'un matériau comme l'eau (rapport de Poisson égal à 0,5) à des matériaux rigides comme le béton (le ratio de Poisson est égal à 0,15). (14)

Le coefficient de Poisson pour le PSE est approximativement de 0,12 dans la plage élastique. (13)

Reference	Yamanaka, et al. (1991)	Negussey and Sun (1996)	GeoTech (1999a)	Duskov et al. (1998)	Ooe, et al. (1996)	Sanders (1996)	Momoi and Kokusyo (1996)
Poisson's Ratio	.075	.09 and 0.33	0.05	0.1	0.08	.05 up to 0.2	0.5

Tableau: EPS Types in United Kingdom (after Sanders, 1996)

III 4.FABRICATION

Le polystyrène expansible est la matière première ou la résine utilisée pour le moulage de polystyrène expansé EPS. Le polystyrène expansible est un matériau plastique / polymère de composition chimique C₈H₈ (Ravve, 2000). Les polymères sont des molécules à longue chaîne dans lesquelles une à trois unités de base, les monomères, sont liées de façon répétée à plusieurs reprises dans un procédé appelé polymérisation. La polymérisation du monomère de styrène utilisée pour être suivie par l'imprégnation des billes de polystyrène polymérisées avec un agent gonflant. Aujourd'hui, presque tous les procédés effectuent la polymérisation et l'imprégnation en un processus en une étape, comme la montre la figure ci dessous. La réaction se produit dans un seul réacteur conçu pour réguler la température et la pression de la réaction. Divers produits chimiques sont ajoutés pour affecter la suspension du monomère dans l'eau et pour contrôler la croissance de la bille polymérisée, le poids moléculaire et d'autres paramètres nécessaires pour produire le produit souhaité. Dans la seconde phase du procédé, l'agent gonflant est ajouté sous pression et imprègne les billes de polystyrène mou. Le cycle de traitement total prend un peu moins de dix heures. Une fois terminé, le lot entier est déversé pour déshydrater le système. Les perles sont ensuite séchées. Les billes sont criblées pour obtenir différentes tailles de billes. Ils seront dans des grades différents chacun à ses propres spécifications et l'utilisation. Certaines sont bonnes pour les récipients étanches (Huntsman, 1999d), certaines sont destinées à des applications d'emballage par absorption d'impact (Huntsman, 2000), certaines sont destinées à des opérations générales de moulage de blocs et de formes (Huntsman, 1999b), etc. Au fabricant de blocs géofoam. (13)

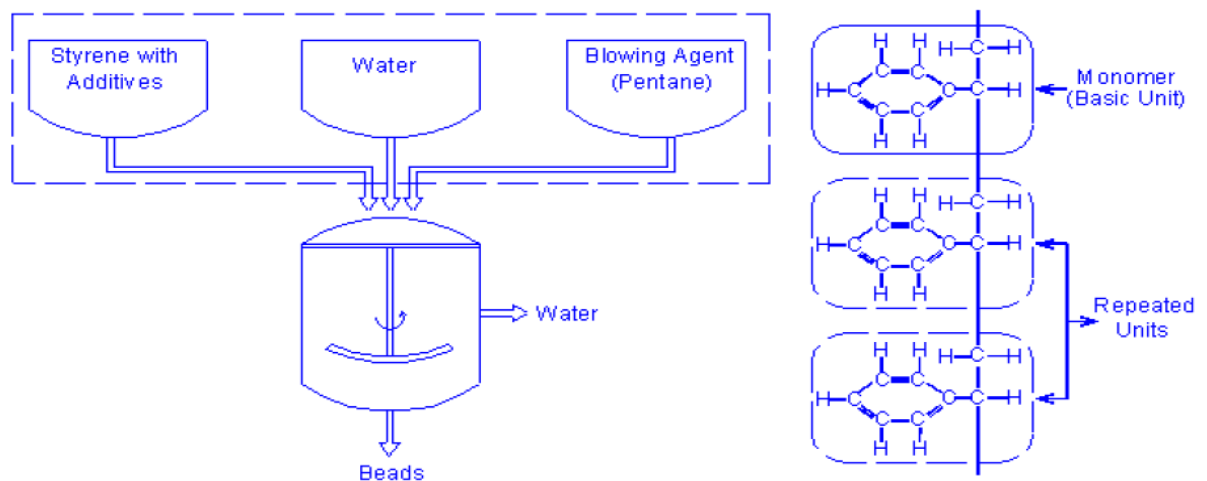


Figure 03 : Processus de fabrication du polystyrène

La figure ci dessous explique le processus de fabrication du polystyrène expansé à partir des billes en polystyrène. On peut voir cinq stades dans la figure. Les billes sont d'abord introduites dans un réservoir vertical contenant un agitateur et une entrée de vapeur contrôlée. La densité finale du matériau est déterminée à ce stade. Le réglage de la densité est effectué en contrôlant le temps pendant lequel les billes restent dans le détendeur et / ou la pression dans l'expandeur.

Deuxièmement, les perles expansées, appelées prépufts, sont stockées à l'air libre pendant quelques heures comme étape de séchage.

Troisièmement, les prépufts sont stockés dans de grands silos jusqu'à ce qu'ils soient transférés pour l'étape suivante. Pendant le stockage, ils sont autorisés à atteindre une température ambiante. Ce processus prend trois jours ou aussi peu que quelques heures. Ce processus est appelé processus de stabilisation, comme la condensation de l'agent d'expansion et la vapeur d'eau environnante se produit.

Les prépufts sont ensuite versés dans un moule de différentes tailles, selon le fabricant. Un 0.6m X 1.2m X 2.4m est une taille de moule commune. La vapeur est injectée à partir des parois du moule à travers des fentes longitudinales minuscules où la fusion a lieu. Environ 5% du polystyrène expansé recyclé (re-broyer) est déchiqueté et mélangé avec les prépufts. Une expansion et une fusion supplémentaires ont lieu. Le bloc moulé est alors poussé hors où il est finalement conduit à un lieu de stockage pour sécher (13, 11, 23)

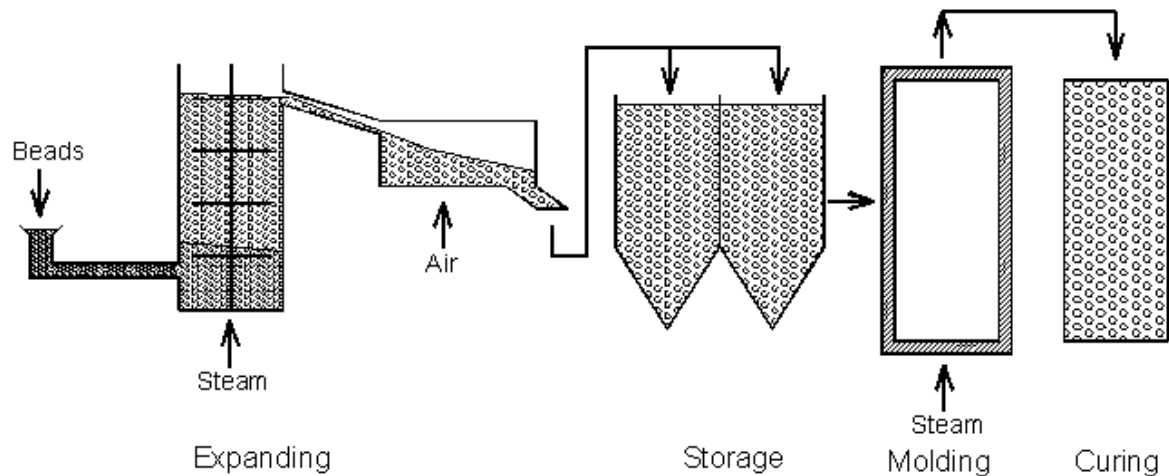


Figure 04 : processus de fabrication du polystyrène expansé

Le produit du polystyrène (EPS) de base est blanc, bien qu'il puisse être coloré autrement. Les prix des matériaux varient en fonction du type et de la densité, ainsi que du travail, de la taille et de l'emplacement.

III .5.CONCEPTION ET CRITÈRES

Nombreuses considérations de conception pour les applications de polystyrène qui comprennent les propriétés d'ingénierie et les facteurs de construction. Cette section présente quelques-uns des avantages et des caractéristiques uniques de la construction avec la géofoam EPS, ainsi que les précautions qui doivent être suivies : **(3, 1)**

- **Poids léger :** Le polystyrène expansé est fabriqué en différents poids unitaires comprises généralement entre 11,2 à 45,7 kg/m³. En conséquence, ils confèrent une faible charge statique aux sols sous-jacents, aux structures.
- **Force :** EPS geofoam est disponible dans une gamme de résistances à la compression. Un concepteur de projet peut choisir le type spécifique d'EPS nécessaire pour soutenir le chargement de conception tout en minimisant les coûts. Plusieurs types différents de polystyrène EPS peuvent être spécifiés sur un seul projet afin de maximiser les économies. Par exemple, les blocs à plus forte résistance peut être utilisée dans les zones de contraintes élevées, tandis que les blocs de plus faible résistance peuvent être utilisés dans les zones où les contraintes appliquées sont plus faibles. Il est recommandé de ne pas dépasser la résistance à la compression de 1%.
- **La stabilité :** le polystyrène est considéré comme un matériau permanent lorsque correctement spécifié et installé.
- **Isolation :** EPS est un isolant thermique efficace, a été utilisée pendant de nombreuses années comme isolant pour diverses applications de construction.
- **Exposition aux produits chimiques :** Le polystyrène peut être endommagée lorsqu'elle est exposée à certains produits chimiques.
- **Feu :** Comme beaucoup de matériaux de construction, le polystyrène est combustible. Des précautions appropriées devraient être mises en œuvre aux sites si des procédures de flammes nues, telles que le soudage, sont effectuées.

Dans les applications géotechniques, l'EPS est protégée contre l'exposition par le sol, le béton ou d'autres matériaux de couverture. Un ignifuge fait partie de la géofaom EPS. Ce retardateur inhibe les premiers stades du développement du feu.

- **Flottabilité :** En raison de sa structure à cellules fermées et léger, l'EPS est flottable. Des précautions doivent être prises pendant la conception, la construction et la post-construction pour s'assurer que les forces potentielles de flottaison sont prises en compte dans les conditions hydrologiques du site. Un supplément suffisant, c'est-à-dire un revêtement de sol ou de chaussée, ou un autre moyen de retenue passive doit être prévu contre le soulèvement. Alternativement, le matériau peut être installé au-dessus de la nappe phréatique ou la nappe phréatique peut être abaissée en utilisant des drains appropriés ou d'autres systèmes de déshydratation.

Si des blocs d'EPS sont placés sous la nappe phréatique, des techniques d'analyse et de construction supplémentaires peuvent être employées telles que:

- Une analyse pour équilibrer les forces de flottabilité avec des morts-terrains (charge permanente) suffisants pour obtenir un facteur de sécurité approprié contre le soulèvement.
- Une analyse de la nature et de la concentration de tous les contaminants dans les eaux souterraines qui peuvent affecter la durabilité de l'EPS.

En outre, parce que les charges de gravité et les forces latérales qui se développent sous

Les charges sismiques sont proportionnelles à la densité du matériau de remblayage, c'est-à-dire, plus la densité du remblai est grande, plus ces charges sont importantes. L'utilisation de polystyrène EPS légère réduit considérablement ces charges. (13)

La charge verticale agissant sur l'EPS ne doit pas être supérieure à la résistance à la compression à 1% de contrainte (40 kPa) selon les spécifications) pour éviter une déformation de fluage à long terme.

La figure ci-dessous illustre l'abaque couramment utilisé lors de la conception des structures de chaussées sur remblais léger. (22)

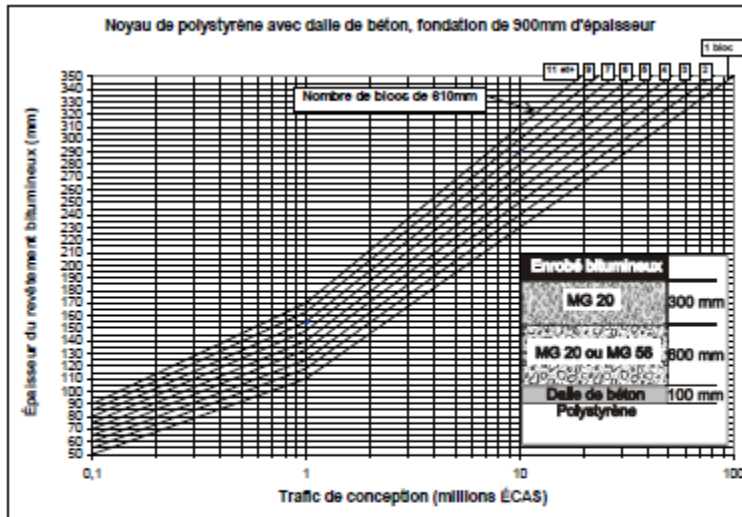


Figure 05 : abaque de conception des chaussées sur remblai légers en polystyrène

III .6.COMPORTEMENT

Certaines études ont été effectuées sur le polystyrène dans le but de comprendre le comportement de l'EPS sous différentes sollicitations :

6.1 Résistance à la compression et courbe de tension

La figure 06 ci-dessous montre la courbe de contrainte- déformation pour un essai de compression uniaxiale pour deux densités différentes. Les deux densités indiquées sont considérées comme des valeurs extrêmes pour la plupart des applications techniques réalisées jusqu'à présent. Les spécimens sont des cubes de 0,05 m testés à une vitesse de déplacement de 0,005 m / min. la courbe de contrainte –déformation peut être simplement divisée en deux lignes droites principales reliées à une partie incurvée. La pente des portions en ligne droite augmente avec la densité. La contrainte à tout niveau de déformation augmente également avec la densité. La taille du cordon n'a pas d'effet important sur la compressibilité des éprouvettes découpées (BASF Corp., 1968). (14)

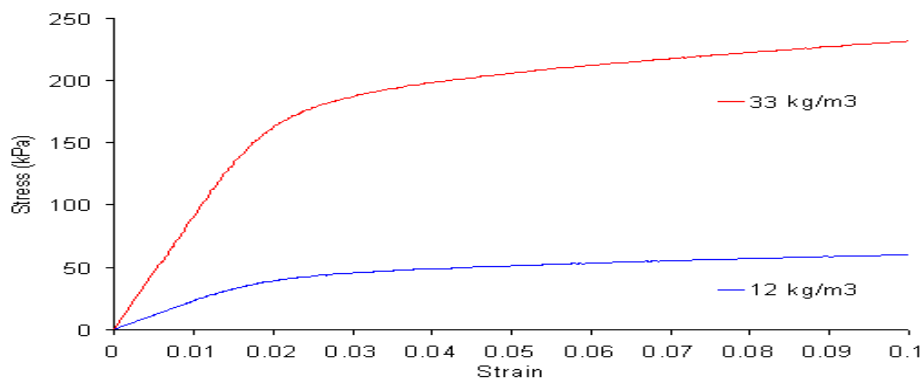


Figure 06 : courbe contrainte - déformation

Il n'y a pas de rupture de cisaillement définie sous les contraintes de compression, plus de 70% de déformations sont atteintes sans point de rupture et les essais ont été stoppés parce que le déplacement maximum de la tête de machine a été atteint. Les déformations 1%, 5% et 10% sont des déformations de référence courantes, où la contrainte est considérée comme la résistance du matériau. Le tableau suivant montre la résistance à la compression de l'EPS selon la **norme ASTM C578-95**.

Tableau 03 : résistance à la compression en fonction de la densité à 10% de déformation

Density (kg/m ³)	12	15	18	22	29
Compressive Strength at 10% Strain (kPa)	35	69	90	104	173

6.2 Module d'élasticité

Duskov (1990) a signalé que les modules d'élasticité se sont trouvés entre 13 MPa et 34 MPa sous la force d'impulsion. Ces valeurs ont été observées beaucoup plus élevées que la valeur du module d'élasticité (5MPa) obtenu sous charge semi-statique. **Duskov (1997)**, après avoir testé l'EPS de 20kg / m³, a indiqué que les basses températures, le niveau d'absorption d'eau et l'exposition aux cycles de gel-dégel, séparés ou combinés, semblent n'avoir aucune influence négative sur le comportement mécanique. **Elragi et al (2000)** ont montré l'effet de la taille de l'échantillon sur le module initial. Pour les plus gros spécimens, le module initial est plus élevé. (14)

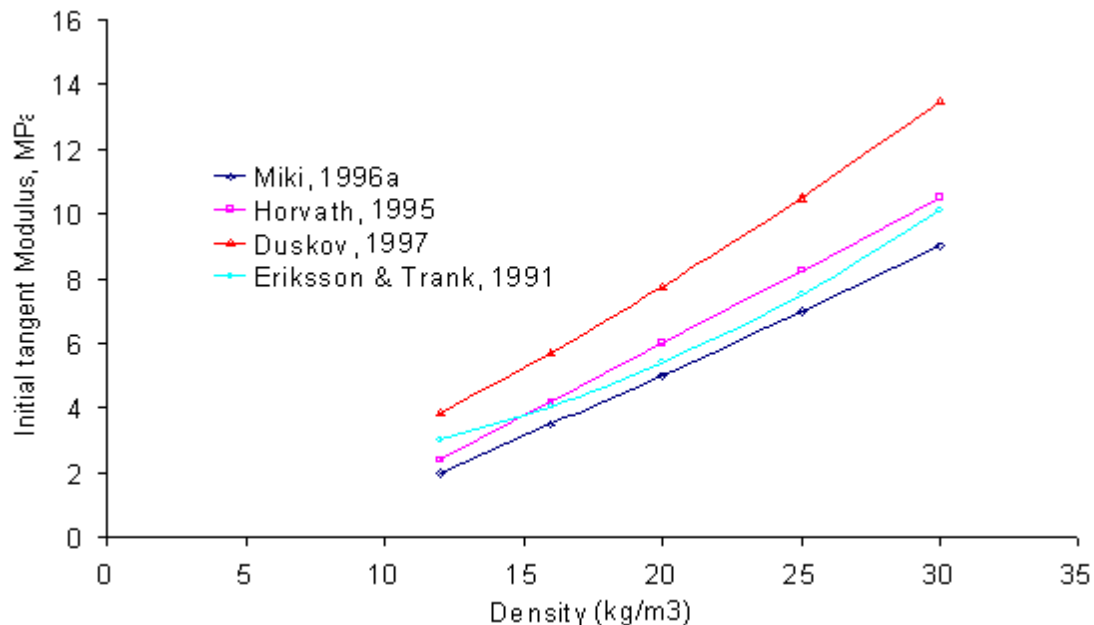


Figure 07 : module d'élasticité tangentiel en fonction de la densité selon plusieurs chercheurs

Les structures de géofoam EPS ont de bons résultats en charge statique. L'expérience au Japon a montré que les structures géofoam EPS ont également bien réalisé sous

charge sismique. Entre 1993 et 1995, de forts séismes se sont produits dans diverses régions du Japon. **Hotta et al. (1996)** ont estimé que les talus d'EPS étaient très stables pendant les tremblements de terre de fortes magnitudes allant de 6,6 à 8,1 **(14)**

6.3 Chargement cyclique

La géofoam EPS peut subir un chargement cyclique dans un certain nombre de situations. Cela peut inclure le chargement du trafic et le chargement dynamique. La majorité des essais en laboratoire et des observations sur le terrain suggèrent que le comportement en charge cyclique des blocs de polystyrène est élastique linéaire à condition que les déformations ne dépassent pas 1%. **(14)**

6.4 Durabilité

Le polystyrène expansé EPS est extraordinairement durable une fois placée dans le sol **(Horvath 1999)**, et intrinsèquement stable chimiquement dans les conditions normales du sol et des eaux souterraines. Ainsi ; les propriétés mécaniques (contrainte-déformation) du EPS ne sont pas affectées par l'enfouissement dans le sol, y compris l'absorption d'eau. **(17)**

6.5 Pression de Gonflement

Une étude examine le rôle de polystyrène expansé (EPS) de réduire la pressions de gonflement sur les structures adjacentes. Plusieurs cas hypothétiques sont présentés par lesquels des réductions sur les pressions latérales transmises dues à des sols sont examinées pour différentes épaisseurs de l' EPS. **(16)**

Il à été observé que les pressions de gonflement latérales et verticales mesurées augmentent avec le temps et l'épaisseur.

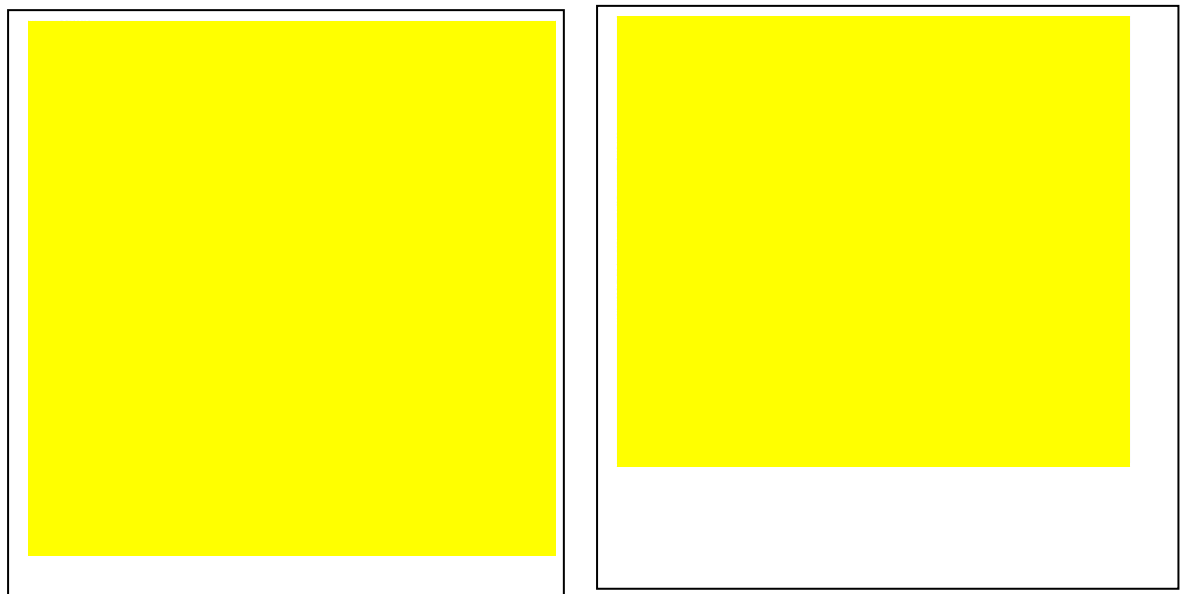
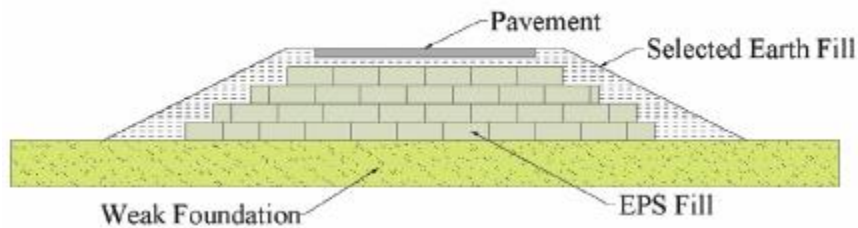


Figure08 : Pression de gonflement verticale et latérale à différent épaisseurs en fonction du temps

III .7.REGLE DE L'ART DE LA MISE EN ŒUVRE

Une coupe transversale typique présente un remblai léger en polystyrène d'EPS suivant la figure 08. Avant de construire un remblai en EPS, il faut tenir compte des points suivants: **(18)**

- La surface du sol doit être lisse et plane.
- Une couche de sable peut être placée et nivelée pour fournir une surface lisse et plane.
- Le bouchon EPS doit être construit en couches. Dans chaque couche, les blocs EPS doivent être placés de manière à chevaucher les joints dans la couche ci-dessous.
- Les blocs d'EPS doivent être coupés à la taille pour convenir au contour de remplissage requis, le haut et le bas de chaque bloc doivent être taillés avant la livraison au site.
- Les blocs EPS peuvent être taillés sur place à l'aide d'une tronçonneuse, d'une scie à main ou d'un fil chaud.
- Les stocks d'EPS devraient être ancrés contre le vent.
- Aucune installation ne doit être actionnée sur une boule de remplissage EPS jusqu'à ce qu'il ait placé au moins 150 mm de fil ou une dalle de béton de 100 mm.
- La pression maximale appliquée de l'installation de construction doit être limitée à 20 kPa.
- Lorsque l'exploitation de l'installation directement sur du polystyrène est inévitable, des planches temporaires doivent être prévues pour répartir les charges d'essieu de telle sorte que la résistance nominale de la charge ne soit pas dépassée.
- **Capuchon de protection:** un aspect de conception à examiner qui protégera le EPS contre les déversements accidentels de pétrole et les charges concentrées. EPS se dissoudra lors de la rencontre de produits pétroliers tels que l'essence ou le carburant diesel. Le capuchon de protection peut être une géomembrane ou du béton. **(11)**
- Si nécessaire, une couche de séparation peut être placée entre le haut de l'EPS et le système de revêtement sus-jacent. Une couche de séparation peut avoir deux fonctions: améliorer la performance globale et la durée de vie du système de chaussée en fournissant un renfort, une séparation et / ou une filtration et pour améliorer la durabilité de la EPS pendant et après la construction. Les choix pour la couche de séparation comprennent le géotextile, la géomembrane résistant aux hydrocarbures, la géogrille, le ciment du sol, les matériaux stabilisés pozolaniques ou une dalle de béton armé. **(13)**



III .8.CONTEXTES D'UTILISATION

Les techniques d'allègement de remblais sont utilisées particulièrement dans les cas où les délais de construction sont trop courts pour que le degré de consolidation voulu de l'argile soit obtenu et lorsque la configuration du site ne permet pas la construction d'un contreponds permettant d'assurer la stabilité des remblais appuyés sur des sols de faible portance (figure 1), (22)

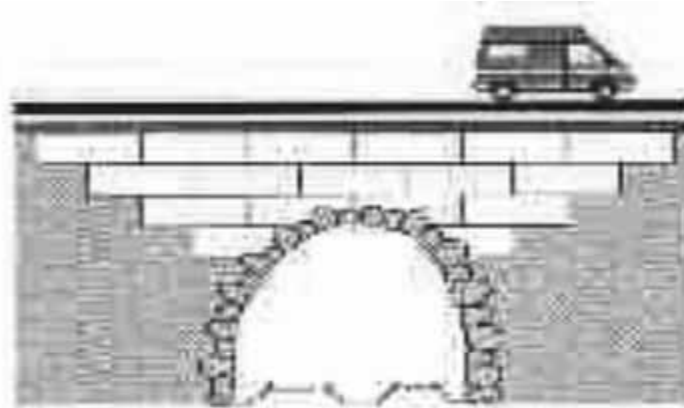
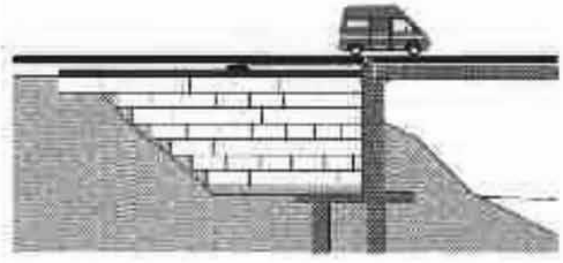
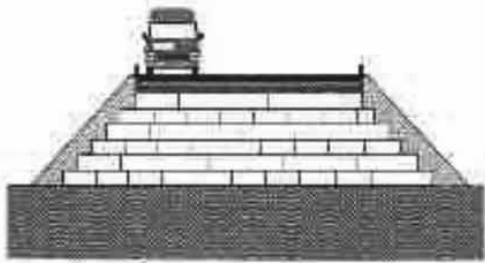


Figure 1 : Construction d'un remblai léger en polystyrène

8.1 Limitation des charges verticales

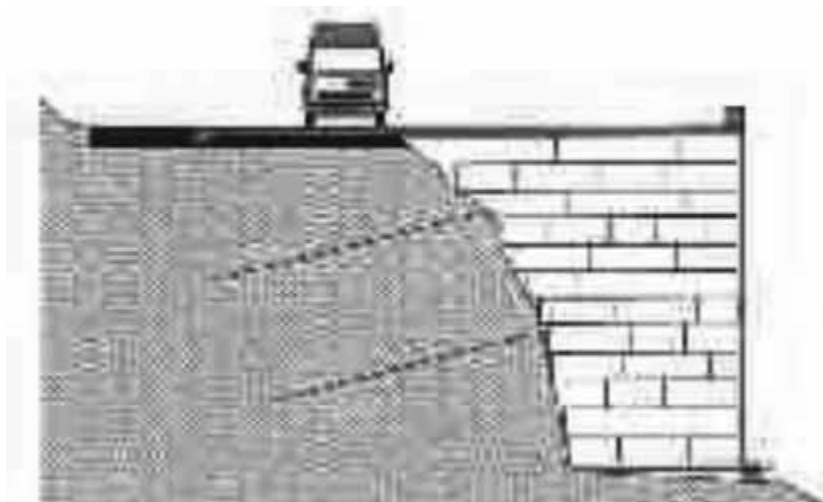
Sur sols compressibles, en réparation ou en construction neuve, la substitution de tout ou partie d'un remblai classique par du COMPOSTYRENE® permet de réduire ou d'éviter les tassements, en particulier à proximité des points durs tels que les culées d'ouvrage d'art où les tassements différentiels sont inacceptables et où les efforts horizontaux et les frottements négatifs doivent être limités. En construction neuve, COMPOSTYRENE® permet d'édifier des remblais d'accès qui peuvent réduire la longueur des ouvrages d'art. (19,23)

En rechargement ou en allègement d'ouvrages de génie civil (dalles, conduites, voûtes de tunnel) qui ne peuvent supporter les surcharges permanentes créées par un remblai classique. (19,23)



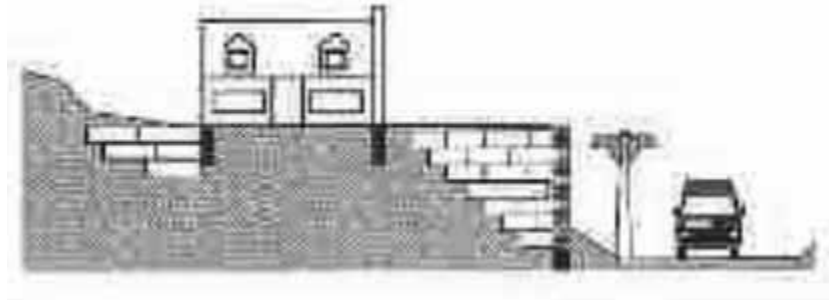
8.2 Stabilisation de glissement de terrain

La réalisation d'un remblai COMPOSTYRENE® permet l'allègement de la partie motrice du glissement. Ceci autorise la reconstitution géométrique des voies emportées par le glissement de terrain ou l'élargissement de la chaussée sur un versant instable tout en réduisant les travaux de soutènement et en améliorant les coefficients de sécurité.



8.3 Réduction des poussées horizontales et limitation d'emprise

Grâce à la faible densité du polystyrène expansé et l'absence de retransmission horizontale des efforts verticaux (coefficient de Poisson quasi-nul), le COMPOSTYRENE® permet la réduction des poussées à l'arrière des murs de soutènement ou de fondations, ainsi que la réalisation des remblais à parois verticales stables permettant des réductions d'emprise.



8.4 Protéger les chaussées contre le gel

Les polystyrènes expansés de forte densité (24 kg/m³) possèdent des coefficients de conductivité thermique très faibles. De quoi protéger efficacement les chaussées du gel avec une faible épaisseur (23)

Chapitre IV :
Remblais légers

REMBLAIS LEGERS

PRESENTATION DU PROCEDE

IV 1. PRINCIPE

Le procédé est basé sur l'utilisation d'EPS (polystyrène expansé) d'une masse volumique environ 100 fois moindre que celles des matériaux de remblai utilisés habituellement. Cette très faible densité, des caractéristiques physiques et mécaniques élevées, et sa grande stabilité chimique, ont montré la durabilité excellente d'EPS sous les sollicitations répétées en laboratoire et depuis 25 ans sur des nombreuses réalisations.

Les méthodes de constitution des remblais se divisent en deux grandes catégories (avec ou sans vides) qui peuvent chacune intégrer des options particulières liées aux talus (pente, verticalité d'un ou des 2 talus), à la hauteur du remblai (≤ 6 m ; > 6 m), à la possibilité ou non de travailler hors circulation ou de réaliser des ancrages de reprise d'efforts (tirants, dalles frottantes, etc.)(24)

Remblais routiers sans vides

a) De hauteur ≤ 6 mètres

Ces remblais correspondent surtout aux réalisations de faible et moyenne taille dont les profils entraver présentent une faible largeur d'assise par rapport à la hauteur.

Dans ces cas de remblais routiers, les blocs d'EPS sont en général de qualité EPS 90 selon la norme NF EN 14933. Ils sont montés en couches croisées et sensiblement bord à bord. Un plan de calepinage couche par couche est établi.

Les blocs sont fixés entre eux par points.

b) Cas des massifs de hauteur > 6 mètres

Pour les hauteurs de plus de 6 m et dans le cas des profils en travers de faible largeur, deux problèmes doivent être traités :

- stabilité verticale et mise en compression des blocs afin d'assurer une mise en œuvre correcte des

blocs supérieurs ;

- stabilité latérale de l'ouvrage.

Pour régler ce double problème, on réalise soit une assise intermédiaire en béton de 0,10 m d'épaisseur armée d'un simple treillis liée à une longrine, soit un réseau de longrines transversales et longitudinales.

1.2 - Remblais routiers avec vides - Massifs de largeur importante et massifs à double paroi verticale.

On retrouvera les mêmes options relatives aux problèmes de hauteur (≤ 6 m et > 6 m). Dans ce cas de figure, il est intéressant d'utiliser la technique des discontinuités sur chacune des rangées croisées, ce qui permet de diminuer les volumes d'EPS de 15 à 35 %. Ainsi il est nécessaire d'utiliser un polystyrène expansé de haute densité selon le brevet n° 97920772.7 et répondant aux critères donnés au paragraphe 2.

Un programme de calcul interne SCREG permet de déterminer les largeurs des vides, couche par couche, en fonction des charges statiques permanentes et du trafic.

Avant d'utiliser cette technique avec vides il est impératif de faire une analyse de risques notamment en matière d'incendie et de prendre des précautions nécessaires notamment lors de l'exécution. (24)

IV 2.) MATÉRIAUX UTILISÉS - CARACTÉRISTIQUES

a) Remblais routiers continus :

➤ Utilisation d'EPS de qualité EPS 90 selon la norme NF EN 14933

$10 \geq 90$ kPa à 10 % de déformation. « 10 est la contrainte en compression à 10 % de déformation »

(norme NF EN 14933).

Masse volumique apparente sèche environ 19 kg/m³(25)

b) Remblais routiers avec vides :

➤ Utilisation d'EPS de qualité EPS 120 selon la norme NF EN 14933

$10 \geq 120$ kPa à 10 % de déformation

Masse volumique apparente sèche environ 23 kg/m³

NOTA : Pour des remblais à faibles sollicitations (zones piétonnières par exemple), on peut utiliser un EPS de qualité EPS 70 selon la norme NF EN 14933.

$10 \geq 70$ kPa à 10 % de déformation

Masse volumique apparente sèche environ 15 kg/m³(25)

IV 3.) MISE EN OEUVRE

3.1 - Travaux confortatifs

Suivant la configuration de talus arrière, il peut être nécessaire de conforter ce dernier. Le plus souvent on utilise une paroi clouée (clouage plus béton projeté).

Par ailleurs, selon les données hydrologiques, il est nécessaire de réaliser des drains sub horizontaux et dans certains cas des éperons drainants.

Tous ces éléments dépendent de la configuration locale et sont déterminés à partir des études géologiques et géotechniques.

3.2 - Lit de pose

Avant la mise en œuvre des matériaux constitutifs du lit de pose, on réalise un réglage grossier du fond du terrassement avec constitution de pente en travers, mais il n'est pas nécessaire de réceptionner le fond de forme par essais de portance.

La qualité de celui-ci dépend du contexte.

Pour un massif autostable, un sable 0/6 concassé permet une facilité de réglage.

Dans le cas des remblais contigus à des talus, le sable 0/6 concassé est à exclure pour des problèmes de glissement, et doit être remplacé, suivant les conditions, par un matériau 20/40 concassé ou 40/70 concassé.

Un drain longitudinal avec des sorties transversales est indispensable.

3.3 - Montage du remblai

Les plans de calepinage détaillés de l'étude d'exécution indiquent tous les éléments permettant de

faciliter la pose des blocs.

Les tolérances dimensionnelles des blocs de base sont celles de la norme NF EN 14933 mais il faut

tenir compte également des conditions météorologiques qui voilent les blocs sur chantier.

L'interface entre le talus arrière et les blocs d'EPS est en général assuré par un remplissage grossier

constitué de chute d'EPS. Ainsi le drainage efficace de la partie du massif est correctement réalisé et

il n'y aura aucune poussée sur ce dernier, si le chapitre 3.1 est bien respecté.

3.4 - Repérage des blocs = cahier de pose :

3.4.1 – A la fabrication, l'usine repère sur chaque bloc les éléments suivants :

date de fabrication -classe d'EPS

poids-N° de fabrication ou de la série

dimensions du bloc

3.4.2 - Pour le chantier, les blocs sont tous repérés par le plan de calepinage, couche par couche, et par le listage des dimensions couche par couche

3.5 - Contrôle

3.5.1 - En usine

L'usine fournit à SCREG son plan de contrôle qualité ainsi que ses fiches de contrôle (FTP, CE, etc.) et les fiches de contrôle des lots fabriqués.

3.5.2 - Sur chantier

Un PAQ chantier définit les niveaux de contrôles de l'entreprise

- Contrôle interne
- Contrôle externe

L'entreprise est certifiée ISO 9001 version 2000

IV 4.) DOMAINES D'EMPLOI

Les applications peuvent être regroupées en trois grands domaines.

4.1 - Limitation des charges verticales

- Sur sols compressibles, en réparation ou en construction neuve, la substitution de tout ou partie d'un remblai classique par du COMPOSTYRENE® permet de réduire ou d'éviter les tassements, en particulier à proximité des points durs tels que les culées d'ouvrage d'art où les tassements différentiels sont inacceptables et où les efforts horizontaux et les frottements négatifs doivent être limités.

En construction neuve, COMPOSTYRENE® permet des remblais d'accès qui peuvent réduire la longueur des ouvrages d'art.

- En rechargement ou en allègement d'ouvrages de génie civil (dalles, conduites, voûtes de tunnel) qui ne peuvent supporter les surcharges permanentes créées par un remblai classique

4.2 Stabilisation de glissement de terrain

La réalisation d'un remblai COMPOSTYRENE® permet l'allègement de la partie motrice du glissement. Ceci autorise la reconstitution géométrique des voies emportées par le glissement de terrain ou l'élargissement de la chaussée sur un versant instable tout en réduisant les travaux de soutènement et en améliorant les coefficients de sécurité.

4.3 Réduction des poussées horizontales et limitation d'emprise

Grâce à la faible densité du polystyrène expansé et l'absence de retransmission horizontale des efforts verticaux (coefficient de Poisson quasi-nul), le COMPOSTYRENE® permet la réduction des poussées

à l'arrière des murs de soutènement ou de fondations, ainsi que la réalisation des remblais à parois verticales stables permettant des réductions d'emprise.

IV 5.)DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

Le dimensionnement est défini par le bureau d'études SCREG en fonction de l'analyse des dossiers géologiques et géotechniques s'appuyant sur des sondages. Ce dimensionnement doit être systématiquement vérifié par un bureau d'étude de mécanique des sols indépendant, notamment pour les applications sur sol compressible et les glissements de terrains.

La méthodologie de conception et le contrôle extérieur systématique permet au maître d'ouvrage de bénéficier d'une garantie décennale visée par les articles (ou les principes dont s'inspirent les articles) 1792 et suivants du Code Civil.

La maîtrise de cette conception et ce contrôle extérieur systématique permettent à SCREG de pouvoir faire bénéficier le maître d'ouvrage d'une garantie décennale qui n'est pas fréquente pour ce type de travaux.

IV 6.)DISPOSITIONS PRISES PAR L'ENTREPRISE POUR ASSURER LA QUALITÉ

Un manuel QSE (Qualité – Sécurité – Environnement) complet traite de la préparation, de la réalisation et du contrôle des remblais en COMPOSTYRENE®.

IV7).PRISE EN COMPTE DES EXIGENCES ESSENTIELLES EUROPÉENNES

Les EPS (type EPS 70, 90, 100, 120) utilisés dans le COMPOSTYRENE® satisfont aux exigences essentielles définies par le décret N° 92 647 du 8 juillet 1992 concernant l'aptitude à l'usage des produits de construction pendant leur durée de vie et font l'objet d'un marquage CE de l'usine de fabrication. Ils sont en conformité avec la norme NF EN 14933.

IV 8.)ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX, DE SANTE ET D'HYGIENE

Mobilisés par les enjeux du développement durable, les industriels d'EPS ont fait le choix citoyen de s'engager dans une démarche HQE (haute qualité environnementale). Ils ont donc confié la réalisation des FDES (fiches de données environnementales et sanitaires) à ÉCOBILAN, organisme reconnu dans ce domaine ce qui leur permet d'affirmer que l'EPS peut s'inscrire dans tout projet HQE.

Les fabricants de l'EPS s'engagent pour que l'environnement soit préservé à toutes les étapes du cycle de vie de l'EPS, de la fabrication à la valorisation. La production ne nécessite que très peu d'énergie car il est composé de 98 % d'air.

Ne contenant ni CFC (Chlorofluorocarbure) ni HCFC (Hydrochlorofluorocarbure), l'EPS préserve la couche d'ozone. Inerte chimiquement et bactériologiquement, l'EPS est sans danger pour la santé et ne génère aucune pollution de la nappe phréatique et des eaux de ruissellement au contact de ce produit. Il est 100 % recyclable.

IV 9). QUELQUES CHANTIERS DE REFERENCE

- Remblai sur sol compressible du Pont des 4 Canaux à PALAVAS LES FLOTS (34) en 1983
- Stabilisation d'un glissement à ABONDANCE RD 22 (74)en 1987
- Remblai à double parements verticaux à Crillon le Brave RD 974 (84)en 1990
- Remblai sur conduite forcée à Saint Claude LACRA (39)en 1991
- Remblai sur sol compressible RN 154 - Ouvrage SNCF à EVREUX (27)en 1994
- Remblai sur sol compressible RN 504 TENAY (01)en 1996
- Remblai sur tranchée couverte BPNL Rue Mouillard (69)en 1996
- Confortement et stabilisation d'un glissement de terrain RD 35 GERVAIS (38) en 2003
- Élargissement de voie Centre Cardio Respiratoire GORBIO (06)en 2003
- Élargissement de voie sur sol compressible RD 414 LES CAPPAN (06)en 2003
- Stabilisation de glissement de terrain RD 10 POITIERS (86)en 2004
- Allègement d'un ouvrage SNCF ligne TGV EST à TRIAUCOURT (57)en 2004
- Stabilisation de glissement de terrain MONTIGNY LE BRETONNEUX (78)en 2004
- Remblai sur sol compressible RD 514 COLOMARS (06)en 2004

- Allègement d'un ouvrage SNCF à SAINT OUEN (93)en 2005
- Allègement d'un ouvrage d'art amont de BONNEVILLE (74)en 2005
- Confortement et élargissement de voie à FAYENCE RD 563 (83)en 2005
- Remblai sur sol compressible à l'usine Place à VAUJOURS (93)en 2005
- Remblai sur sol compressible RD 1091 BOURG D'OISANS (38)en 2006
- Remblai sur sol compressible RD 69 SALLERTAINNE (85)en 2006
- Remblai allégé sur une dalle de parking à RENNES (35) en 2006
- Réduction des poussées horizontales contre un mur à LIVRY GARGAN (93)en 2006
- Remblai allégé sur une dalle de parking à CARCASSONNE (11)en 2007
- Remblai allégé sur la dalle du bâtiment technique du Tunnel du LIORAN RN 122 (15)en 2007
- Limitation d'emprise, Réduction des poussées, Hôpital St Anne TOULON (83) en 2007
- Élargissement de voie et création d'un giratoire RD 6007 ROQUEBRUNE (06)en 2007
- Allègement d'un ouvrage d'art RD 60 UKANGE (57)en 2007

IV 10.) CONSTITUTION DE CHAUSSEE

Pour la constitution des chaussées, l'expérience a montré qu'il faut considérer une plage utile d'environ 25 % de s_{10} . Ceci permet de limiter la charge statique de la chaussée à une valeur correspondante à une contrainte de 0,6 % de déformation.

L'expérience amène donc à dimensionner toutes les chaussées (assise béton comprise) avec une épaisseur de 50 cm (épaisseur minimum 35 cm et maximum 80 cm) afin d'obtenir une charge suffisante pour mettre en compression les blocs d'EPS pour profiter de toutes les surfaces de contact et pour assurer un bon coefficient de frottement entre les blocs. D'autre part, la surépaisseur acceptable de 30 cm permet de rattraper les profils en travers pour assurer les dévers de la chaussée.

La base de la chaussée est constituée d'une assise en béton de type C30 sur une épaisseur variable de 10 à 15 cm suivant le type d'utilisation. Cette assise comporte un treillis soudé de type ST40C placé à la base de la couche pour 15 cm et un ST65C pour une assise de 10 cm d'épaisseur.

Les couches traditionnelles de chaussée seront ensuite réalisées. Il y a la possibilité d'effectuer une structure de chaussée sans assise en béton. Dans ce cas un

dimensionnement spécifique est nécessaire afin d'assurer la descente des charges adaptée au projet. Les blocs en EPS sont protégés contre les infiltrations d'hydrocarbures par des membranes étanches. .(25)

IV 11). LES DISPOSITIFS DE PROTECTION

Les systèmes de murets et de longrines sont dimensionnés et prévus pour recevoir une glissière de sécurité de type GS2 dont la résistance est calculée en fonction du choc conventionnel.

Dans certains cas cette glissière peut être remplacée par une glissière béton type GBA glissante de 60 cm ou surmontée d'une glissière acier ou bois.

IV 12.) PAREMENTS

Plusieurs types de parements sont proposés afin de protéger l'EPS des rayons ultra-violet. On retient le plus souvent des bétons projetés, des enduits, des pierres, des tôles, ou, dans certains cas, des bardages en Sapin du Nord autoclave de classe 3 ou 4. Ils ne participent pas à la stabilité des massifs. Pour les talus une protection minimum de 50 cm est réalisée en matériaux argileux.

Le type de parement est aussi choisi en fonction de l'environnement du chantier notamment vis-à-vis des incendies.

IV 13.)PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES

a)Vis-à-vis des rongeurs

Tous les suivis réalisés depuis 25 ans montrent qu'il n'y a pas de cavité engendrée par des rongeurs.

b) Construction sous eau

Si la base des remblais risque de se trouver dans la nappe phréatique, il y aura lieu de faire un calcul de poussée d'Archimède ou d'utiliser des SAUL (structures alvéolaires ultralégères).

c) Feu

Le matériau EPS est combustible, mais ne propage pas le feu si la cause de l'incendie est éliminée. Pour qu'il y ait risque qu'un feu prenne sur l'EPS, il faut une flamme persistante pour créer en présence d'oxygène un point chaud. La conception du remblai doit être réalisée de façon à ce que la quantité d'oxygène disponible dans les blocs d'EPS soit insuffisante pour permettre au feu de s'étendre. Lors de l'application de la technique avec vides, le PPSPS (Plan particulier de sécurité et de protection de la santé) doit obligatoirement en tenir compte. (26-27)

D'après le système européen harmonisé de classification des produits selon leur réaction au feu, l'EPS est classé « E ».

Les représentants du constructeur (y compris ses éventuels sous-traitants) et du donneur d'ordre doivent établir un permis de feu contradictoirement et préalablement à tous travaux par point chaud pour identifier les risques spécifiques à chaque intervention et définir les moyens à mettre en œuvre pour la prévention des dangers d'incendie. Par exemple, il est interdit de fumer, d'utiliser un chalumeau ou toute autre source de feu sur le chantier. . (26-27)

d) Hydrocarbures

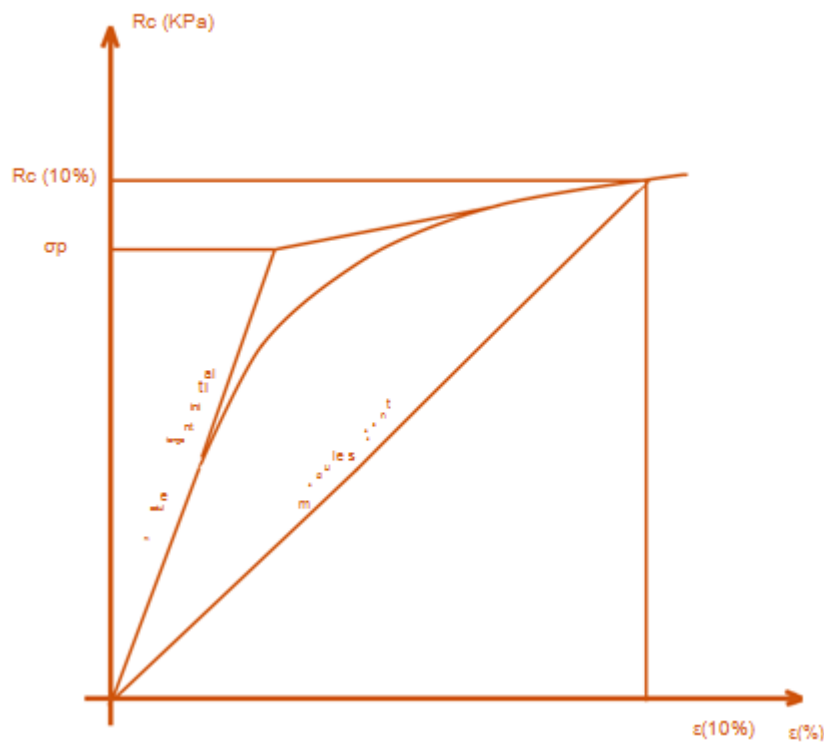
L'EPS est sensible aux hydrocarbures. Il est donc important de réaliser des pentes et des caniveaux pour évacuer de grandes quantités en cas d'accident.

e) Agressions extérieures

Une protection latérale est obligatoire pour prévenir les agressions extérieures et l'attaque par les UV.

IV 14.)PROTECTION VIS-À-VIS DU VENT

Une note de calcul qui prend en compte le renversement par l'action du vent et des forces centrifuges provoquées par les véhicules, a été établie dans le cas des remblais à double parois vertical



Courbe "contrainte-déformation" lors d'un essai de compression

Cette norme a été remplacée par la norme NF EN 13163 en août 2002.

En mai 2008 apparaît une nouvelle norme européenne (NF EN 14933) relative aux produits utilisés pour « l'isolation des bâtiments, de leurs équipements, des installations industrielles et des applications du génie civil ». Elle complète la norme NF EN 13163 et « spécifie les exigences auxquelles doivent satisfaire les produits manufacturés en polystyrène expansé utilisés pour l'isolation thermique des routes, des chemins de fer, des zones à forte circulation, des remblais allégés pour la réduction de la poussée verticale et horizontale des terres et autres applications du génie civil ». Ces documents divisent en différents « types » les produits en polystyrène expansé. Chaque type doit satisfaire deux conditions différentes en même temps afin de garantir les performances du produit.

Ces deux conditions qui définissent la classification des produits EPS sont :

➤ la contrainte en compression s_{10} (kPa). L'essai consiste à « comprimer l'éprouvette à l'aide du plateau mobile à une vitesse constante de déplacement égale à $d/10$ par minute avec une tolérance de $\pm 25\%$, d étant l'épaisseur de l'éprouvette en millimètres. Conduire l'essai jusqu'à la limite de résistance de l'éprouvette et en déduire une valeur de la résistance à la compression, ou jusqu'à 10% de déformation relative et en déduire une contrainte en compression à 10% de déformation relative » (Norme NF EN 826), et

➤ la résistance à la flexion (kPa).

La norme NF EN 14933 fournit d'autres informations pour notre domaine d'application:

➤ la méthode de détermination du comportement sous charge cyclique à onde carrée de l'EPS y est décrite. Cet essai de fatigue est destiné aux matériaux utilisés pour les remblais de voie ferrée.

➤ « Les produits EPS répondant aux exigences [de la classification des produits EPS (tableau C1 de l'annexe C de la norme NF EN 14933)] sont censés présenter une déformation de fluage en compression de 2% au maximum après 50 ans, s'ils sont soumis à une contrainte en compression permanente de $0,30.s_{10}$ » (norme NF EN 14933). La vitesse de fluage diminue au cours du temps. Elle augmente naturellement avec la valeur de la contrainte appliquée et la température, mais elle diminue notablement lorsque la masse volumique de l'EPS augmente.

➤ « L'EPS répond aux exigences de composition données dans le document de travail du Service de la Commission « Produits de construction et réglementations sur les substances classées comme dangereuses ».

➤ Lors de l'installation de produits EPS, aucune précaution particulière ne doit être prise par les opérateurs, puisqu'il ne s'agit pas de produits irritants ou toxiques.

➤ Les produits EPS peuvent aisément être coupés sur site à l'aide d'outils de découpe normaux. » (Norme NF EN 14933).

Lors des études réalisées en laboratoire par le LRPC d' Aix en Provence entre 1982 et 1989, il est apparu très rapidement que les grandeurs des caractéristiques de l'EPS dans la norme ne sont pas satisfaisantes afin de caractériser le comportement mécanique dans les applications routières .Il reste à considérer les valeurs des paramètres suivants :

➤ le module tangent initial E ($6 \pm 1,5$ MPa pour un EPS de masse volumique $\rho = 20$ kg/m³)

De plus, les nombreux essais réalisés ont permis d'affiner les caractéristiques des types d'EPS de la norme. Ainsi :

Si la vitesse de compression influe notablement sur la courbe de déformation, elle n'altère pratiquement pas celle du module tangent E.

Les cycles de chargement – déchargement effectués dans le domaine élastique d'EPS n'engendrent pas de déformations irréversibles.

En conclusion des études de laboratoire et des expériences réalisés sur 25 ans ainsi que des caractéristiques forfaitaires des produits EPS utilisables pour des applications routières sont aujourd'hui définies ; elles conduisent à éliminer certaines classes de la norme, ne respectant pas les seuils suivants :

➤ Résistance à la compression ≥ 90 kPa ➤ Masse volumique sèche ≥ 19 kg/m³

➤ Enfin le coefficient de frottement entre blocs d'EPS est de l'ordre de 0,5, ce qui correspond à un angle de frottement proche de 27°.

NOTA 1 : Un bloc d'EPS maintenu en immersion de longue durée peut absorber de l'eau en quantité telle que sa masse volumique apparente atteigne 100 kg/m³. L'ascension capillaire de l'eau dans l'EPS est négligeable.

NOTA 2 : Pour certains cas piétonniers par exemple, l'utilisation d'EPS moins dense peut être envisagée.

Parallèlement aux études de laboratoire, des essais en vraie grandeur ont également été réalisés : par exemple, le remblai d'essai édifié en 1983 dans le cadre des études de la construction en site compressible de l'échangeur de Mandelieu sur l'autoroute A8.

Cette expérience, qui a permis de comparer le comportement d'un ouvrage allégé et celui d'un remblai classique, s'est avérée particulièrement concluante en faveur du premier, tant sous charge constante que sous sollicitations dynamiques. Elle a également constitué une première référence adoptée par la DDE de l'Hérault pour l'ouvrage de Palavas-les-Flots réalisé à la fin de 1983.

On citera enfin les pratiques développées en Norvège dès 1970 et d'autres études réalisées par des laboratoires universitaires dans le cadre de recherches appliquées.

Le travail de nombreux centres de recherche dans le monde ayant réalisé des études et des chantiers représentatifs permettent de moderniser cette technique aujourd'hui également en France (on citera surtout l'Allemagne, les Pays Bas, les États-Unis et le Japon).

IV.1)CARACTERISTIQUES DU COMPOSTYRENE

COMPOSTYRENE® est un ensemble composé de produits mis en œuvre selon un procédé totalement établi.

Pour les applications routières, les EPS utilisés sont du type EPS 90, selon la norme NF EN 14933, et ont les caractéristiques minimales en accord avec les spécifications indiquées précédemment, à savoir :

➤ $r = \text{environ } 19 \text{ kg/m}^3$ ➤ $s_{10} = 90 \text{ kPa}$ ➤ $E = \text{environ } 6 \text{ MPa}$

Pour les remblais de grandes largeurs, une fabrication du type EPS 120 offre des caractéristiques minimales supérieures :

➤ $r = \text{environ } 23 \text{ kg/m}^3$ ➤ $s_{10} = 120 \text{ kPa}$ ➤ $E = \text{environ } 8 \text{ MPa}$

Celles-ci autorisent des espacements entre blocs. Avant d'être mise en œuvre lors de la construction d'ouvrages réels, cette technique a fait l'objet d'essais sur des plots isolés, et une note de calcul de l'entreprise en justifie les nouvelles dispositions.

Par ailleurs, la limitation des charges supportées par les blocs, à seulement 25 % de s_{10} (ce qui correspond à une contrainte à 0,6 % de déformation), valeur en deçà de la valeur limite fixée à $0,3 s_{10}$, garantit un bon comportement des ouvrages vis-à-vis du fluage. Des vérifications ont été faites par instrumentation sur certains remblais.

NOTA : Si le remblai ne supporte pas de charges routières de type PL, la valeur de la contrainte à la compression à 0,6 % de déformation sera ramenée à la contrainte à 0,9 % de déformation, ce qui reste toujours dans la partie linéaire de la zone de comportement élastique du matériau.

En fonction du type de projet une étude de dimensionnement sera réalisée au cas par cas.

Dans d'autres pays européens un certain phénomène de fluage d'EPS est accepté dans le domaine routier car il reste négligeable sur 50 ans et est facilement rattrapable lors des travaux d'entretien de la couche de roulement. L'application de cette théorie permet d'admettre des charges plus importantes sur un remblai en EPS que celles autorisées à 25 % de s_{10} .

Le procédé de mise en œuvre a été élaboré au fil des réalisations qui, à ce jour, totalisent plus de 250 ouvrages (remblais sur sols compressibles, sur ouvrages enterrés, franchissements des zones instables, allègement de dalles, élargissement de voiries, limitations d'emprises), représentant un volume de l'ordre de 250 000 m³.

Il est entièrement décrit dans un Manuel Qualité – Sécurité – Environnement adapté à chaque projet d'ouvrage, et qui spécifie notamment l'organisation générale d'entreprise, l'identification et la réception des blocs en EPS utilisés, les points d'arrêt, la gestion des non conformités ainsi que les procédures de préparation et de suivi de chantier.

Des notes de calcul justifient le dimensionnement de l'assise en béton et le plan de calepinage de chaque ouvrage.

Une étude géotechnique est également établie pour tout ouvrage sur sols compressibles ou lors du franchissement d'une zone instable. Outre la justification de l'allègement, ce rapport traite également de la stabilité externe de l'ouvrage et des dispositions confortatives telles que le clouage de la fouille et le drainage.

COMPOSTYRENE® apparaît donc comme un ensemble cohérent et fiable, mettant en œuvre selon une technique totalement maîtrisée des produits aux caractéristiques supérieures aux minima exigés pour les applications routières des EPS. Les dimensionnements propres à chaque cas sont justifiés selon les règles ou les méthodes en usage.

IV 1.1.) CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT ET DU PROCÉDÉ

IV 1.1.1 Produit

Les caractéristiques du produit COMPOSTYRENE

Pour les remblais routiers continus (sans vides) ou pour les remblais à faibles sollicitations, on utilise respectivement deux classes de produits définis dans la norme NF EN 14933 : EPS 90 et EPS 70.

Pour les remblais routiers discontinus (avec vides), l'Entreprise utilise l'EPS 120 conforme à la norme NF EN 14933, produit ayant fait l'objet du brevet n° 97920772.7.

Sur chantier, il convient de vérifier la conformité des produits à ces classes.

Sous réserve de la vérification de la nature des produits qu'il est prévu d'utiliser en fonction de l'ouvrage, les études de laboratoire et les essais en vraie grandeur ont montré que ces produits ont des caractéristiques satisfaisant une utilisation routière.

IV 1.1.2 Procédé

Au niveau des études, la procédure définie par l'Entreprise comprend :

- une étude géologique et géotechnique du site (y compris l'aspect hydrologique),
- le dimensionnement des ouvrages réalisés par le bureau d'études de l'Entreprise qui propose un projet de conception, ce dernier étant validé, si nécessaire, par un bureau de mécanique des sols extérieur à l'Entreprise.

Pour la technique des remblais avec vides, un programme de calcul permet de déterminer les largeurs des vides possibles en fonction des charges statiques permanentes et du trafic.

Au niveau de la réalisation sur chantier l'Entreprise met en application son manuel QSE ; elle s'appuie également sur les documents définissant l'état de l'art de la technique. Quel que soit le cas – remblais avec ou sans vides –, le procédé COMPOSTYRENE® apparaît bien maîtrisé par l'Entreprise qui peut proposer d'ailleurs au Maître d'œuvre une garantie décennale des ouvrages. (24)

IV 1.2.) COMPORTEMENT EN PLACE Résultat des enquêtes

Toutes les enquêtes effectuées sur les ouvrages sélectionnés par le CFTR aboutissent à la même conclusion : l'utilisation et la mise en œuvre du COMPOSTYRENE® lui-même en remblais n'a donné lieu à aucune pathologie ; il n'y a aucune déformation des massifs mis en œuvre, ni tassement imprévisible, si on respecte les données de l'Avis Technique. Le comportement de COMPOSTYRENE® dans les ouvrages est donc satisfaisant.

IV 1.2.1 Durabilité

Depuis près de trente ans, l'Entreprise a réalisé en France plus de 250 chantiers en COMPOSTYRENE®. Sous réserve de respecter les dispositions constructives et la protection contre les agressions extérieures, notamment la protection vis-à-vis des UV ou des produits dissolvants (hydrocarbures), le COMPOSTYRENE® ne pose pas de problème de durabilité à l'échelle de la durée de vie d'un ouvrage routier.

A ce jour, on n'a pas relevé de désordre imputable à une évolution des caractéristiques dans le temps du COMPOSTYRENE®.

IV 1.3).DOMAINE D'UTILISATION ET LIMITES D'EMPLOI

Les diverses utilisations proposées par l'Entreprise sont données dans le Chapitre I § 4 et correspondent à trois fonctions principales :

- limitation des charges verticales ;
- stabilisation des glissements de terrains ;
- réduction des poussées horizontales et limitations d'emprises.

Les chantiers réalisés à ce jour sans désordre confirment le domaine d'utilisation proposé.

Les limites d'emploi de la technique à base de COMPOSTYRENE® sont d'ordre techniques et économiques: - au plan technique : la plus forte épaisseur de COMPOSTYRENE® mise en œuvre à ce jour est de 23 mètres. Des hauteurs de remblais aussi importantes nécessitent une étude spécifique. Par ailleurs, la mise en place de COMPOSTYRENE® sous le niveau de l'eau doit se faire avec la plus grande prudence, après vérification de la poussée d'Archimède . Il convient également de limiter les charges permanentes appliquées sur le COMPOSTYRENE®, conformément aux prescriptions du

-au plan économique : cette technique, d'un coût relativement élevé par rapport aux remblais classiques, reste compétitive face aux techniques habituelles de confortement(28 -29)

IV 1.4). PROCEDURES A RESPECTER

Le Maître d'œuvre doit veiller particulièrement aux points suivants :

- existence d'une étude préalable de nature géotechnique et le cas échéant hydrologique ou hydraulique ; - existence de l'étude de dimensionnement du remblai et des ouvrages annexes ;

-vérification de la conformité des produits utilisés aux caractéristiques des normes et aux prescriptions du marché ;

-contenu du PAQ et du PPSPS de l'Entreprise et contrôle de leur application effective au chantier.

Dans le cas où l'Entreprise assure le rôle de concepteur, elle peut faire bénéficier le Maître d'ouvrage d'une garantie décennale.

Enfin, à l'issue du chantier, le Maître d'œuvre doit prévoir un suivi de l'ouvrage par des visites périodiques : contrôle visuel, relevé des déformations éventuelles, désordres sur le remblai lui-même ou sur les ouvrages annexes. (30-31)

Chapitre V :
Geosynthétique et géotechnique
routières et ferroviaires

GENERALITE SUR LES GEOSYNTHETIQUES

V. 1) Définition

Un géo synthétique est le terme générique désignant un produit dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande, ou de structure tridimensionnelle, pour assurer aussi bien un rôle de drain, de filtre, de séparation ou de renforcement, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans des différents domaines, tels que la construction routière, les ouvrages souterrains, les travaux hydrauliques, les chemins de fer, les terrains d'aviations...etc.

V. 2) Origine des géo synthétiques

Depuis une trentaine d'années, l'utilisation des matériaux géo synthétiques est largement étendue à tous types d'ouvrages de génie civil, parce qu'ils sont faciles à mettre en œuvre et assez peu coûteux...etc.

La littérature parle d'une première date en 1962, en Caroline du sud (USA), où les premières parcelles de route utilisent des tissus de coton. Le résultat est probant, puisque la route reste en bon état jusqu'à ce que le matériel se dégrade.

La deuxième innovation dans ce domaine fut l'utilisation de textile technique comme drain et comme filtre. Le fait que le liquide puisse traverser un matériel poreux tout en retenant une partie ou la totalité du sol adjacent, a permis le développement d'un matériau synthétique plus performant. Ainsi, le géo synthétique permet de remplacer la couche de sable, drainante et filtrante. La fonction de filtration, autant au niveau de l'eau que des sols a permis aux géo synthétiques de prendre de l'essor dès 1930. C'est à cette date que les manufacturiers de textiles européens transforment leurs machines traditionnelles et développent de nouvelles gammes de produits orientés vers une utilisation en géotechnique.

Enfin, une troisième application importante des géo synthétiques fut la réalisation de barrière imperméable permettant d'empêcher le mouvement des liquides sous forme de caoutchouc synthétique vers 1940. Les premières géo membranes polymériques telles que le polyéthylène de haute densité (PEHD) voient le jour au début des années 80 et n'ont cessé de se développer depuis. À la fin des 80, le mélange d'un support synthétique avec un matériau naturel comme l'argile est utilisé sous le nom de géo composite bentonitique (GVB). (34-36)

De nos jours, les fonctions remplies par les géo-synthétiques, spécifiquement dans le domaine du génie civil, sont :

- la séparation des sols ;
- le renforcement des structures (horizontale et verticale) ;
- le drainage des liquides ;
- la filtration des sols ;
- l'imperméabilisation des ouvrages ;
- le contrôle de l'érosion ;
- la protection des ouvrages.

Leurs applications sont parfaitement documentées, les caractéristiques techniques maîtrisées et en perpétuelle évolution pour s'adapter aux besoins changeant de la société. De nombreux documents, guides de sélection, plan et coupe type issus du législateur servent désormais de cadre de référence dans le domaine de la spécification des ouvrages utilisant des géo-synthétiques. (34-36)

V. 3). Différents types des géo-synthétiques

Les géo-synthétiques sont produits sous différentes formes à partir de matières synthétiques sur la base de divers polymères provenant de l'industrie chimique (polyéthylène, polypropylène, polyester, fibres de verre, fibres végétales...). Les centaines de produits géo-synthétiques existant actuellement sur le marché peuvent être classés en 6 groupes, d'après les matières premières utilisées, les modes de fabrication et les domaines d'utilisation :

V 3.1.)Géotextiles

Matière textile, plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), peuvent être non tissé, tissé ou tricoté utilisé en contact avec le sol ou d'autres matériaux dans des divers domaines. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion. (34-36)



Figure 1 :une nappe de géotextile

V 3.1.1). Géotextile non tissé

C'est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée un voile ou d'une nappe de fibre, orientée selon une direction ou distribuée aléatoirement, et dont la liaison peut être de différents types :

la liaison mécanique : est faite par entrelacement des fibres, à partir d'une série d'aiguilles qui s'enfoncent dans la nappe qui défile (non tissé aiguilles).

la liaison chimique : est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des décomposées proches des caoutchoucs naturels.

la liaison thermique : est faite par calandrage (effets conjugués de la chaleur et de la pression) entre deux rouleaux presseurs chauffants. On obtient une fusion partielle des points de contacts des fibres (non tissé thermo soudé). (34-36)

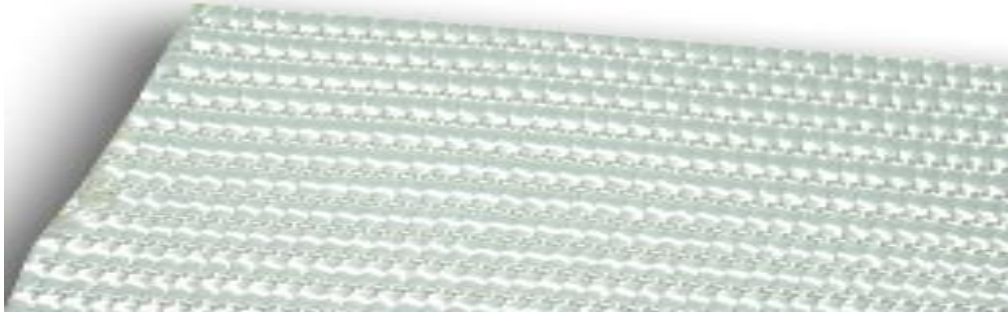


Figure 2 : Géotextile non tissé

V 3.1.2). Géotextile tissé

Les tissés sont soit des tissés de fils mono filaments, soit des tissés de fils multi filaments dont chaque fil est constitué de plusieurs brins élémentaires soit des tissés de bandelettes de films extrudés à base de polyéthylène, ou de polypropylène. Le tissage permet d'obtenir un module de traction élevé, une faible déformabilité et une régularité des pores intéressante sur le plan hydraulique cependant il entraîne une anisotropie en plan. (34-36)

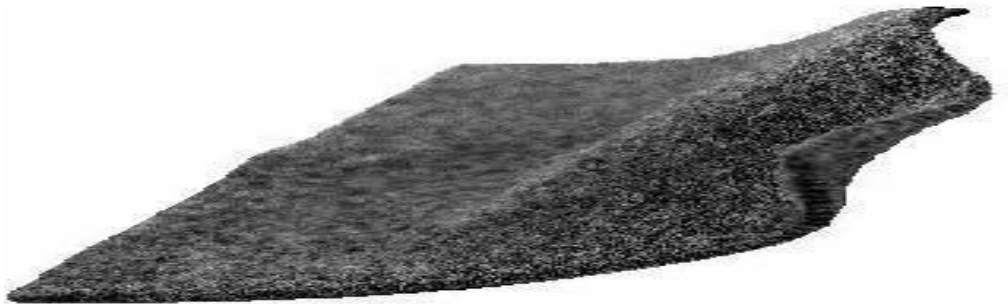


Figure 3 : Géotextile tissé

V 3.1.3). Géotextile tricoté

C'est un géotextile produit par assemblage de deux nappes de fils parallèles au moyen d'un fil de liaison, de façon à obtenir la répartition géométrique désirée.

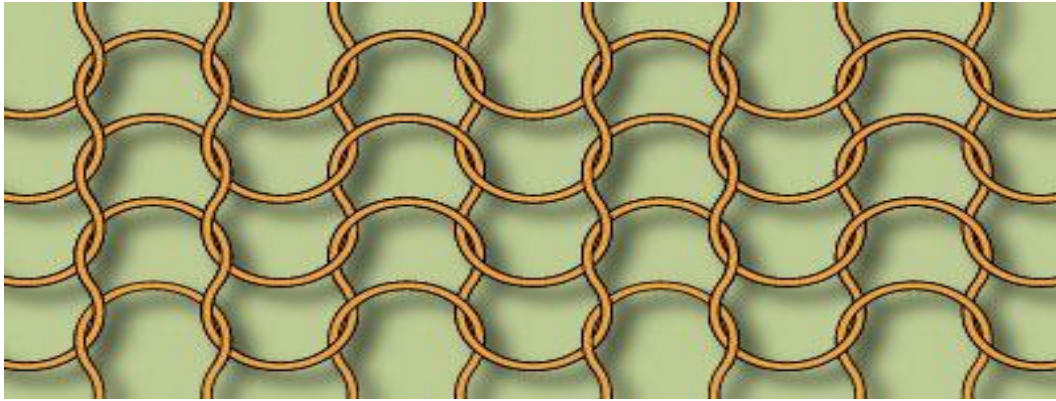


Figure 4 : Géotextile tricoté

V 3.1.4.)Géotextile tube (géo tuyaux)

C'est un géotextile en forme de tube tissé sur un métier circulaire. L'emploi d'un géotextile tube présente des avantages pour les fondations sur colonnes ballastées, et sont couramment utilisé en installation de stockage de déchet. (34-36)

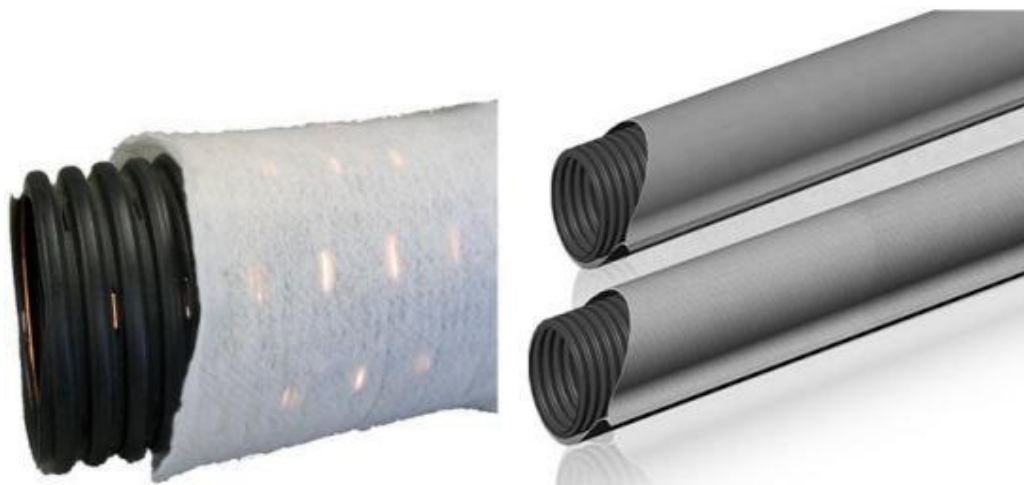


Figure 5 : la forme du géo tuyaux

V 3.2). Géogrille

C'est une structure plane, à base de polymère, constituée par un ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures sont des dimensions supérieures à celle des constituants. Elles sont utilisées en contact avec le sol pour renforcer les fondations, emblais...etc. Elles sont disponibles avec différentes résistances à la traction (entre 20 kN/m et 1000 kN/m) et différentes ouvertures de maille. Les caractéristiques de traction et

d'allongement des géogrilles ne varient que faiblement sous des variations importantes de température et sous des contraintes permanentes. Elles sont faciles à manier et à mettre en œuvre, car elles peuvent être déroulées et pliées. Elles peuvent être facilement découpées aux dimensions voulues et n'ont pas de bord coupant entraînant des blessures. (34-36)



Figure 6 : la mise en place du géogrille

Il y a deux types de géogrilles : uniaxiale et bi-axiale

3.2.1. Géogrille uni-axiale

La résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal) que dans l'autre sens.

3.2.2. Géogrille bi-axiale

La résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal.

3.3. Géofilet

C'est un géosynthétique constitué d'ensemble de tiges parallèles et superposés entièrement reliés à d'autres ensembles similaires selon des angles variables. Dans le cas d'un géofilet le liage est constitué par des nœuds, les filets sont toujours souples, alors que les grilles sont généralement rigides.(34-36)



Figure 7 : un modèle de géofilet,

Domaines d'application

V.4.1) Les remblais routiers et ferroviaires

Les routes et autoroutes sont de la plus haute importance pour le développement d'un pays. Le trafic répété de véhicules lourdement chargés, les conditions climatiques et les propriétés mécaniques des matériaux employés dans ces constructions peuvent entraîner une durabilité bien moindre des chaussées routières que ce qui était attendu. Bien que cet aspect soit plus largement développé au chapitre II. La présence du géo-synthétique dans ce domaine peut apporter les bénéfices suivants :

- réduction de l'épaisseur du remblai ;
- réduction de la déformation latérale du remblai
- réduction de la déformation latérale du remblai ;
- amélioration de la distribution des contraintes ;
- amélioration de la propagation des efforts verticaux ;
- réduction de la déformation verticale due à l'effet de membrane ;
- augmentation de la durée de vie de la route ;
- réduction des besoins d'entretien ;
- réduction des coûts de construction et d'entretien de la route.(35)



Figure 12 : Un géosynthétique dans une construction routière
5.2. Stabilisation des talus

Les géosynthétiques de renforcement sont utilisés en couches horizontales pour stabiliser les pentes dans le cas de risques potentiels de rupture profonde. Le massif renforcé peut faire partie du rétablissement d'une pente et/ou renforcer les talus d'un remblai en terre.

Les couches de renforcement permettent de construire des pentes avec une inclinaison plus raide que les pentes non renforcées. Il peut être nécessaire de stabiliser la surface de la pente (particulièrement lors de la mise en place et du compactage du remblai) en utilisant des renforts secondaires relativement courts et moins espacés et/ou en retournant les couches de renfort au parement. Cela peut exiger l'emploi de matériaux géosynthétiques retenant une fine couche de sol comme des géocellules ou des géo-mats relativement légers couramment utilisés pour ancrer temporairement la végétation. La figure ci-dessous montre un exemple de réparation d'une pente par une structure de sol renforcée par un géosynthétique.

V.4.2). Les remblais

La construction des remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur. Dans ce contexte, l'utilisation de nappes géosynthétiques pour améliorer la stabilité de ces remblais est une des techniques de renforcement de sol parmi les plus efficaces et largement éprouvée. Pour ces problèmes, les géosynthétiques peuvent être efficacement utilisés pour :

réduire les déplacements des sols compressibles causés par leurs faibles portances (figure ci-dessous) ;

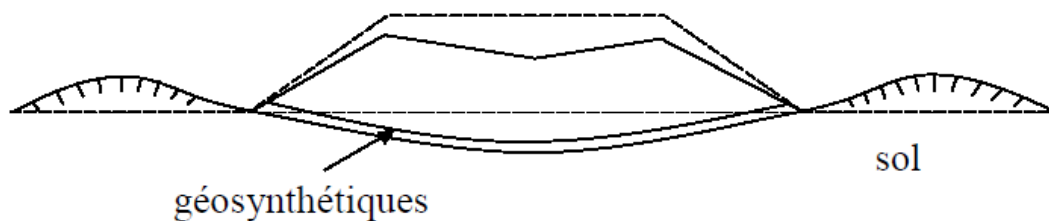


Figure 14 : un géo-synthétique sous-sol compressible

prévenir une rupture d'ensemble du remblai et du sol de fondation ;

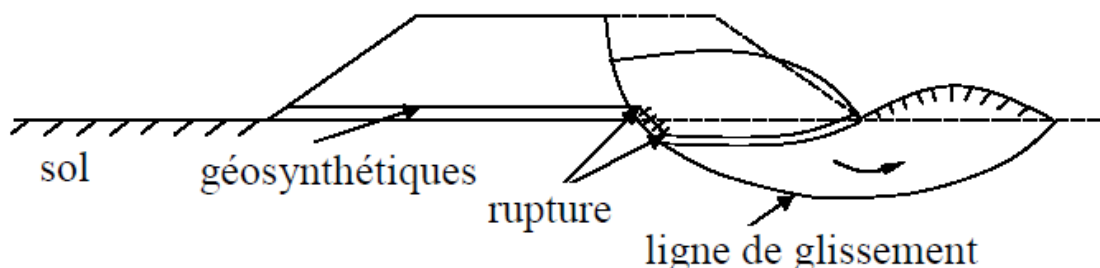


Figure 15 : une nappe géo-synthétique pour une construction d'un remblai

prévenir une rupture par glissement le long de la nappe géo-synthétique

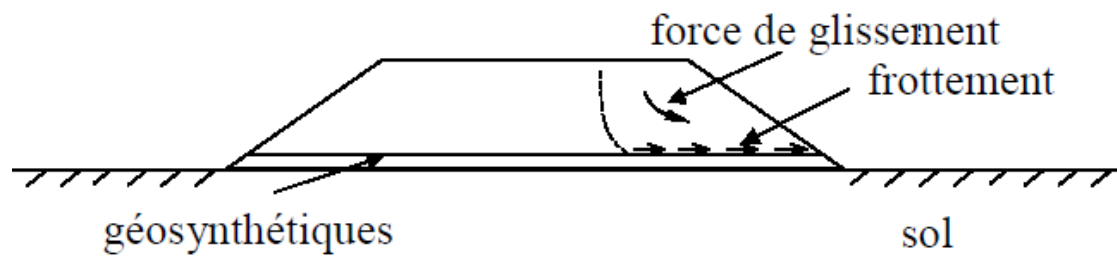


Figure 16 : une nappe géo-synthétique dans une construction une pente

V.5)Autre application

Les géo-synthétiques peuvent aussi être utilisé pour :

- l'étanchéité des ouvrages hydrauliques ;
- l'installation de stockage de déchet et couverture ;
- renforcement des dispositifs d'étanchéité sur pente ;
- drainage des tunnels et des ouvrages souterrains ;
- les ouvrages de protection ; (34-36)

V.6.)Géo-composite

Un géo-composite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géo-synthétique, par exemple une géo-grille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (Fonction de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement. Les géo-composites empêchent dans le même temps l'apparition de fissures et

L'élargissement de celles existantes. Ceci grâce à leur capacité d'absorption des forces de cisaillement. Les géo-composites permettent également de renforcer les enrobés, non seulement en travaux neufs, mais aussi en entretien et réparation, La limitation de l'apparition et de l'élargissement des fissures augmente de ce fait la durée de vie des chaussées. (34-36)

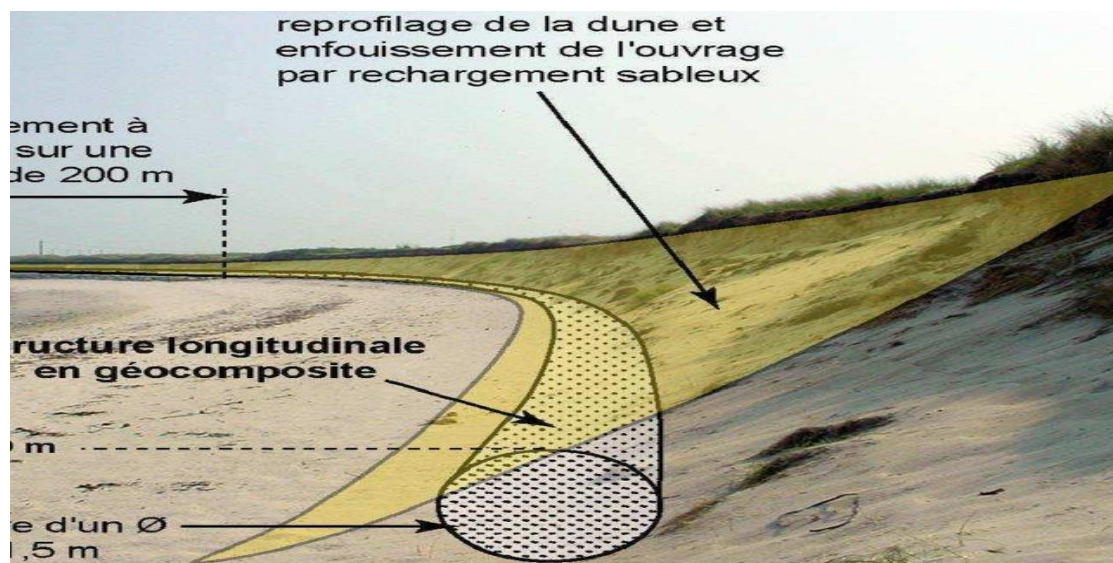


Figure 2 : la structure d'un géo composite

V.7)Infrastructure de transport

Les infrastructures de transport sont l'ensemble des installations fixes qu'il est nécessaire d'aménager pour permettre la circulation des véhicules et plus généralement le fonctionnement des systèmes de transport routiers, ferrés, fluviaux, énergétiques ou multimodaux.

Hormis pour le transport maritime et aérien ces infrastructures sont souvent « linéaires » et associées à une emprise, et parfois à des dépendances (on parle parfois d'ILTe, qui signifie « infrastructures linéaires de transport et leur emprise »)

V.7.1)Éléments de définition plus précise

L'infrastructure désigne au sens strict la partie matérielle inférieure, le soubassement d'une voie. Le terme s'oppose à superstructure. On peut, dans certains cas, distinguer les deux : ainsi dans une ligne de chemin de fer, l'infrastructure, stricto sensu, est la plateforme de la voie, sur laquelle on pourrait aussi bien implanter une voie routière, tandis que la superstructure est constituée par la voie ferrée proprement dite (rails et traverses). Au sens large, l'infrastructure de transport désigne l'ensemble et englobe tous les éléments nécessaires à l'exploitation normale : caténaires, signalisation, postes d'aiguillage, tour de contrôle dans les aéroports, etc., ainsi que tous les bâtiments liés à l'usage de ladite infrastructure.

Les infrastructures sont généralement spécifiques d'un unique mode de transport, et sont conçues pour permettre la circulation de certains types de véhicules, plus ou moins diversifiés. Selon les modes de transport, la liaison entre véhicules et infrastructure est plus ou moins étroite, les extrêmes étant le véhicule tout-terrain, presque totalement indépendant, et à l'opposé la cabine de téléphérique, totalement liée à son infrastructure (câble porteur et câble tracteur), de l'autre. À la limite, l'infrastructure constitue la totalité du système de transport ; c'est le cas par exemple des canalisations destinées au transport de liquides de gaz ou de produits pulvérulents, telles que les aqueducs et oléoducs.

Les infrastructures sont généralement organisées en réseaux comportant des nœuds et des liens. Ainsi le réseau ferroviaire est constitué de gares reliées entre elles par des lignes. Les nœuds importants, comme les gares, les ports et aéroports sont aussi le point de contact et d'échange (dits intermodaux) entre deux ou plusieurs modes de transport.

Les infrastructures de transport sont un élément primordial (nécessaire mais non suffisant) pour garantir la liberté de déplacement des personnes et des biens, et pour assurer le fonctionnement et le développement de l'économie. Leur création, qui est une partie importante de l'aménagement du territoire, nécessite le plus souvent des investissements lourds et envisagés pour le long terme. cela explique qu'elles soient le plus souvent prises en charge par la puissance publique. Toutefois, celle-ci en délègue quelquefois, pour des raisons de financement ou de savoir-faire, la construction, la gestion et l'exploitation à des entreprises privées en contrepartie de la perception d'un péage (c'est le cas par exemple du tunnel sous la Manche et, plus récemment, du viaduc de Millau). (37)

La voirie, qui comprend l'ensemble des voies routières, présente la particularité d'être dans tous les pays[réf. nécessaire] un espace public, ouvert à tous gratuitement (sauf évidemment les voies privées ou concédées). Ce n'est pas le cas des autres infrastructures de transport (comme le réseau ferroviaire) qui constituent des espaces privés réservés à l'usage exclusif des exploitants habilités). (37)

V.7.2)Réseau routier

Le **réseau routier** est l'ensemble des voies de circulation terrestres permettant le transport par véhicules routiers, et en particulier, les véhicules motorisés (automobiles, motos, autocars, poids lourds...).

Le type de voirie d'une section du *réseau routier* détermine le *statut* (aussi appelé le *classement*) de la section considérée et les responsabilités y afférant. Certaines portions du réseau routier sont ainsi utilisables par tous les types de véhicules, d'autres sont réservées aux véhicules immatriculés. Les autoroutes sont interdites à certains types de véhicules (vitesse limite inférieure)

Le réseau routier est composé de :

- voies carrossables avec revêtement : rues (au sens générique, incluant avenues, boulevard, ..), routes, voies express, autoroutes)
- voies carrossables sans revêtement : chemins de terre, pistes

Il ne comprend pas :

- les espaces carrossables destinés à un autre usage que la circulation : aires de stationnement, aires de manœuvre...
- les voies non carrossables telles que les sentiers, sentes muletières...

La gestion du réseau routier est de la responsabilité des collectivités publiques :

- l'État pour les routes nationales et les autoroutes
- les collectivités locales. En France, ce sont les conseils généraux des départements pour les routes départementales et les routes nationales d'intérêt local (depuis 2006)
- les communes pour les routes communales, *ex-chemins vicinaux*.

Certaines sections ou ouvrages particuliers sont toutefois concédées à des entreprises privées ; c'est le cas notamment des autoroutes à péage.

La police de la circulation est assurée par les services de police nationale (situation nettement différente de celles des autres modes de transport pour lesquels la gestion de la circulation est assurée par les services internes des exploitants concessionnaires). (37)

V.7.3)Réseau ferroviaire

Un **réseau ferroviaire** est un ensemble de lignes de chemin de fer, de gares et d'installations techniques diverses (atelier, dépôts, triages, embranchements particuliers, chantiers intermodaux...) qui permettent la circulation de convois ferroviaires ou trains dans un ensemble géographique donné ; région, pays, continent.

Par extension, une maquette ferroviaire est également désignée par le terme de réseau(37)

Caractéristiques

Un réseau ferroviaire se caractérise par un certain nombre de normes techniques et d'exploitation qui peuvent éventuellement poser des problèmes d'interopérabilité en cas de connexion entre réseaux.

L'unification de ces normes est une entreprise de longue haleine car elle met en jeu des investissements techniques, humains et financiers très importants, dès lors qu'il s'agit d'harmoniser par exemple le gabarit, la charge à l'essieu, la signalisation, l'alimentation électrique ou les horaires.

À l'échelle internationale, elle a été entreprise de longue date par l'Union internationale des chemins de fer (UIC) qui émet des fiches techniques de recommandation concernant tant le matériel roulant que les infrastructures. Cependant, en Europe, la constitution volontariste d'un marché ferroviaire unifié a poussé la Commission européenne à promouvoir des normes d'interopérabilité plus poussées. (37)

Le réseau et la compagnie de chemin de fer

Carte des chemins de fer américains de classe I en Amérique du Nord. Chaque couleur correspond au réseau ferroviaire d'une compagnie.

Le terme « réseau » est souvent utilisé comme synonyme de compagnie de chemin de fer. C'est le cas aux États-Unis, où le réseau appartient aux compagnies qui y font circuler les trains.

Depuis les années 1990, cette synonymie n'est plus exacte dans certains pays de l'Union européenne, où l'on assiste à une dissociation entre les fonctions d'exploitation et de commercialisation des services confiées à des entreprises ferroviaires, et celles de gestion du réseau, confiées à des gestionnaires d'infrastructure ferroviaire. On parle d'« entreprise ferroviaire intégrée » lorsque celle-ci est également gestionnaire de l'infrastructure.

Pour faire rouler un train sur une voie ne lui appartenant pas, une compagnie doit donc s'acquitter d'un droit de péage.

Le terme « réseau » est aussi utilisé pour désigner certains chemins de fer qui se distinguent par certaines particularités tant techniques que fonctionnelles, ou par une cohérence d'utilisation (réseau de transport en commun) : réseau de métro, réseau de tramway, « réseau express régional » (RER) en France, etc. (37)

V.7.4) Aéroport

Un aéroport est l'ensemble des bâtiments et des installations qui servent au traitement des passagers ou du fret aérien situés sur un aérodrome. Le bâtiment principal est, généralement, l'aérogare par où transitent les passagers (ou le fret) entre les moyens de transport au sol et les avions(37)

Infrastructures

Les infrastructures nécessaires au transport aérien de passagers ou de fret sont celles que l'on trouve sur un aérodrome auxquelles s'ajoutent le terminal aéroportuaire permettant au passager aérien ou au fret de transiter entre les transports au sol et les avions.

La grande majorité des aérodromes sont conçus pour l'aviation de loisirs, sportive ou d'affaires. Le transport aérien de passagers ou de fret utilise des avions de ligne généralement plus lourds et plus rapides et la fréquence des mouvements (atterrissage ou décollage) dépasse la centaine par heure dans les créneaux les plus chargés. Il en résulte que les infrastructures doivent être adaptées en taille, nombre et efficacité pour répondre à la demande. (37)

Voie de circulation (aérodrome).

La largeur, les rayons de virage et les matériaux de couverture doivent être adaptés aux dimensions et au poids des avions de ligne utilisant la plateforme.

Lorsque le trafic est important et le nombre de pistes élevé, il devient nécessaire de créer un véritable réseau de voies de circulation et des sens uniques afin d'éviter au maximum le croisement des avions et a fortiori les croisements entre voies de circulation et pistes.

Afin d'augmenter la capacité des pistes, les aéroports à fort trafic créent des voies de sortie rapides permettant aux avions à l'atterrissage de quitter la piste dès que leur vitesse est réduite et contrôlée sans attendre l'arrêt complet. (37)

Aérogare et terminal

L'aérogare est un bâtiment d'interface entre les transports terrestres privés ou publics utilisés par le passager aérien et l'avion. Côté externe on trouvera des voies routières d'accès permettant l'arrêt et la dépose de passagers arrivant en voiture ou en bus et éventuellement une gare, une station de métro ou de tramway, Côté interne on trouvera des portes d'embarquement donnant accès aux avions soit directement par passerelle soit par l'intermédiaire de bus ou à pied. Dans les plus grands aéroports certaines portes d'embarquement peuvent être situées dans un bâtiment séparé, le terminal. La liaison entre l'aéroport et les terminaux est généralement effectuée en souterrain par un tapis roulant ou un métro léger.

En raison des menaces pour la sécurité des transports aériens la grande majorité des aérogares sont séparées en deux zones distinctes. Les installations des compagnies aériennes permettant la vente des billets et l'enregistrement des passagers et de leurs bagages sont situées dans la zone externe accessible au public ; les portes d'embarquement sont situées dans la zone interne et ne sont accessibles qu'aux passagers enregistrés. Dans le cas d'un aéroport international une partie de la deuxième zone pourra être sous douane et accessible uniquement aux passagers des vols internationaux. L'accès aux zones internes nécessite le passage par les contrôles de police et de sûreté au départ et le contrôle éventuel de la douane à l'arrivée.

L'aérogare et les terminaux mettent à disposition des passagers des salles et salons d'attente et souvent des boutiques et services de restauration. Dans la zone sous douane on pourra souvent trouver des boutiques assurant la vente hors-tax.

À l'arrivée le passager international récupère ses bagages de soute en zone sous douane et passe par un contrôle de police et de douane avant l'accès à la zone externe. Pour les vols nationaux la récupération des bagages est généralement assurée dans la zone externe à laquelle le passager accède par passage direct à sa sortie de l'avion. (37)

Chapitre VI:
Méthode élément finis &
Logiciel « Ansys »

VI.1) Introduction à la méthode des éléments finis

Généralités

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés pour la conception et l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des Éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissante de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes(37)

Conditions:

- formaliser les non-dits et les réflexions qui justifient les choix explicites ou implicites de son analyse du problème ;
- évaluer la confiance qu'il accorde aux résultats ;
- analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés.

L'objectif de cette partie est de présenter les principes de base de cette méthode en insistant sur l'enchaînement des tâches (démarche et hypothèses associées) qui assurent la cohérence du processus de calcul. Ces connaissances sont utiles à la maîtrise des deux principales difficultés de mise au point d'un modèle numérique :

- problèmes préliminaires à la phase de calcul ;
- problèmes liés à l'exploitation des résultats et le retour à la conception.

Il ne faut pas perdre de vue que l'analyse des résultats nécessite une bonne compréhension des différentes étapes mathématiques utilisées lors de l'approximation pour pouvoir estimer l'erreur du modèle numérique par rapport à la solution exacte du problème mathématique. Il ne faut pas non plus oublier que le modèle numérique ne fournit que des résultats relatifs aux informations contenues dans le modèle mathématique qui découle des hypothèses de modélisation.

Nous nous limiterons à la présentation de modèles élémentaires utilisés dans le cadre des théories linéaires. Bien que simples, ces modèles permettent déjà de traiter un grand nombre d'applications liées aux problèmes de l'ingénieur. Du point de vue pédagogique, ils sont suffisamment complexes pour mettre en avant les difficultés de mise en œuvre de la méthode.

L'idée fondamentale de cette méthode est de discrétiser le problème en décomposant le domaine matériel à étudier en éléments de forme géométrique simple.

Sur chacun de ces éléments, il sera plus simple de définir une approximation nous(37)

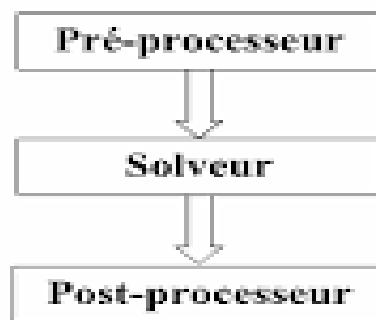
VI.2) Utilisation d'un logiciel éléments finis

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons . Les algorithmes de rangement dépendent de la taille du système, du type d'équations à résoudre et d'autres paramètres tels que le type de machine utilisée, de l'algorithme de résolution, etc. Le choix de ces algorithmes est un problème essentiellement numérique. . Si l'effort est appliqué à un nœud de la structure, il vient naturellement se placer sur la ligne correspondant au degré de liberté concerné du vecteur force généralisée. . Ici, les liaisons sont supposées parfaites pour éviter d'autres inconnues supplémentaires. à titre d'exemple quelques noms de logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM ,CESAR, SAMCEF, etc.

- Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :
- analyse linéaire ou non d'un système physique continu
 - analyse statique ou dynamique ; – prise en compte de lois de comportement complexes
 - prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement. . .) pouvant être couplés
 - problèmes d'optimisation, etc.
- L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale(37)

Etapes pratiques du calcul par EF

Organisation générale d'un code de calcul



Préprocesseur

- Choisir le type d'éléments
- Entrer les propriétés géométriques
 - Entrer les paramètres physiques
 - Créer le modèle géométrique
 - Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
- Appliquer les sollicitations • Imposer les conditions aux limites

Solveur :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,...)
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k_e]$, $\{f_e\}$
- Assembler $[k_e]$ et $\{f_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
- Prendre en compte les conditions aux limites
- Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions, $\epsilon \dots$).

Post-processeur

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique - Sous forme numérique
 - Sous forme graphique
 - Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations
- Interpolations, animation.

Déroulement d'une étude

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis (37)

. Le cadre de l'étude, c'est-à-dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée. Supposons toutes ces conditions remplies, l'étude proprement dite est organisée de façon logique selon les étapes suivantes :

Analyse du problème

Cette analyse doit fixer les paramètres du calcul et conduire à la réalisation d'un maillage. Cette phase basée sur l'expérience personnelle acquise dépend de nombreuses considérations. La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail. L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats.

Choix du modèle

En calcul des structures, les plus classiques sont de type : poutre, élasticité plane, axisymétrique, coques mince ou épaisse, tridimensionnel. . . À ces modèles mathématiques correspondent des familles d'éléments finis.

Choix du type d'éléments

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible. On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles.

Choix du maillage

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou

Création et vérification des données

Cette étape dépend du logiciel utilisé. La syntaxe utilisée pour définir le jeu de données est définie dans le mode d'emploi du bloc fonctionnel correspondant. En sortie, un fichier est créé, qui contient toutes les informations nécessaires à l'exécution des calculs. Les vérifications relatives au jeu de données se font généralement

graphiquement, grâce à un module informatique appelé pré-processeur.

Différents contrôles peuvent être utilisés pour valider le jeu de données :

- vérification de la géométrie de la pièce et du maillage
- vérification de la prise en compte des sollicitations et des conditions cinématiques (liaisons) imposées à la structure
- vérification des propriétés mécaniques utilisées.

Pour des problèmes spécifiques, d'autres contrôles seront envisagés. L'objectif d'éviter de faire tourner un calcul inutilement. Ceci d'autant plus que la recherche d'une

solution acceptable pour un problème donné est rarement le résultat d'un seul calcul.

Exécution du calcul

Ce bloc, le plus coûteux en temps machine est souvent exécuté en tâche de fond.

Un fichier de résultats permet de vérifier que les différentes phases de calculs se sont correctement déroulées :

- interprétation des données, vérification des paramètres manquants ;
- construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes ;
- singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments
- convergence, nombre d'itérations, etc.

Ce fichier peut contenir aussi les résultats du calcul (déplacements, résidus, contraintes...) ce qui lui confère dans ce cas un volume généralement très important. Il

peut arriver que le calcul échoue. (37)

Exploitation des résultats

Les calculs demandés dans le cahier des charges ont le plus souvent pour objectif de valider ou de vérifier le dimensionnement d'une structure. Les résultats obtenus et les conclusions relatives aux phénomènes à étudier devront être présentés de façon synthétique : tableaux, courbes, visualisation. Cela justifie largement l'utilisation d'un post-processeur, qui propose des outils pour sélectionner les informations que l'on veut étudier. Attention, lors de l'utilisation de ces outils, il faut savoir ce que cache l'information qui vous est proposée graphiquement, sachant que celle-ci est construite à partir de résultats discrets :

- valeur moyenne sur un élément : comment est-elle définie ?
- valeur maximale sur l'élément : comment est-elle calculée ?
- valeurs aux nœuds (écarts entre les éléments) : à quoi correspondent-elles ?
- les courbes d'iso-contraintes ont-elles une signification ? etc.

Différentes vérifications doivent être effectuées pour valider les résultats. Elles poussent, dans la plupart des cas, à remettre en cause le modèle pour en créer un nouveau, dont on espère qu'il améliorera la solution précédente. Pour valider une solution, il faut procéder dans l'ordre, en estimant dans un premier temps la précision du modèle. Puis lorsque celle-ci est jugée suffisante, nous procédons à sa validation. Les indicateurs sur la précision du modèle sont généralement locaux. Ils concernent des informations élémentaires calculées aux nœuds ou aux points d'intégration, ces informations sont très souvent fournies en valeur moyenne sur l'élément. Les indicateurs locaux sur la précision d'un modèle mécanique peuvent être :

- discontinuité des contraintes entre des éléments adjacents. Le plus simple, pour un matériau isotrope, est de visualiser la contrainte équivalente de Von Mises, cela permet d'avoir une idée des zones fortement chargées ayant un fort gradient de contrainte. Ces zones seront l'objet de toute notre attention ;
- valeur du tenseur des contraintes sur les bords libres (certaines valeurs doivent être nulles). En pratique, il faudra estimer ces valeurs à partir des valeurs obtenues aux points d'intégration ;
- densité d'énergie interne de déformation sur chaque élément, l'idéal étant d'avoir un écart le plus faible possible.

Ayant les informations sur la qualité de la solution, différents contrôles peuvent être envisagés pour valider votre modèle :

- ordre de grandeur des résultats obtenus
- vérification des hypothèses du modèle
- justification des choix de départ.

La comparaison des résultats des différents modèles permet d'améliorer puis de valider un modèle final. Une fois la fiabilité du modèle assurée, on peut conclure sur l'adéquation entre la structure et le cahier des charges. La synthèse de ces calculs préliminaires est indispensable car elle vous permet de justifier et de définir les limites du (des) modèle(s). (37)

VI.3) ANSYS

Ansys est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique.

L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. C'est logiciel qui met en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles

Préalablement discrétisés.

-Environnements logiciels

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

ANSYS classic :

Première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique(37).

ANSYS Workbench :

cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate-forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS. (37)

Logiciel ANSYS

Analyse structurelle

Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys vous permet de résoudre des problèmes techniques structurels complexes et de prendre plus rapidement de meilleures décisions en termes de conception. Grâce aux solveurs d'analyse par éléments finis (Finite Element Analysis, FEA) disponibles dans la suite logicielle, vous pouvez personnaliser et automatiser les solutions pour vos problèmes de mécanique structurelle ainsi que les paramètres d'analyse de scénarios de conception. Vous pouvez aussi facilement les connecter à d'autres outils d'analyse physique afin de gagner en fidélité. Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys est utilisé dans de nombreuses industries et permet aux ingénieurs d'optimiser la conception de leurs produits et de réduire le coût des tests physiques. (37)

Ansys 2020 R1

Ansys 2020 R1 continue d'intégrer la simulation tout au long des cycles de vie des produits, de l'idéation aux tests virtuels en passant par l'exploitation, avec Ansys Minerva. Cette plateforme de pointe stimule la collaboration au sein des équipes de conception mondiales et augmente le partage de données pour innover dans la conception des produits et réduire les coûts de développement .

Ansys 2020 R1 comprend des améliorations à Ansys Mechanical pour aider les ingénieurs à concevoir des modèles complexes, fortement non linéaires et extrêmement volumineux. Cette version propose également une chaîne de simulation considérablement simplifiée dans Ansys Fluent, de sorte que même les ingénieurs débutants peuvent exécuter des simulations multiphases complexes avec rapidité et aisance. Les autres versions du portfolio comprennent de nouveaux outils dynamiques pour Ansys HFSS SBR + et Ansys Maxwell qui améliorent considérablement les processus de conception électronique / électromagnétique. (37)

a/ Version étudiants

Ansys fournit des produits logiciels gratuits pour les étudiants, parfaits pour le travail effectué en dehors de la salle de classe, comme les devoirs, les projets clés, les concours étudiants et plus encore. Nos produits renouvelables peuvent être téléchargés par des étudiants du monde entier. Les produits Ansys étudiant peuvent être installés sur toute machine MS Windows 64 bits prise en charge. En savoir plus sur Découvrez la vie d'étudiant, Ansys AIM étudiant et Ansys étudiant pour pouvoir les télécharger dès aujourd'hui.

b/ Problème taille limites

La version étudiant est la version gratuit de ansys c'est pour ça elle est limité comme suit :

Physique structurale: 32K nœuds / éléments

Physique des fluides: 512 000 cellules / nœuds

Électromagnétisme: N / A

Ansys Mechanical APDL

Introduction

Les solveurs par éléments finis Ansys offrent une gamme et une profondeur de capacités inégalées par quiconque dans le monde de la simulation assistée par ordinateur. L'électromagnétisme thermique, structurel, acoustique, piézoélectrique, électrostatique et couplé en circuit n'est qu'un exemple de ce qui peut être simulé. Quel que soit le type de simulation, chaque modèle est représenté par un langage de script puissant... le Ansys Parametric Design Language (APDL). APDL est le fondement de toutes les fonctionnalités sophistiquées, dont beaucoup ne sont pas exposées dans l'interface utilisateur de Workbench Mechanical. Il offre également de nombreuses commodités telles que le paramétrage, les macros, les branchements et les boucles et les opérations mathématiques complexes. Tous ces avantages sont accessibles dans l'interface utilisateur Ansys Mechanical APDL. (37)

Analyse MEF par Ansys Mechanical APDL

L'ANSYS Mechanical APDL destiné pour l'analyse par éléments finis fournit une introduction pratique à l'analyse technique à l'aide de l'un des programmes à éléments finis à usage général les plus puissants du marché. Les étudiants trouveront une approche pratique et intégrée qui combine la théorie des éléments finis avec les meilleures pratiques pour développer, vérifier, valider et interpréter les résultats des modèles d'éléments finis, tandis que les professionnels de l'ingénierie apprécieront la compréhension approfondie présentée sur la structure et le comportement du programme. Les sujets supplémentaires couverts incluent une introduction aux commandes, aux fichiers d'entrée, au traitement par lots et à d'autres fonctionnalités avancées d'ANSYS. (37)

L'avantage de choisir APDL

Naviguez confortablement dans l'interface utilisateur Mechanical APDL et appliquez un flux de travail éprouvé pour créer, résoudre et post-traiter des modèles d'éléments finis 2D et 3D.

Les avantages d'utiliser le produit APDL par rapport ou autre produit comme Workbench sont les suivants :

-Importez et / ou créez une géométrie selon les besoins pour la création de leur modèle de simulation.

Utilisez la logique de sélection pour opérer efficacement sur les sous-régions d'un modèle pour le maillage, le chargement et le post-traitement.

Comprendre le concept d'attributs d'élément et l'appliquer à la création de maillages efficaces et efficaces à l'aide de poutres, de coques et d'éléments solides
Créer des interactions complexes entre les régions du modèle grâce au contact, au couplage, aux équations de contrainte et aux interfaces boulon / joint
Mettre en œuvre des solutions de champ couplé en utilisant des éléments d'écoulement de fluide 1-D et des éléments solides 2-D et 3-D.

Conclusion

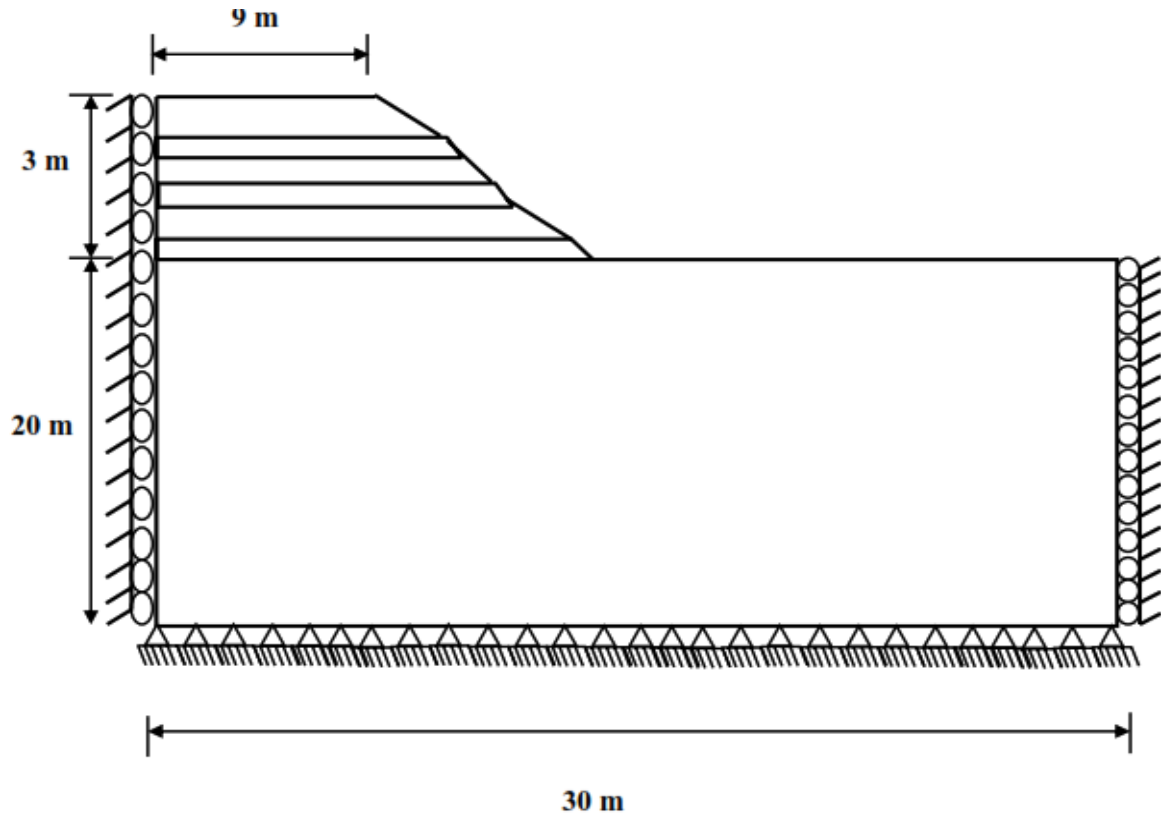
Dans le but de modéliser d'un élément structural nous avons choisi la méthode des éléments finis MEF qui est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, des problèmes physiques et mécanique régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules fondamentaux : préprocesseur, calcul et post processeur ; qui se résume à l'ANSYS 2020 R1 version Académique pris en considération lors de notre étude(37)

Chapitre VII:
Analyse Numérique et Cas d'étude

VII.1) RENFORCEMENT REMBLAI PAR Polystyrène

VII.2)CAS D'ETUDE :

a)GEOMETRIE

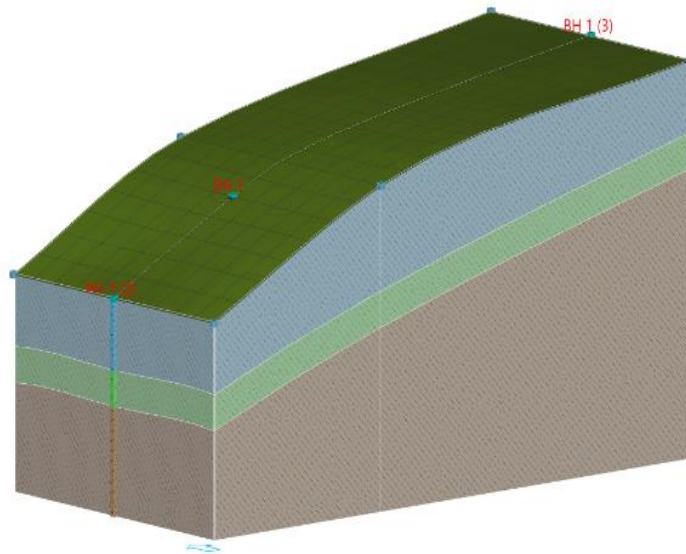


b) MATERIAUX

	REMBLAI	SOL SUPPORT
MODUE DE YOUNG E (MPA)	50	21
COEFFICIENT POISSON	0.15	0.2
POID S UNITAIRE (KN/m ³)	21	16
ANGLE DE FROTTEMENT	35	27
COHESION (KPa)	3	8

GEOTEXTILE

Polymer Composition of Geotextile			
Polypropylene (65%)	Polyester (32%)	Poly Amide (2%)	Polyethylene (1%)



SOL-SUPPORT

Masse volumique	1,6e-006 kg mm ⁻³			
Température C	Module de Young MPa	Coefficient de Poisson	Module de compressibilité MPa	Module de cisaillement MPa
	21,	0,2	11,667	8,75

REMBLAI

Masse volumique	2,1e-006 kg mm ⁻³			
Température C	Module de Young MPa	Coefficient de Poisson	Module de compressibilité MPa	Module de cisaillement MPa
	50,	0,15	23,81	21,739

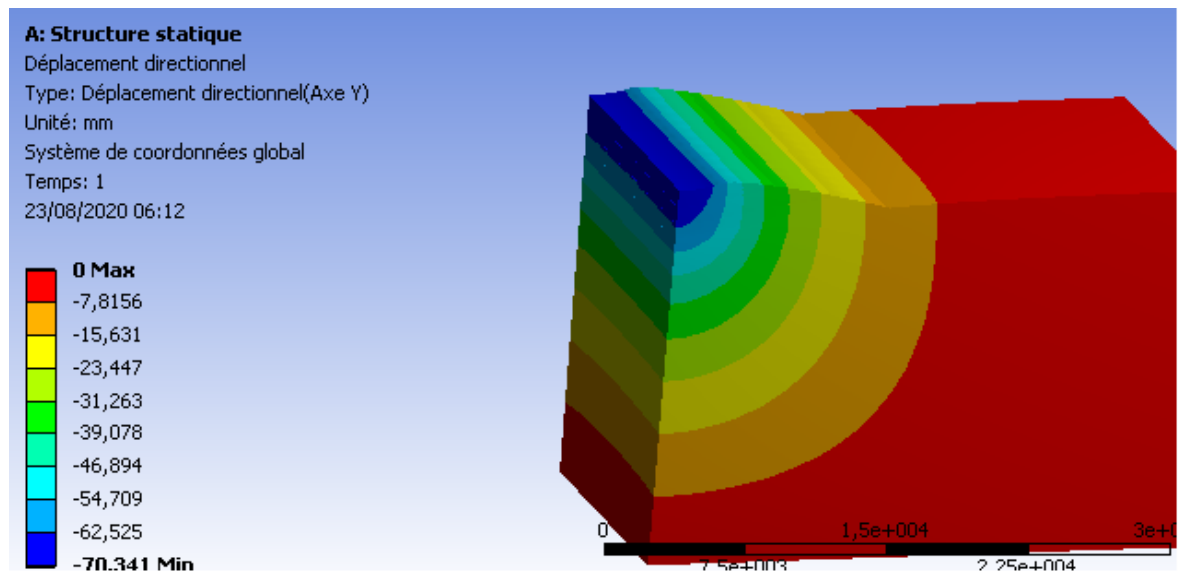
Propriétés de Ligne d'arborescence 3 : POLYESTER			
	A	B	C
1	Propriété	Valeur	Unité
2	<input checked="" type="checkbox"/> Masse volumique	1200	kg m ⁻³
3	<input checked="" type="checkbox"/> Elasticité isotrope		
4	Dériver de	Module de Young et coefficient de...	
5	Module de Young	4000	MPa
6	Coefficient de Poisson	0,35	
7	Module de compressibilité	4,4444E+09	Pa
8	Module de cisaillement	1,4815E+09	Pa
9	<input checked="" type="checkbox"/> Field Variables		
10	Température	Oui	
11	Angle de cisaillement	Non	
12	Facteur de dégradation	Non	

**UNE CHARGE EST APPLIQUEE AU DESSUS DU REMBLAI
AVEC UNE VALEUR DE 200 KN/m²**

VII.3 RESULTATS

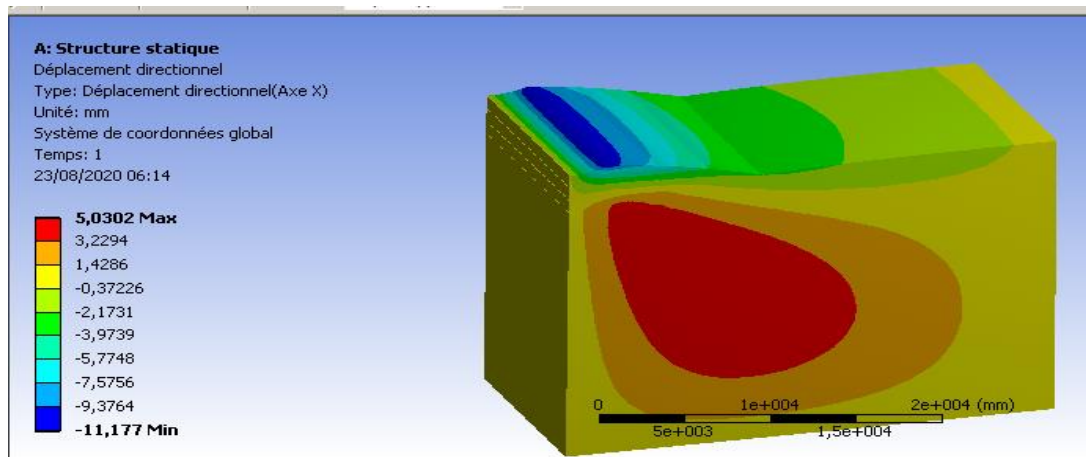
VII .3A)-SANS RENFORCEMENT

A-1 DEPLACEMENT VERTICAL



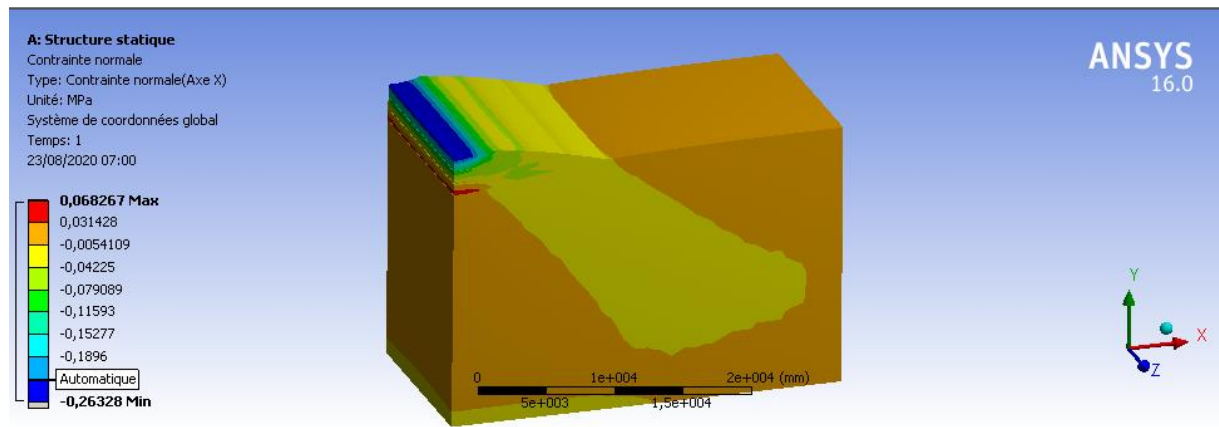
Déplacement vertical sans renforcement 7 cm

A-2 DEPLACEMENT HORIZONTAL



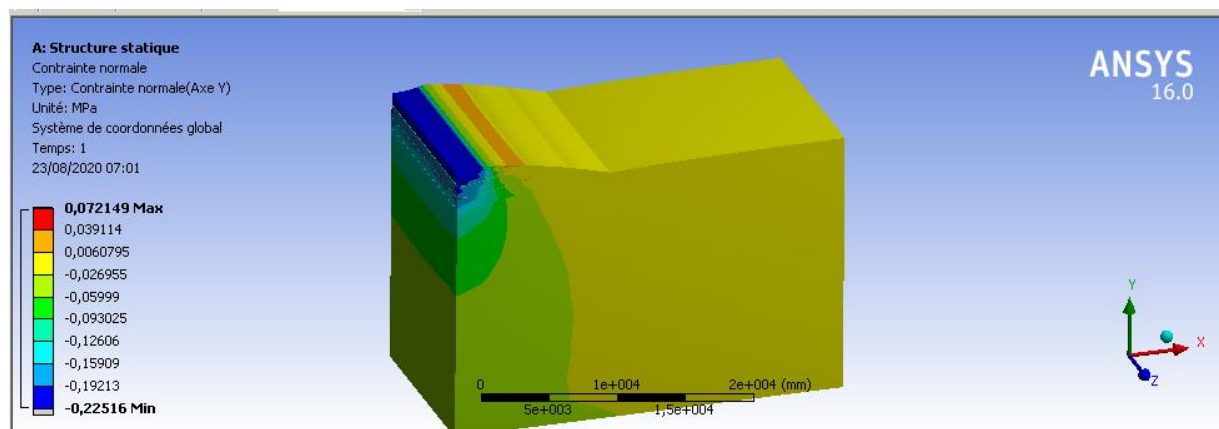
Déplacement HORIZONTAL sans renforcement +5 mm ET -1.1 cm

A-3 CONTRAINTE NORMALE SELON X



MAX= -0.26 MPa ET MIN +0.06 MPa

A-4 CONTRAINTE NORMALE SELON Y

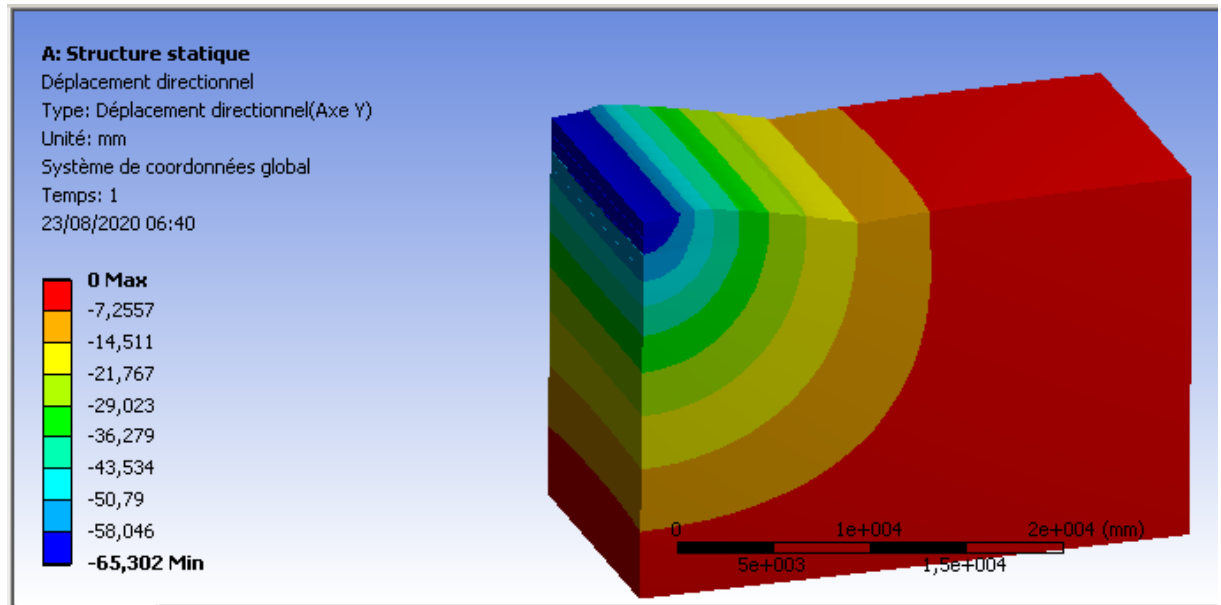


MAX= -0.22MPa ET MIN +0.039 MPa

VII .3.B)- AVEC RENFORCEMENT

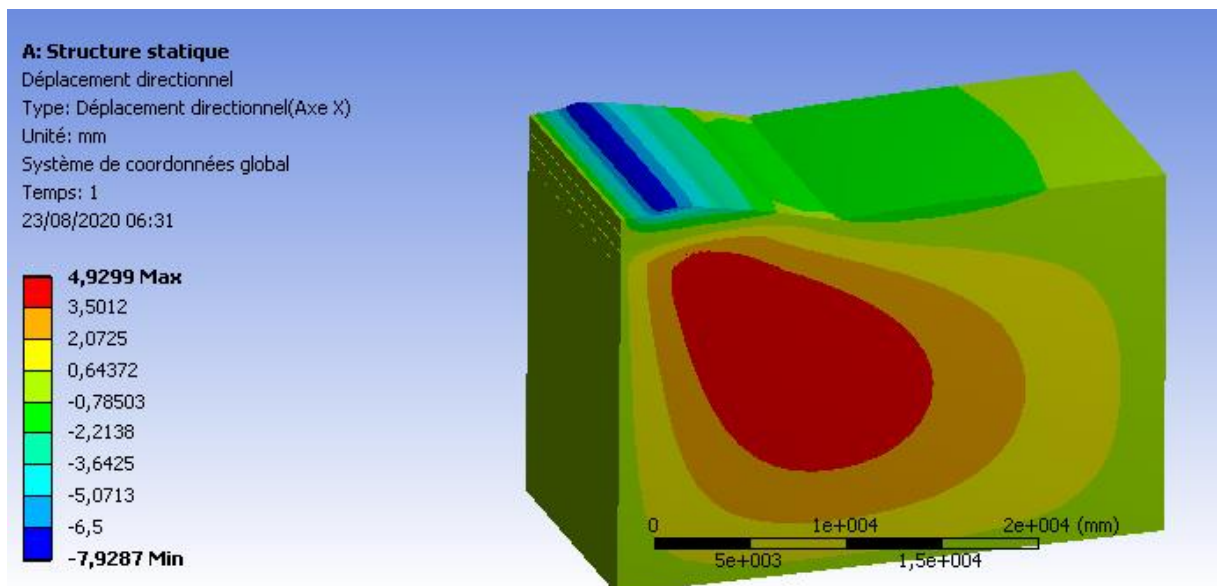
ON A UTILISE DEUX COUCHES DE POLYESTERENE A L'INTERIEUR DU
REMBLAI ESPACEES DE 1 m

B-1 DEPLACEMENT VERTICAL



Déplacement vertical sans renforcement 6,5 cm

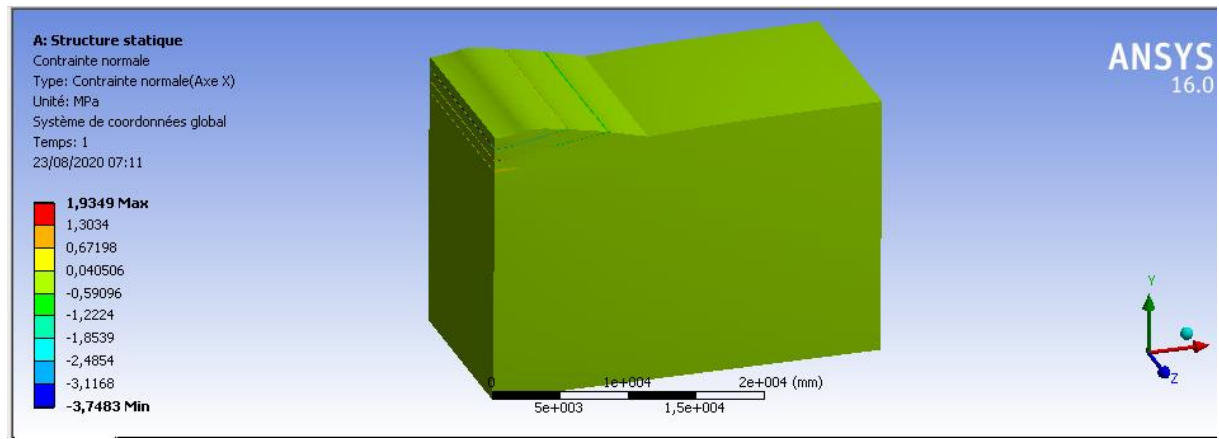
B-2 DEPLACEMENT HORIZONTAL



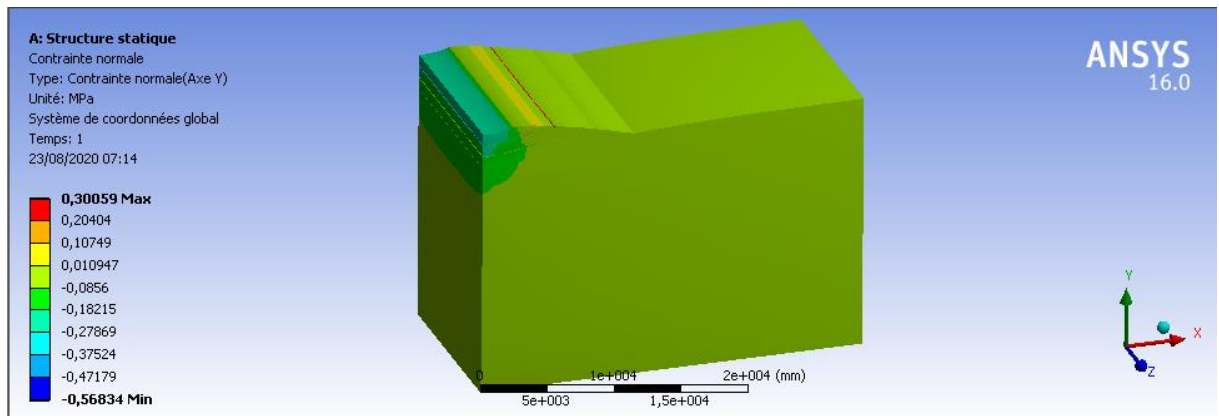
**DEPLACEMENT HORIZONTAL AVEC RENFORCEMENT +4,9mm ET -
7,9mm**

CONTRAINTE NORMALE VERTICALE

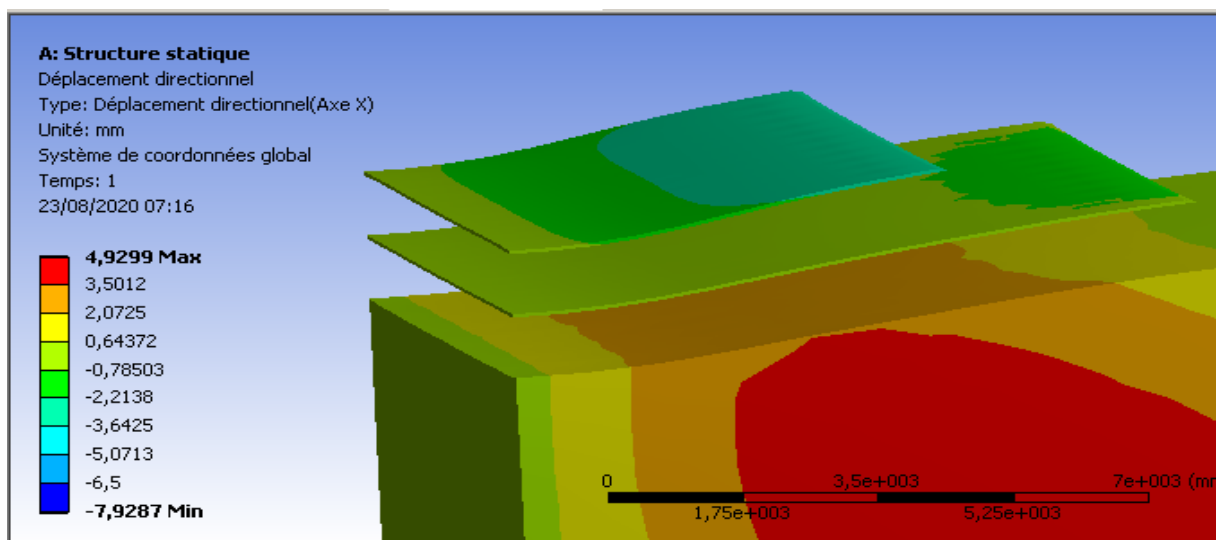
B-3 CONTRAINTE NORMALE VERTICALE SELON X



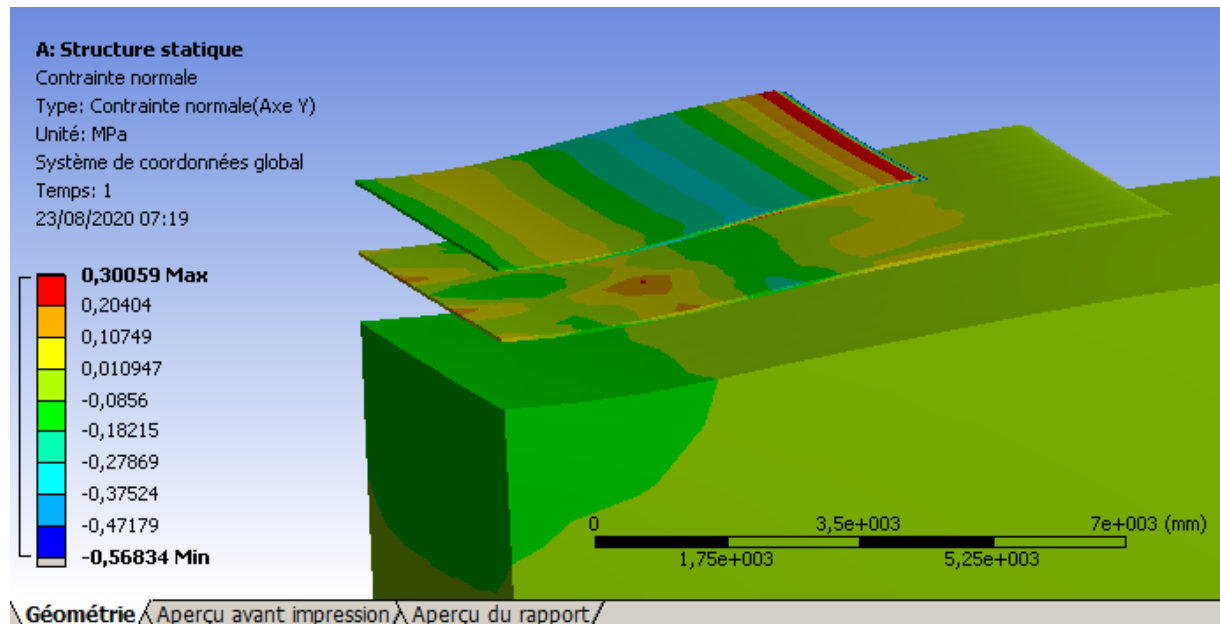
B-4 CONTRAINTE NORMALE VERTICALE SELON Y



CONTRAINTE NORMALE VERTICALE 0.37 MPa DANS REMBLAI



VUE ECLATEE SUR COUCHES POLYESTERENE CONTRAINTE HORIZONTALE



VUE ECLATEE SUR COUCHES POLYESTERENE CONTRAINTE VERTIVALE

VII.4) Comparaison et commentaires

Ce tableau présente une comparaison des valeurs numériques des déplacements verticale et horizontale dun remblai repose sur un sol support avant et après l'utilisation des couches de renforcement en polystyrène et encore comparer les contraintes normale selon les axes (X-Y).
 Et obtenir une conclusion et la différence qui permet de voir l'importance d'utiliser les remblais en polystyrène Pour le renforcement des remblais légers.

	SANS RENFORCEMENT	AVEC RENFORCEMENT
DEPLACEMENT VERTICAL	7 cm	6,5 cm
DEPLACEMENT HORIZONTAL	+5 mm ET -1.1 cm	+4,9mm ET -7,9mm
CONTRAINTE NORMALE SELON X	-0.26 MPA ET MIN +0.06 MPA	
CONTRAINTE NORMALE SELON Y	-0.22 MPa ET MIN +0.039 MPA	0.37 MPa

VII.5) CONCLUSION :

on remarque que la présence de 02 couches de polystyrène a l'intérieur du remblai diminue les contraintes et les déplacements

il faudrait étudier plus profondément l'influence de la variation du nombre de couches et leur espacements sur le comportement du remblai.

Référence bibliographiques:

- 1) Barden L., Madedor A.O. et Sides G.R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clays. J. Soil Mech. FdnEngng, Am. Sot. Civ. Engrs 95, SM1.
- 2) Barden L., Mc Gown A. et Collins K. (1973). The collapse mechanism in partly saturated soil. Eng. Geol
- 3) Bekkouche A., Aissa Mamoune S. M. et Djedid A., (2002), Techniques de stabilisation des sols expansifs, Journées d'Études sur les Sols Gonflants (JÉSG),
- 4) Bell, F. G, (1988), Stabilisation and treatment of clay soils with lime. Ground Engineering,
- 5) BENDAHMANE F, MAROT D, ALEXIXIS A et ROSQUOET F. 2005 : Characterization on internal erosion disturbances on sand/kaolinite samples. Mcmat 2005 ASCE, Baton Rouge, USA,
- 6) Bradford, J. M. et Blanchar, R. W. 1999 : , Mineralogy and water quality parameters in rill, erosion of clay-sand mixtures, Soil Science Society of America Journal, vol. 63, no. 5,
- 7) Chen F.H., (1988), —Foundation on Expansive Soils, Elsevier Scientific Publishing Company INC., New York, USA.
- 8) Garner, S.J. and Sobkowicz, J.C. (2002) Internal Instability in Gap-Graded Cores and Filters. Proceedings of 2002 Annual CDA Conference, Canadian Dam Association, Victoria.
- 9) J.P MAGNAN, 2000 : étude et réalisation des remblais sur les sols compressibles ; Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
- 10) J.P Magnan, Bailly J.C., Bondil R. (1990) : Les remblais en polystyrène expansé de l'autoroute A8 à Mandelieu" Bulletin de liaison des L.P.C., Paris, n° 165
- 11/ Bulletin d'information techniques Vol. 4, no 7, juillet 1999 Remblais légers en fibre de bois.
- 12/ Bulletin d'information techniques Vol. 12, no 5, December 2007 La conception des remblais légers
- 13/ DESIGN PROCEDURE FOR GEOFOAM APPLICATIONS IN EMBANKMENT PROJECTS Timothy D. Stark Professor of Civil Engineering University of Illinois @ Urbana-Champaign
- 14/ Expanded Polystyrene (EPS) Geofom Applications & Technical Data The EPS Industry Alliance 1298 Cronson Boulevard Suite 201 Crofton, MD 21114 800.607.3772 info@epscentral.org
- 15/ Expanded Polystyrene (EPS) Geofom for Road Embankments and Other Lightweight Fills in Urban Environments "Goespuma" de Poliestireno Expandido (EPS) para Terraplenes en Carreteras y Otros Rellenos de Poco Peso en Ambientes

Urbanos Hany L. Riad, Ph.D., P.E. Bechtel/Parsons Brinckerhoff Boston,
Massachusetts, U.S.A.

16/ GUIDELINES FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXPANDED
POLYSTYRENE FILL AS A LIGHTWEIGHT SOIL REPLACEMENT
(GEOTECHNICAL ENGINEERING MANUAL GEM-24 Revision #1 AUGUST
2015

17) GEOPAVE: technical note CONSTRUCTION OF EMBANKMENTS OVER
WEAK GROUND USING LIGHTWEIGHT FILL (EXPANDED POLYSTYRENE).

18/ Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité Avis
technique 2010 Avis technique N°151, janvier 2010 COMPOSTYRENE

19/ KNAUF Les travaux publics 2014, les remblais routiers en polystyrène expansés

20/ Plastic foam in road embankments by ROALD AABgIE"

21/ Remblais ultra-legers sur sols compressibles février 1990 auteur : DTCA – CETE
Nord - Picardie

22/ Report No. UT-1X.XX DESIGN AND EVALUATION OF EXPANDED
POLYSTYRENE GEOFOAM EMBANKMENTS FOR THE I-15

RECONSTRUCTION PROJECT, SALT LAKE CITY, UTAH Prepared For: Utah
Department of Transportation Research Division

23/ Technical note Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofoam used
with expansive soils S. Banu Ikizlera, Mustafa Aytékina,_, Evin Nasb aCivil
Engineering Department, Karadeniz Technical University, Trabzon 61080, Turkey
bCivil Engineering Department, Karadeniz Technical University, Gumushane 29000,
Turkey Received 28 November 2006; received in revised form 8 May

24)-Guide technique CFTR, édité par le SETRA en septembre 2006 : Utilisation du
polystyrène expansé en construction routière ».

25)-Bulletin d'information technique – Direction du laboratoire des chaussées –
Québec – novembre 1996– Technique de Pneusol pour contrer l'effet Marston.

26)-Norme NF EN 14933 : Produits isolants thermiques et de remblayage pour les
applications de génie civil - Produits manufacturés en polystyrène expansé (EPS) –
Spécifications. AFNOR, mai 2008.

27)-Norme NF EN 13163 : Produits isolants thermiques et de remblayage pour le
bâtiment - Produits manufacturés en polystyrène expansé (EPS) – Spécifications.
AFNOR, avril 2009.

28)-Norme NF EN ISO 845 : Caoutchouc et plastiques alvéolaires – détermination de
la masse volumique apparente. AFNOR, juillet 1995.

29)-Norme NF EN ISO 826 : Caoutchouc et plastiques alvéolaires – détermination du comportement en compression. AFNOR, septembre 1996.

30)-Norme NF EN ISO 1923 : Plastiques et caoutchouc alvéolaires – détermination des dimensions linéaires. AFNOR, juillet 1995.

31)-Ministère de l'Équipement et du Logement – Cahier des prescriptions Communes (CPC) – Fascicule 61 : Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art, article 31.1.4, décembre 1968

32)-Règles BAEL 91 (modifiées 99): Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites – Paris CSTB, mars 1992

33)-Remblais et fondations sur sols compressibles : MAGNAN JP – ENPC -1984

34) Généralités sur les géosynthétiques ". L'intelligence des sols "AFITEX

35) "L'emploi des géosynthétiques en géotechnique routière". L'intelligence des sols "AFITEX".

36) Site internet du Comité Français des Géosynthétiques. "CFG " www.cfg.com

37) Site internet: www.wikipedia.com