

N° d'ordre

:

N° de série

:

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El
Oued Faculté de la Technologie Département de
Hydraulique et de Génie Civil



Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER ACADEMIQUE** En Matériaux de
Génie Civil Présenté par

BANE zohra - BOUZEGAG laila - MENSOURI manel

Thème

**Modelisation numerique 3D des ouvrages en sol
renforce par geo-synthetique**

Soutenu le ../../2020. Devant le jury composé de :

Mr. LABIODH bachir

Examineur

Mr. FARIK Ali

Rapporteur

Dr. SOULIMANE Ilyas

Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciement

Nous remercies dieu le tout puissant qui ma donné le courage et la volonté afin de poursuivre mes études

Je tiens à remercier mr .farik ali mon encadreur non pas par simple courtoise mais pour ses précieux conseils et son orientation qui a permis de mener à bien ce travail

Nous remercions tous les membres du jury d'avoir accepté d'être les rapporteurs de notre thèse

J'adresse également mes sincères remerciements et ma gratitude à tous les professeurs du département pour leurs précieux conseils.

Nous remercions aussi nos collègues de travail pour leurs aides, leurs compréhensions et leurs encouragements.

Enfin, nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement

RESUME

La technologie de renforcement du sol avec un armement métallique ou géosynthétique non corrosif dans l'incarnation de différents projets est une renaissance en soi pour la croissance de l'aspect architectural et de l'infrastructure de tout pays. Surtout après que ce procédé est devenu populaire grâce à leur performance, à leur économie et à leur esthétique.

Nos recherches portent sur les différentes techniques utilisées dans le renforcement des sols, et en particulier nous sommes concentrés sur le mur de soutènement en sol renforcé par géosynthétiques comme un cas pour étudier le comportement de ces ouvrages.

Le but de ce travail est d'appliquer une méthodologie numérique à un mur de soutènement en sol renforcé par des nappes Géosynthétiques en utilisant le programme PLAXIS 3D Afin de connaître les comportements de ces structures, notamment le déplacement horizontal et les facteurs de sécurité.

L'impact de la longueur des armatures, ainsi que l'influence de plusieurs paramètres sur les déformations et la stabilité des murs en sol renforcé par géosynthétique ont été mis en évidence dans cette étude numérique.

Les résultats obtenus ont démontré que le choix adéquat de ces paramètres permet d'améliorer considérablement la stabilité de ces ouvrages.

Mots clés : Sol renforcé, géosynthétique, mur de soutènement, modélisation numérique,

Plaxis.

ABSTRACT

The technology of soil strengthening or reinforcing it with a metal or geosynthetic armament that is not corrosive in the embodiment of various projects is a renaissance in itself for the growth of the architectural aspect and the infrastructure of any country, especially after this technology became popular due to its performance, economy, and beauty.

Our research deals with the various techniques used in soil reinforcement, and in particular we focused on retaining walls reinforced by geosynthetics as a sample to study the behavior of these structures.

The aim of this work is to apply a numerical methodology to a retaining wall formed from soil reinforced with horizontal layers of geosynthetics using the 3D Plexes program in order to know the behavior of these structures, especially the horizontal deformation and safety factor.

The effect of reinforcement length in addition to the influence of many other factors on the horizontal deformation and the stability of retaining walls formed from soil reinforced with layers of geosynthetics were highlighted in this digital study.

The results obtained showed that proper selection of these elements can contribute significantly to improving the stability of these structures.

Key words: Reinforcement Soil, Geospatial, Digital Modeling, Retaining Wall, Blacksis.

الملخص

تشكل تقنية تعزيز التربة او تقويتها بتسليح معدني او من الجيوسنتاتيك غير قابل للتآكل في تجسيد المشاريع المختلفة نهضة في حد ذاتها من اجل نمو الجانب المعماري و البنى التحتية الي بلد خصوصا بعد ثبوت فعاليتها بالنسبة للمنشآت الاستنادية الترابية المسلحة بالجيوسنتاتيك.

بحثنا هذا يتطرق على مختلف التقنيات المستخدمة في تعزيز التربة و بالخصوص ركزنا على اخذ التربة المعززة بالجيوسنتاتيك لدراسة سلوك التربة في حالة اختيار المنشآت الترابية المسلحة كعينة لدراستنا الهدف من هذا العمل هو تطبيق منهجية عددية على جدار إستنادي من تربة المعززة بطبقات أفقية من الجيوسانتاتيك باستخدام برنامج البلاكسيس من أجل معرفة سلوك هذه الهياكل خصوصا التشوه الأفقي و معامل الأمان اعتمدنا إجراء تغييرات في بعض المعاملات و العناصر و معرفة مدى تأثير هادا التغيير في سلوك الجدار مثل : طول التعزيزات المستخدمة , زاوية خشونة تربة الردم, معامل الالتصاق بتربة الردم, و كذا قيمة وحدة الصلابة بالنسبة للتعزيرات. حيث اطهرت النتائج ان الاختيار المناسب للعناصر لتصميم الجدار أهم بكثير من زيادة العشوائية لضمان تكلفة اقل و استقرار أكثر.

الكلمات المفتاحية : تعزيزات التربة , الجيوسنتاتيك, بلاكسيس, معامل الاستقرار. نمذجة رقمية. .

Figure II-14. Géotextile de filtration sous enrochement	44
Figure II-15. Schéma d'aménagement simple pour limiter l'érosion.....	44
d'un terrain par tubes géosynthétiques	
Figure II-16. Photographie du chantier en tubes géosynthétiques.....	45
de Port	
Figure II-17. Schéma d'aménagement en tubes géosynthétiques	45.
Figure II-18. Plan schématique des tronçons en tubes géosynthétiques.....	45
pour la protection des plages de la Croisette à Cannes	
Figure II-19. Applications des géosynthétiques dans	46.
les infrastructures linéaires	
Figure II-20. Exemples de déformation des géotextiles non tissés.....	47
Figure II-21. Utilisation d'une géogrigille en renforcement	47
de couche de forme	
Figure II-22. Utilisation d'un géotextile tissé en renforcement.....	47
de couche de forme	
Figure II-23. Application d'un géosynthétique.....	48
anti-fissuration de chaussée	
Figure II-24. Exemple de remblai sur sol compressible renforcé par géosynthétiques	50
Figure II-25. Orientation de pose des géosynthétiques de renforcement e.....	50
base des remblais	
Figure II-26. Application d'un géosynthétique de renforcement.....	51
sur inclusions rigide	
Figure II-27. Schéma de principe du renforcement sur inclusions rigides	52
Figure II-28. Application d'un géosynthétique de renforcement sur cavités.....	52.
Figure II-29. Deux options pour le renforcement sur cavités.....	53
Figure II-30. Mise en œuvre du remblai sur le géocomposite de drainage	54.
Figure II-31. Pose du géocomposite de drainage au contact.....	54.
des drains verticaux	
Figure II-32. Drainage sous remblai sur zones compressibles	54
Figure II-33. Géocomposite de drainage en EDRC.....	55
Figure II-34. Géocomposite de drainage en EDRC : principe	55
Figure II-35. Applications des géosynthétiques en drainage et filtration	55
Figure II-36. Filtre géotextile entre un matériau fin et un matériau drainant	55
Figure II-37. Étude comparative du coût de construction d'un mur.....	56.
selon sa technique de réalisation	
Figure II-38. Vue du glissement	57
Figure II-39. Construction de l'ouvrage par couches.....	57
Figure II-40. montre l'ouvrage achevé.....	57
Figure II-41. Vue de l'ouvrage achevé.....	58.
Figure II-41. (a) Pose du géotextile de protection et (b) drainage par bande	58
Figure II-42. (a) Event de dégazage et (b) vue des bassins.....	59
avec géomembrane posée.	
Figure II-43. Lagunes en service	59
Figure II-44. Différents types de parements possibles (non exhaustif	61
Figure II-45. Principe d'installation avec coffrage amovible.....	61
Figure II-46. Principe d'installation avec coffrage perdu	61.
Figure II-47. Profil type de position du géocomposite de drainage	61
en talus renforcé : principe	
Figure II-48. Profil type de position du géocomposite de drainage en talus renforcé	62
Figure II-49. Exemple de surfaces glissement potentiel	63
Figure II-50. Autres états limites étudiés	64

Figure II-51. Les étapes d'installation du mur en terre armée	65
Figure II-52. Dimensionnement à la rupture des massifs en sol renforcé.....	66
Chapitre III	
Figure III-1. Présentation Plaxis 3D	69
Figure III-2. Définition du modèle à 50% de la rupture.....	71
Figure III-3. Cercles de contrainte à la rupture touchl'enveloppe de Coulomb.....	73
Figure III-4. des courbes contraintes-déformations classiques	74
Figure III-5. Les éléments tétraèdres à 10 nœuds.....	75
Chapitre IV:	
Figure IV.1. Géométrie de l'ouvrage de soutènement en sol renforcé	79
Figure IV.2. Blocs modulaires et connexion géogrille.....	79
Figure IV.3. Blocs modulaires et connexion géogrille.....	82
. Étape 1 : Installation des blocs modulaires	
Figure IV -4. Étape 2 : Mise en place d'une couche de remblai et Installation de la.....	83
première nappe de géogrille.	
Figure IV .5. Étape 3 : étape – intermédiaire	83
Figure IV. 6.étape –finale	83
Figure IV. 7. Profil représentatif du modèle numérique(Le maillage.)	84
Figure IV.8. Elevation	85
Figure IV.9. déformation mesh	85
Figure IV.10. Total Déplacements	86
Figure IV.11. Déplacements dans le sans X.....	86
Figure IV.12. Déplacements dans le sans Z	87
Figure IV.13. Exemple de déplacement total de la nappe géosynthétique n°01	88
Figure IV.14: Exemple de la force axial résulte dans la nappe géosynthétique n° 01	88
Figure IV.15: a-b-c Les Déplacements pour modele A1	91
Figure IV.16: a-b-c Les Déplacements pour modele A2	92
Figure IV.17: a-b-c Les Déplacements pour modele A3	93
Figure IV.18: a-b-c Les Déplacements pour modele A4	94
Figure IV.19. Déplacement horizontal des parements	95
Figure IV.20. a-Courbe coefficient de sécurité en fonction le rapport L/H	96
b-Les déplacements horizontal U_x en fonction le rapport L/H	
Figure IV.21: a-b-c Les Déplacements pour modele B1	97
Figure IV.22: a-b-c Les Déplacements pour modele B2	98
Figure IV.23: a-b-c Les Déplacements pour modele B3	99
Figure IV.24. Déplacement horizontal des parements	99
Figure IV.25 : a-variation du déplacement maximal U_x (mm) en	100
fonction de la rigidité du géogrille	
b- variation de coefficient de sécurité en fonction de la rigidité du géogrille	
Figure IV.26: a-b-c Les Déplacements pour modele C1	101
Figure IV.27: a-b-c Les Déplacements pour modele C2	102
Figure IV.28: a-b-c Les Déplacements pour modele C3	103
Figure IV.29. Déplacement horizontal des parements	103
Figure IV.30: a-variation du déplacement maximal U_x (mm) en fonction	104
d'angle de frottement.	
b-variation de coefficient de sécurité en fonction l'angle de frottement.	

Liste des tableaux

Chapitre I

Chapitre II

Tableau II-1. Fonction principale par les principaux geosynthetiques elementaires 34

Tableau II-2. Duree maximales d exposition des geotextiles 39
et produits apparentes

Chapitre III

Chapitre IV

Tableau IV.1. Propriétés géomécaniques du sol 80

Tableau IV.2. Propriétés du géogrille 81

Tableau IV.3. Propriétés du bloc modulaire 81

Tableau IV.4. Différentes combinaisons utilisé pour les analyses..... 90

Tableau IV.5. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis-A 95

Tableau IV.6. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis-B 100

Tableau IV.7. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis-C 104

Tableau IV.8. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis-D 108

Tableau IV.9. Récapitulatif des résultats d'analyse par éléments finis 109

Liste des symboles

h : Contrainte horizontale.

- : Contrainte verticale.
- : Contrainte de poussée
- : Contrainte de butée.
- 1 : Contrainte principale
 - : Contrainte tangentielle.
 - : Déformation
- γ : Distorsion
- γ : Poids volumique.
- 0 : Coefficient de pression de terre au repos.
 - : Coefficient de poussée.
 - : Coefficient de butée.
 - : Coefficient de pression due à la surcharge.
 - : Matrice de rigidité.
 - : Teneur en matière organique.
- 0 : Rapport de sur consolidation.
- : La cohésion.
- : Coefficient de poisson.
- : Module d'Young
- : Angle de frottement.
- : Angle de dilatance
- : Angle de frottement sol – Mur
- : Angle de rupture
- : Angle du parement incliné.
- : l'inclinaison du remblai d'arrière le mur
- : Excentricité.
- : Force de poussée
- : Force de butée.
- : Surcharge uniformément répartie
- : Coefficient de sécurité au renversement.
- : Coefficient de sécurité au glissement
- : Résistance à la pointe.
 - : Frottement latérale unitaire.
- μ : Coefficient de frottement réel.
- * : Frottement limite.
- ** : Déplacement relatif.
- : Coefficient de frottement
- : Teneur en eau naturelle.
- : Degré de saturation
- : Teneur en eau de liquidité.
- : Teneur en eau de plasticité
- : Indice de plasticité.
- γ : Densité sèche.
- Yh : Densité humide.
- : Rigidité axiale
- : Rigidité de flexion.
- : Espacement vertical.
- : Longueur de géogrille.
- : Déplacement total.
- h : Déplacement horizontal.
- : Coefficient de sécurité

Table des matières

Remerciement..	i
Resume	ii
Abstract	iii
ملخص.....	iv
Notations et adreviations.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction generale.....	
Sommaire.....	

Chapitre I : Generalite sur le renforcement de sol

I.1.Introduction	3
I.2.. Généralités sur sol renforcé	3
I.2 .1.Des solutions diverses.....	4
I.2 .1.1.Renforcement du sol en place	5
I.2 .1.2. Renforcement des sols de remblaiement.....	7
I.3. les Types de renforcement pour Renforcement du sol en place	10
I.3.1. inclusion rigide.....	10
I.3.2. La colonne à Module Mixte (CMM®).....	11
I.3.3. colonnes ballastees	12
I.3.4. Le vibrocompactage.....	14
I.3.5 .Le Deep Soil Mixing par voie humide	15
I.3.6. Le compactage dynamique	16
I.3.7. Le Mass Soil Mixing (MSM).....	17.
I.3.8 .Le Rapid Impact Compaction	18

I.4 .les Types de renforcement pour Renforcement des sols de remblaiement	19
I.4.1.La Terre-Armée.....	19
I.4.2.Le freyssissol.....	19
I.4.3.Le Terratrel.....	20
I.4.4.Le Pneusol.....	20
I.4.5.Le cloutage	20
I.4.6. .Renforcement par inclusions géosynthétiques.....	21
I.1.5 .avantages de l utilisation de géosynthétiques pour le renforcement	21.
I.6 .domaine d emploi.....	25
I-6.1.ouvrages routiers.....	25
I-6.2. ourvages ferroviairs.....	26
I-6.3. ouvrages industriels et de protection.....	27
I-6.4. ourages hydrauliques	28
I-7.conclusion	28

Chapitre II : Renforcement du sol par geosyntheticque

II.1 .Introduction	29
II.2. definition	30
II.3. differentes familles des geosyntheticque	31
II.3.1.geotextiles.....	31
II.3.2.prouduits apparentes.....	31
II.3.3.geosyntheticque etanches.....	32.
II.3.4.geosyntheticque composites.....	32
II.4.fonction des geosyntheticques.....	33.
II.4.1.fonction des geotextiles et produits apparentes	33
II.4.2.fonction des geomembranes et geosyntheticque bentonitiques	34

II-4.3.Principales propriétés des géosynthétiques.....	34
II-4.4.Principales produits géosynthétiques.....	35
II-4.4.1. le type de Géotextile.....	35
II-4.4.2. le type de Géocomposite.....	36
II-4.4.3. le type de Géomembrane.....	36
II-4.4.4. le type de Géogrilles.....	37
II-5.duree de vie	38
II-5.1. Durée de vie des géotextiles.....	38
II-5.2. Durée de vie des géomembranes.....	39
II-6.utilisations geosynthetic dans divers domaines	40
II-6.1.ouvrages hydrauliques	40
II-6.1.1.historique	40
II-6.1.2.conception des DEG.....	41
II-6.1.3.geotextiles filtrants.....	43
II.6.1.4. les Tubes géosynthétiques.....	44
II.6.2. ouvrages routiers et infrastructure lineaires	46
II.6.2.1. Terrassements routiers et ferroviaire	47
II.6.2.2.anti- fissuration de choussees.....	48
II.6.2.3.base de remblai.....	49
II.6.2.4.filtraes drains.....	55
II.7.exemple d'utilisation des geosynthetic en Algeria.....	57
II.7.1.Traitement d'un glissement de terrain et reconstruction de.....	57
la chaussée avec un remblai renforce par géosynthétiques	
dans la willaya de Bedjaia :	
II.7.2.Dispositif d'étanchéité par géosynthétique de.....	58
la station d'épuration d'Oued Souf	

II.8.murs en renforce par elements géosynthétiques	59
II.8.1. Renforcement par géosynthétiques.....	62
II.8.2.les differentes etaps de l'installation.....	64
II.9. principe de dimensionnement des terres armes.....	65
II-10. conclusion.....	66

Chapitre III– Modèles de comportement et l’outil numérique utilisé

III-1. Introduction.....	67
III-2. Méthode des éléments finis.....	67
III-2.1. Le calcul par la méthode des éléments finis	69
III-3. Présentation de PLAXIS.....	70.
III-3-1. Les sous-programmes de plaxis	70
III-3-2. Modèles de comportement utilisés dans le PLAXIS	71
III-4.Conclusion.....	77

Chapitre IV : Etude d un cas

IV-1.Introduction.....	78.
IV -2.Simulation numérique.....	78
IV -2.1 Presentation du modèle numérique	78
IV -2.2 Donnés et paramètres de l’étude	79
IV -3. Processus de construction et Méthodologie de Modélisation	81
IV -4. Génération du maillage	84
IV 5. Les résultats	85.
IV -6. Etude paramétrique	89
IV -6-1.Effet de la longueur des géogrilles.....	90
IV -6-2. Effet de Module de rigidité E de goegrille	96.

IV -6-3. Effet d'angle de frottement du remblai	101
IV -6-4.Effet de facteur de Cohésion.....	104
IV -7.Conclusion.....	109
CONCLUSIONS GENERALES	110

INTRODUCTION GENERALE

Le sol a toujours été un matériau utilisé dans la construction qui représente ses principaux avantages, mais ses propriétés mécaniques ne sont pas toujours satisfaisantes et cela entraîne de nombreux problèmes lors de la construction de grandes structures, en particulier dans les cas où nous ne pouvons pas utiliser des terres non montagneuses ou sujettes aux glissements de terrain ou aux dérives.

Le sol résiste bien à la pression, mais est très mauvais pour l'étirement Le premier objectif est de modifier et d'améliorer ses propriétés mécaniques tout en préservant les bénéfices initiaux Les propriétés mécaniques du sol peuvent être améliorées chimiquement ou physiquement en reliant les molécules entre elles afin qu'elles augmentent leur résistance en ajoutant certains matériaux comme la chaux par exemple, et avec cela dans les cas d'installations majeures telles que ces solutions ne fonctionnent pas dans le but pour lequel la technologie de la terre renforcée a été développée et c'est une technique dans laquelle la résistance est renforcée Salir en ajoutant des impuretés linéaires

Les méthodes numériques sont devenues plus importantes au cours de l'étude, car le développement des méthodes numériques au fil des ans a permis d'effectuer des analyses plus détaillées en étudiant le comportement de ces structures et l'impact de chaque composant sur la stabilité et la sécurité

Le concept est de renforcer le sol en ajoutant des renforts qui peuvent être minéraux ou synthétiques et une façade en béton artificiel Ces renforts participent à la stabilité par frottement avec les particules du barrage, la conception et le calcul des structures de support du sol nécessitent un certain nombre de règles et principes où ce travail se concentrera sur l'étude Comportement analytique numérique 3D des structures terrestres renforcées géosynthétique

Le présent travail a pour objectif de modéliser numériquement un ouvrage de soutènement renforcé par des nappes géosynthétiques. Ce mur est étudié par l'utilisation des logiciels de calcul performant. Le code Plaxis 3D à titre d'exemple. Ce logiciel permet de modéliser n'importe quelle structure en sol de remblai en étudiant plusieurs paramètres influant sur son comportement.

Plan de travail :

Cette thèse se compose de deux parties, la première partie est un "résumé bibliographique sur le renforcement des sols en général" composé de deux chapitres:

Chapitre I: contient des informations générales sur les différentes techniques innovantes de mise en valeur des sols et les types de structures qui dépendent de cette technologie

Chapitre II: Ce chapitre présentera en détail le sol renforcé avec la technologie géosynthétique en particulier, comme nous avons discuté des différents projets qui dépendent de la technologie du sol renforcé avec géosynthétique

La seconde partie « Modélisation numérique » est constituée par 02 chapitres:

Chapitre III: comporte une présentation de l'ensemble de fonctionnalités de l'outil de simulation numérique (PLAXIS 3D) nécessaires pour la modélisation des murs de soutènement.

Chapitre IV: Ce chapitre présente aussi une étude paramétrique sur l'influence de plusieurs paramètres, comme la longueur des géogrilles, l'effet de module de rigidité E de géogrille, l'effet de facteur de Cohésion C et l'effet d'angle de frottement du remblai sur la stabilité du mur en sol renforcé

CHAPITRE: I
GENERALITE SUR LE
RENFORCEMENT DE
SOL

I-1. Introduction

Grâce à des techniques innovantes, il est désormais possible de construire sur tous types de sols. Du simple ouvrage à la prouesse architecturale, le savoir-faire des ingénieurs est mobilisé pour analyser, étudier, renforcer et consolider les sols. Le géotechnicien sonde et détermine les caractéristiques des sols afin de concevoir, au sein de bureaux d'études, les fondations des ouvrages. Le renforcement des sols même s'il est généralement invisible est la pierre angulaire de tout ouvrage construit sur un sol aux caractéristiques mécaniques médiocres. Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement.

L'aménagement de sol de qualité médiocre est de plus en plus nécessaire, compte tenu de la croissance de l'humanité et de ses activités. Certains types de sol, jusque-là délaissés, car présentant des caractéristiques mécaniques faibles, doivent être renforcés pour assurer la stabilité des édifices et des infrastructures de génie civil qu'ils sont appelés à porter. Peu visibles pour le profane car enfouies dans le sol, les techniques de renforcement sont très largement répandues et nous entourent au quotidien (fondations, murs de soutènement, remblais routiers, voies de chemin de fer, etc.). Plus qu'un défi technologique, la réalisation d'infrastructure dans les zones classifiées inconstructibles, représente un réel enjeu stratégique, économique et environnemental dans de nombreux cas courants comme :

pour construire une ligne à grande vitesse (LGV) dans une zone de sol compressible, lorsque ceci est économiquement plus avantageux que de détourner la ligne (par exemple, LGV SEA traversant la Dordogne),

pour installer des entrepôts dans une zone portuaire dans laquelle les sols sont souvent très compressibles de par la géologie côtière (par exemple, Port du Havre),

pour construire un aéroport sur une île artificielle en milieu marin (par exemple, aéroport de Kobe au Japon) .[10]

I-2. Généralités sur le sol renforcé

Les sols, sont des matériaux complexes constitués d'un squelette minéral plus ou moins compact présentant une porosité naturelle où l'air et l'eau circulent librement. Les grains du sol proviennent de la fragmentation plus ou moins grossière de la roche en cailloux, gravier, sable ou limon, mais aussi de la décomposition chimique de certains composés de la roche en particules microscopiques d'argile. Dans les sols perméables, comme les cailloux, les graviers et les sables,

l'eau circule facilement. Ce n'est pas le cas dans les sols peu perméables voire imperméables, comme le limon et l'argile.

L'eau circule ainsi 1 million de fois moins vite dans l'argile que dans le gravier. Par ailleurs, suite à des sollicitations extérieures telles que des venues d'eau, des périodes de sécheresse ou des séismes, les caractéristiques mécaniques des sols peuvent évoluer et ne plus être adaptées à l'usage qui leur était destiné.

Suivant le type de sol considéré et le type d'ouvrage à réaliser, il convient de retenir une solution de renforcement adaptée qui s'accorde à la fois à la nature du sol en place et à son environnement. Le problème reste d'une grande complexité comme en témoigne les vestiges du passé (tour de Pise par exemple). Deux techniques majeures peuvent être utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols : par la modification de la structure interne du sol en place et le renforcement du sol par ajout d'inclusions. Plus spécifiquement, les techniques d'amélioration des sols permettent d'accroître la compacité du sol en place, soit en réduisant le volume des vides, par exemple en appliquant une surcharge sur un sol saturé et en le laissant tasser par expulsion de l'eau en surpression, on parle dans ce cas de consolidation des sols, soit en imposant des vibrations dans le sol pour qu'il se densifie par réarrangement des grains (compactage dynamique). Les techniques de renforcement des sols proprement dites font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. L'objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d'un ouvrage sans qu'il n'y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité.

I-2.1. Des solutions diverses

De tout temps les techniques de renforcement des sols ont été utilisées, que ce soit pour renforcer les sols en place (Figure 1) par **l'ajout d'inclusions** verticales battues ou foncées dans le sol, ou pour réaliser des massifs de soutènement (Figure 2) par utilisation de sols remaniés et renforcés par **des armatures horizontales** (bandes, nappes, structures alvéolaires, etc.) ou par des fibres courtes ou continues .[10]



Figure I-1. renforcement du sol en place a inclusions rigide

I-2.1.1. Renforcement du sol en place

Les plus anciennes techniques de renforcement des sols en place reposent sur l'utilisation de pieux en bois destinés à répartir ou à transmettre la charge apportée par l'ouvrage vers des zones de sols plus étendues ou plus résistantes. En France, des fouilles à proximité du village de Benais (Indre-et-Loire) ont permis de relever au travers d'une vallée humide, et sur une longueur d'environ 200 m, les vestiges d'une chaussée romaine datant de l'an 8 avant J.C. L'assise carrossable était faite d'un empierrement de « perrons » (pierres siliceuses) épais d'une trentaine de centimètre.



Figure I-2. renforcement des massifs de soutènement a mur

Les pierres étaient disposées de chant, et entre celles-ci, des pieux profondément enfouis dans le substrat sableux ont été utilisés. Au total 27 pieux ont pu être dénombrés, dont certains étaient encore associés à l'empierrement. Ces pieux de chêne mesuraient en moyenne 1 m de long et 30 cm de diamètre. Leur pointe avait été biseautée afin de faciliter leur enfoncement. Il a même été

retrouvé une concentration de 3 alignements de 2 pieux, espacés les uns des autres de 1,60 m à 1,70 m, qui témoigne des pratiques innovatrices de l'époque concernant l'emploi d'éléments verticaux rigides, fichés dans le sol selon un espacement régulier, et associé à une couche d'empierrement subjacente permettant une redistribution des charges appliquées à la chaussée sur la tête des éléments verticaux d'une part et sur le sol entre ceux-ci d'autre part. Cet exemple illustre le principe actuel de tous les ouvrages sur sol renforcé **associant un réseau régulier d'inclusions rigides verticales et une couche granulaire horizontale** formant le matelas de répartition.[10]

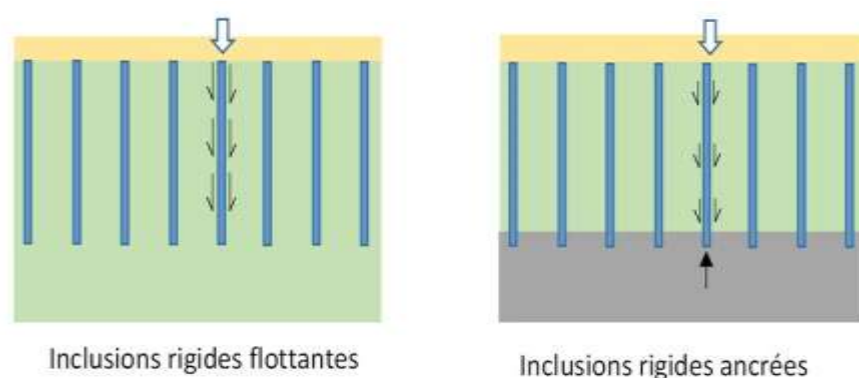


Figure I-3. système d inclusions rigides flottantes et ancrées

Suivant l'épaisseur de la zone de sol compressible concernée, les pieux peuvent être soit ancrés en pied dans une couche de sol résistante lorsque l'épaisseur de sol de qualité médiocre est faible, auquel cas les efforts en tête de pieu sont directement transmis via le pieu vers la zone stable (pieux ancrés), soit de longueur suffisante pour transmettre par frottement sur toute sa longueur l'intégralité des charges appliquées en tête du pieu par l'ouvrage (Figure 3)

Ces techniques de base ont évolué vers de nombreuses variantes qui ont toutes comme objectif de réduire sensiblement les tassements de surface du sol en place, telles que :

- Inclusions rigides de béton, réalisées en insérant dans le sol une tarière refoulante (par rotation ouvibrofonçage) jusqu'à la couche de sol porteur et en injectant gravitairement par le pied de l'outil le béton lors de la remontée de l'outil,
- Colonnes ballastées, incontestablement les plus souples, constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactées par passes successives,
- Colonnes de Jet Grouting, réalisées en déstructurant le sol en profondeur à l'aide d'un jet haute pression dans un forage et en mélangeant le sol érodé avec un coulis auto-durcissant pour former des colonnes dans le terrain

- Colonnes de Soil Mixing, réalisées par malaxage entre le sol en place et un liant (voie sèche) ou un coulis (voie humide) formant une colonne verticale cylindrique.

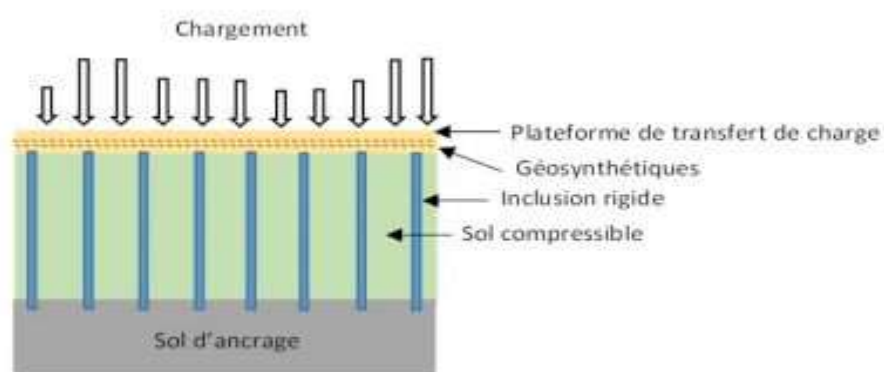


Figure 1-4.principe de fonctionnement des inclusions rigides

Enfin les techniques actuelles qui rencontrent un réel succès car économiques ou faciles de mise en œuvre sont les techniques dites **par inclusions rigides** dont l'efficacité est améliorée par la présence d'une plateforme granulaire renforcée ou non par des nappes de renforcement disposées sous l'ouvrage. Cette technique permet de limiter à des valeurs raisonnables les charges verticales transmises au sol compressible, de rediriger via des mécanismes de transfert de charge les charges verticales apportées par l'ouvrage vers les pieux tout en minimisant les composantes horizontales de la charge pouvant nuire à l'intégrité des pieux (Figure 4).

D'un point de vue environnemental, ces solutions sont intéressantes car elles ne nécessitent pas d'excavation du sol en place réduisant ainsi la pollution liée au transport des matériaux et le risque de déplacer des sols pollués. L'apport de nappes géosynthétique dans les plateformes granulaires réduit leur épaisseur et donc le besoin en matériaux « nobles » .[10]

I-2.1.2. Renforcement des sols de remblaiement

Le renforcement des sols de remblaiement par des éléments intrusifs mixés au sol ou disposés en couches alternées, n'est pas nouvelle puisque déjà en -2100, en Mésopotamie, des constructions artificielles, les ziggourats, dont la réalisation requérait un énorme effort en matériau et en main-d'œuvre, étaient renforcées par des tissés de paille. La première ziggourat, construite à Ourouk, sert de modèle à toutes les tours à terrasses qui furent élevées en Mésopotamie pendant des dizaines de siècles. La mieux conservée est celle d'Our (fin du IIIe millénaire).

Depuis, il y a eu de nombreuses évolutions dans les techniques de renforcement notamment grâce à l'utilisation de nouveaux types de renfort.



Figure I-5 .exemples des geosynthetiques

C'est sur une plage, en 1957, que l'inventeur français de la Terre Armée, Henri Vidal, fit une constatation : quand on marche sur un tas de sable, il s'affaisse et les grains s'éparpillent dans tous les sens, mais quand on y insère des rangées d'aiguilles de pin, l'ensemble reste stable même si on le sollicite fortement en marchant dessus par exemple. Henri Vidal développa cette idée pour mettre au point une nouvelle technique de construction de murs de soutènement qui s'est par la suite diversifiée sous la forme :

- D'un renforcement par armatures plates, métalliques (Terre Armée) ou synthétiques disposées horizontalement et à intervalles réguliers.
- D'un renforcement par nappes géosynthétiques (Figure 5).

Dans les deux cas le parement vertical n'a pas de fonction de soutènement mais assure une protection vis-à-vis de l'érosion. Notons que la stabilité de l'ouvrage est assurée par les armatures qui s'opposent par traction à la déformation du massif du sol et que la mise en tension des armatures se fait grâce au frottement entre les éléments de renfort et le sol. Ce type de soutènement est en soit révolutionnaire de par sa conception puisque c'est le sol renforcé qui assure sa propre stabilité ; il n'y a donc pas la nécessité de réaliser un mur de soutien qui sert de butée au massif de sol – Mur poids ou mur cantilever (Figure 6) .[1]

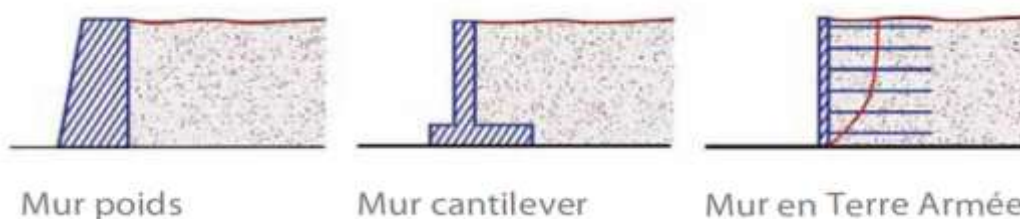


Figure I-6. evolution des murs de soutènement

Ces techniques sont largement employées car elles permettent de limiter l'emprise de l'ouvrage au sol et s'appliquent avantageusement aux terrains accidentés et difficiles d'accès (Figure 7). La géométrie modulaire de ces ouvrages leur permet de s'intégrer harmonieusement dans le paysage ; une végétalisation de certains parements est possible, rendant leur présence quasi-indétectable.[10]

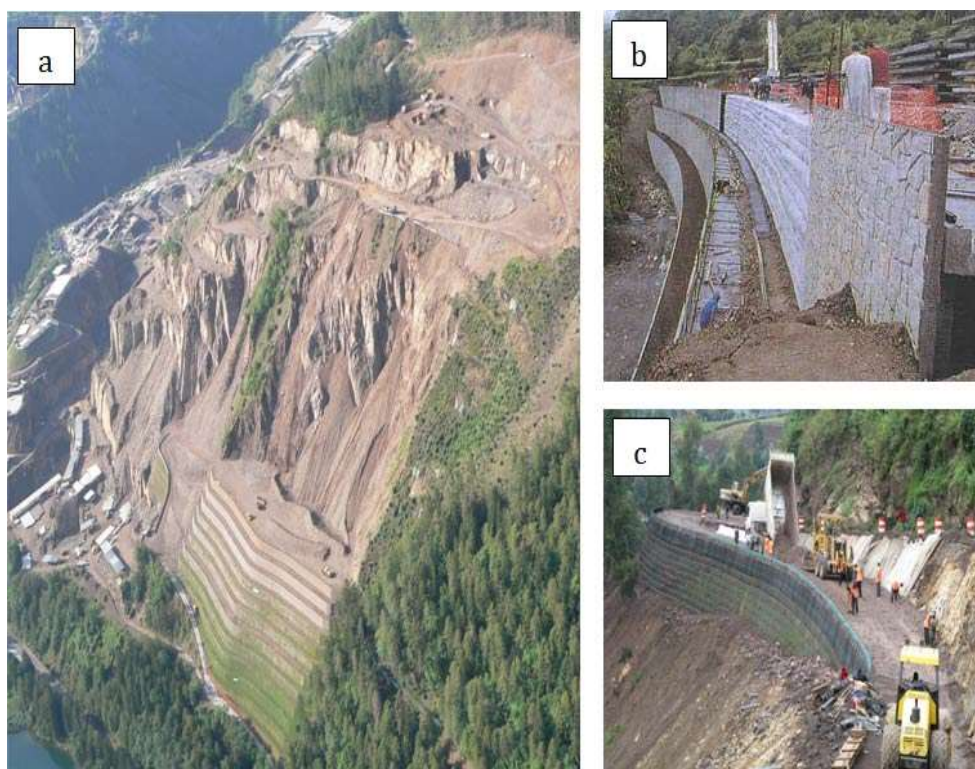


Figure I-7. exemples des murs de soutènement pour terrains accidentés et difficiles d'accès

Par ailleurs, des fibres courtes ou continues sont parfois mais plus rarement utilisées pour renforcer les massifs de sol (Figure 8). Elles sont mélangées de façon homogène dans le sol et jouent localement le rôle de renfort. De par la capacité du mélange sol/fibre à dissiper de l'énergie, cette technique est utilisée, entre autre, pour limiter les dommages qui pourraient survenir suite à l'explosion d'un réservoir de gaz. Là encore la mise en tension des éléments de renforcement est possible grâce au frottement entre les fibres et les grains ou par enserrement des grains dans le cas des fib



Figure I-8. protection d un reservoir de gaz un massif de sol

I-3. les Types de renforcement pour Renforcement du sol en place:

Il existe une très grande variété d'éléments de renforcement utilisés dans la pratique et que l'on classe généralement suivant leur forme géométrique ; unidimensionnelle (linéaire), bidimensionnelle ou tridimensionnelle. En outre, un grand nombre de matériaux constitutifs sont possibles : acier, fibres de verre, géotextiles et produits apparentés (matières plastiques), etc. une classification des principales techniques de sol renforcé en fonction de la géométrie des renforcements et du type de sol (sol rapporté ou en place).

En ce qui concerne les techniques de mise en valeur des sols, nous constatons qu'il existe de nombreuses méthodes et techniques modernes et en constante évolution, nous allons donc aborder la plupart des techniques brièvement, en gardant à l'esprit que notre sujet de recherche est consacré à la qualité des sols renforcés par la géosynthétique, cette technologie sera donc discutée en profondeur dans le prochain chapitre de l'étude.[3]

I-3.1. inclusion rigide

L'inclusion rigide est un procédé de renforcement de sol utilisant une inclusion en béton ou en mortier réalisée dans tout type de terrain, y compris dans les sols très compressibles et organiques, pour réduire les tassements et augmenter la capacité portante.[3]



Figure I-9. L'inclusion rigide

Utilisations

- mmeubles à usage industriel et commercial
- Remblais pour les routes et les voies ferrées
- Réservoirs de stockage et silos
- Bâtiments résidentiels
- Entrepôts
- Bâtiments publics
- Planchers industriels

Principe de réalisation

Une fois la plateforme de travail réalisée, la foreuse se met en position et l'enregistrement des paramètres commence. En général, une tarière à refoulement ou un tube vibrofoncé est utilisé pour descendre jusqu'à la profondeur prévue. Le béton ou le mortier remplit l'empreinte laissé par l'outil au fur et à mesure de sa remontée. L'arase du béton est réalisée en général dans le béton frais. Une fois le béton durci, le recépage est réalisé par des moyens mécaniques (marteau piqueur à main, sciage, écarteur à béton, ...)

I-3.2. La colonne à Module Mixte (CMM®) :

La colonne à Module Mixte (CMM®) ou Colonne Mixte, est un procédé d'amélioration des sols (utilisant des colonnes à haut module de déformation construites à travers des sols compressibles) pour réduire les tassements et augmenter la capacité portante. La CMM® est la combinaison d'une inclusion rigide pour sa partie inférieure avec une inclusion «souple» en gravier compacté pour sa partie supérieure.[3]



Figure I-10. La colonne à Module Mixte (CMM®) ou Colonne Mixte

Utilisations

- Immeubles à usage industriel et commercial
- Remblais pour les routes et les voies ferrées
- Réservoirs de stockage et silos
- Bâtiments résidentiels
- Entrepôts
- Bâtiments publics
- Planchers industriels
- Éoliennes

Principe de réalisation

Une fois la plateforme de travail réalisée, la foreuse se met en position et l'enregistrement des paramètres commence. En général, un outil à refoulement est utilisé pour atteindre la profondeur prévue même si un forage sans refoulement est également possible. Le béton ou mortier remplit l'empreinte laissé par l'outil au fur et à mesure de sa remontée. Une fois la partie rigide de la CMM® installée jusqu'au niveau prévu, une colonne de gravier refoulée latéralement, est mise en œuvre en descendant un vibreur dans le béton frais pour réaliser la zone de recouvrement. Sa longueur est adaptée aux caractéristiques du projet (niveau des fondations peu profondes, radiers et dalles, stratigraphie du sol). Typiquement, la hauteur de la partie souple est compris entre 1,0 et 1,5 m, même si elle n'est pas limitée en hauteur .[3]

I-3.3. colonnes ballastees :

Cette technique consiste en la réalisation de colonnes en gravier ou ballast avec un vibreur pour renforcer tous les sols dans la zone de traitement et densifier les sols granulaires environnants. C'est une technique développée par Johann Keller, le fondateur de la société. Elle fait partie intégrante de nos projets depuis plus de 70 ans.



Figure I-11. colonnes ballastees

Utilisations

- Réduction des tassements
- Réalisation de fondation superficielle
- Augmenter la capacité portante, permettant une réduction de la taille des semelles
- Augmenter la rigidité du massif de sol
- Augmenter la résistance au cisaillement
- Assurer la stabilisation des talus
- Réduire les phénomènes de 'lateral spreading' induit par un séisme
- Traiter le potentiel de liquéfaction

Principe de réalisation

Le mode opératoire est le suivant :

- Mise en station de la foreuse au droit du point de fonçage ; un chargeur à godet assure l'approvisionnement du granulat.
- Fonçage de l'outil préalablement rempli de matériau mis sous pression d'air jusqu'à la cote de traitement ; le vibreur est descendu par deux actions : la vibration et une poussée en pointe de l'ordre de 25 tonnes.
- Lorsque la profondeur est atteinte, mise en œuvre de matériau en pointe de l'outil (technique dite "bottom feed"), par expansion longitudinale et latérale.
- La colonne est exécutée ainsi par passes successives jusqu'à la plateforme d'intervention.

À chaque phase de la production, des points de contrôles (enregistrement de paramètres, essai de chargement, sondages...) assurent les caractéristiques et l'intégrité des colonnes .[3]

I-3.4. Le vibrocompactage :

Le vibrocompactage est une technique d'amélioration du sol qui densifie les sols grenus sans cohésion. C'est une technique développée par Keller dans les années 30 et qui a fait ses preuves depuis.

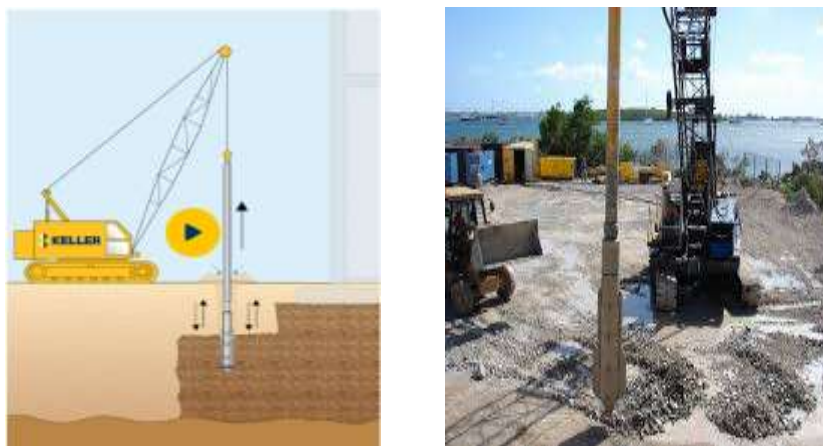


Figure I-12. Le vibrocompactage

Utilisations

- Réduction des tassements
- Permettre la réalisation de fondations superficielles
- Augmenter la capacité portante, permettant une réduction de la taille des semelles
- Augmenter la portanc
- Augmenter l'angle de frottement
- Réduction de la perméabilité des sols
- Atténuer le potentiel de liquéfaction
- Assurer la stabilisation des pentes
- Se prémunir des cisaillements horizontaux induits par le séisme

Principe de réalisation

Un vibreur accroché à une grue est descendu dans le sol à l'aide d'un fluide de lancement, généralement de l'eau. L'énergie de la vibration réduit les forces inter granulaires entre les particules du sol, ce qui permet un réarrangement des grains en diminuant les vides. Un matériau d'apport granulaire est ensuite incorporé pour compenser la diminution de vide constaté en

surface (apparition d'un cône d'affaissement). Le matériau d'apport ajouté est compacté et le vibreur remonte progressivement jusqu'à atteindre la plateforme de travail.

Les vibreurs sont entièrement instrumentés et dotés d'un système d'acquisition de données embarqué. Les données du système peuvent ensuite être enregistrées et affichées sur un moniteur en cabine. Ces mesures permettent à l'opérateur de corriger les écarts en temps réel afin de réaliser le compactage selon les critères définis du projet.[3]

I-3.5. Le Deep Soil Mixing par voie humide :

Le Deep Soil Mixing par voie humide, améliore les caractéristiques mécaniques de tous types de sols en les mélangeant mécaniquement avec un coulis à base de ciment.



Figure I-13. Le Deep Soil Mixing par voie humide

Utilisations:

- Remblais routiers et ferroviaires
- Support de fondations superficielles filantes et isolées et de radier
- Fondation de ponts et de murs de soutènement, de fondations d'éoliennes
- Paroi de soutènement
- Stabilisation de talus
- Suppression du risque de liquéfaction
- Dignes, barrages et parois étanches
- Amélioration du sol dans la masse
- Confinement et stabilisation des polluants

Principe de réalisation

Une foreuse équipée d'un outil de malaxage rotatif fixé à l'extrémité d'un tube permet de mélanger le sol avec du coulis de ciment. Ce malaxage associé à l'injection de coulis est effectué dès la descente et poursuivi lors de la remontée de l'outil. Le processus de malaxage du sol permet de réaliser aussi bien des colonnes isolées que des rangées de colonnes sécantes ou un traitement dans la masse tout en garantissant la résistance et la rigidité recherchées.

I-3.6. Le compactage dynamique:

Le compactage dynamique consiste à laisser tomber une masse de plusieurs tonnes à l'aide d'une grue selon un maillage prédéfini pour améliorer les sols naturels et les remblais.[3]

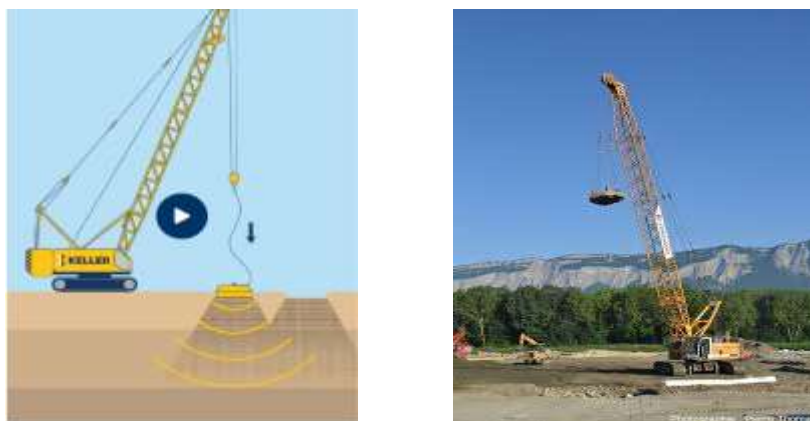


Figure I-14. Le compactage dynamique

Utilisations

- Augmenter la capacité portante
- Diminuer les tassements
- Diminuer le potentiel de liquéfaction
- Supprimer le risque d'effondrement de cavité

Principe de réalisation

Le compactage dynamique est un procédé d'amélioration du sol qui densifie les sols en place et les remblais à l'aide d'une masse. Le sol est soumis à un pilonnage de surface répété à l'aide d'une masse d'acier ou de béton. En général, la masse pèse entre 5 et 10 tonnes, et est lâchée gravitairement à plus de 10 mètres de hauteur.

Elle est lâchée plusieurs fois sur un quadrillage qui recouvre le site pour réaliser une première passe. Deux ou trois passes de compactage peuvent ensuite être nécessaires par site, selon le type et l'état du sol. Les empreintes formées après chaque passage de compactage sont remplies de matériau granulaire..

I-3.7. Le Mass Soil Mixing (MSM) :

Le Mass Soil Mixing (MSM), ou stabilisation dans la masse, est une technique d'amélioration des sols en place. Le sol est malaxé mécaniquement avec un outil rotatif à axe horizontal monté sur une pelle mécanique, soit avec un coulis de ciment, ou du liant non hydraté injecté à travers un tuyau d'alimentation fixé au bras de la pelle.[3]



Figure I-15. Le Mass Soil Mixing (MSM)

Utilisations

- Augmenter la capacité portante
- Diminuer le tassement
- Augmenter la stabilité globale
- Maîtriser la contamination

Principe de réalisation

Le processus de Mass Soil Mixing est généralement mis en œuvre dans des « cellules » prédéfinies d'environ 4 m x 4 m dans la zone dédiée. Généralement, les cellules sont malaxées à côté d'autres pour former une zone stabilisée entièrement dans la masse, jusqu'à atteindre la résistance et la rigidité adéquate recherchées.

La possibilité des sols à être malaxés, varie considérablement selon leur nature, leur résistance, lateneur en eau, la plasticité et la stratigraphie. Le sol et les tourbes organiques peuvent souvent être stabilisés, mais il est toujours recommandé de procéder à des essais en laboratoire avant la réalisation des travaux. Le traitement est possible jusqu'à 5 ou 6 mètres de profondeur. Les éventuels vestiges sont préalablement excavés avant le malaxage de sol. Des tests en laboratoire de pré-production sont menés afin de déterminer le type de malaxage, l'énergie, et la teneur en liant nécessaires. Keller a développé son propre équipement et logiciel pour le contrôle et la surveillance en temps réel des paramètres de malaxage durant le processus. Des échantillons sont prélevés pendant l'opération et traités dans un environnement contrôlé.

I-3.8. Le Rapid Impact Compaction :

Le Rapid Impact Compaction densifie les sols peu profonds, à l'aide d'un marteau hydraulique qui pilonne de façon répétée une plaque d'impact posée sur la surface du sol .[3]



Figure I-16. Le Rapid Impact Compaction

Utilisations

- Augmente la capacité portante
- Diminue le tassement

Principe de réalisation

L'énergie est transférée aux sols de faible compacité sous-jacents en réarrangeant les grains en une formation plus dense. Les emplacements de l'impact sont généralement situés selon un réseau dont l'espacement entre plots est déterminé par les conditions de sol, la charge du projet et la géométrie des fondations.

I-4. les Types de renforcement pour Renforcement des sols de remblaiement:

Il est possible d'apporter une stabilité à un massif en améliorant ses caractéristiques mécaniques. Cette amélioration est obtenue, en général, par une incrustation dans le massif, d'éléments mécaniquement plus performants que le sol lui-même, donnant à celui-ci une meilleure résistance au cisaillement. La recherche appliquée et l'apport individuel de quelques Ingénieurs hors norme ont permis de mettre au point des principes constructifs permettant d'apporter des idées nouvelles et des innovations dans l'amélioration des caractéristiques des sols. Nous présentons ci-après les principales solutions utilisées en la matière.

I-4.1. La Terre-Armée

Dans les années 60, Henri Vidal dépose le brevet de la «Terre-Armée». C'est un principe de renforcement des sols par l'association d'armatures métalliques et de remblai grenu, type sable, qui permet la formation d'un massif mécaniquement plus performant. Le parement* de ce type de massif est constitué d'un parement béton modulaire dont l'élément de base est appelé écaille. Les écailles sont reliées aux armatures constituées, elles, en lanières métalliques.[5]

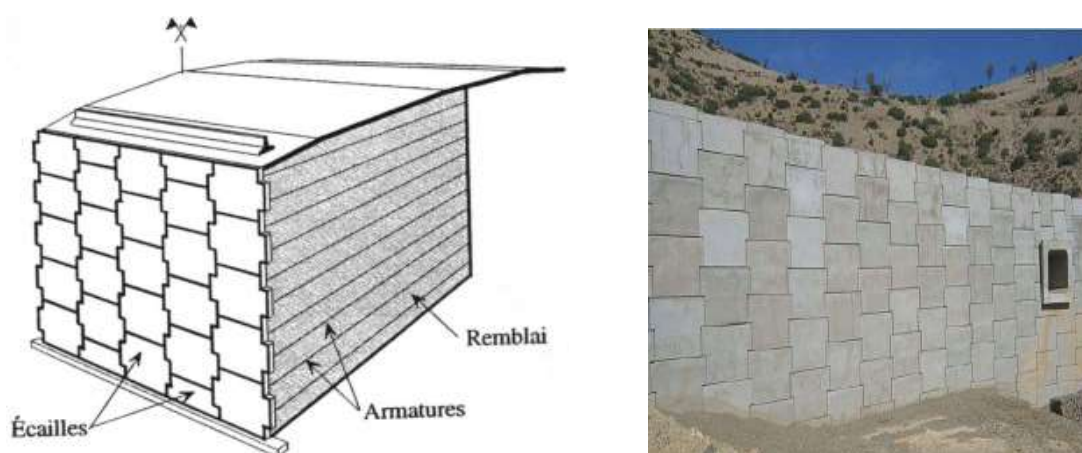


Figure I-17. Henri Vidal dépose le brevet de la «Terre-Armée»

I-4.2. Le freyssissol

Devant le problème de corrosion des armatures métalliques et le développement des produits synthétiques, mécaniquement performants et chimiquement stables, la société Freyssinet a mis au point un procédé de terre armée à base d'une armature synthétique faite à partir de polyester, le Freyssissol est alors né ! Il est apparu dès que le brevet de monsieur Vidal est tombé dans le

domaine public. D'ailleurs c'est la société Freyssinet, filiale du groupe Vinci qui racheté la société Terre armée dans les années 90.

I-4.3. Le Terratrel

Le TerraTrel est un parement* léger constitué d'un treillis métallique relié à des armatures en acier. Également appliqué aux ouvrages provisoires, son intégration à l'environnement se fait par végétalisation ou par minéralisation.[5]

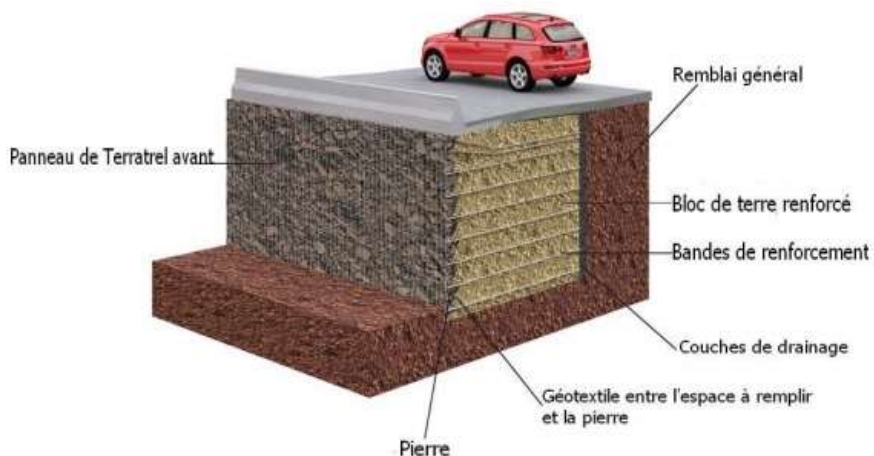


Figure I-18. Le Terratrel

I-4.4. Le Pneusol

Le Pneusol est un mélange de pneus et de sol, dans lequel les pneus sont utilisés comme renforts du sol. Ils sont capables de supporter des efforts de traction importants et sont soit entièrement soit partiellement découpés afin

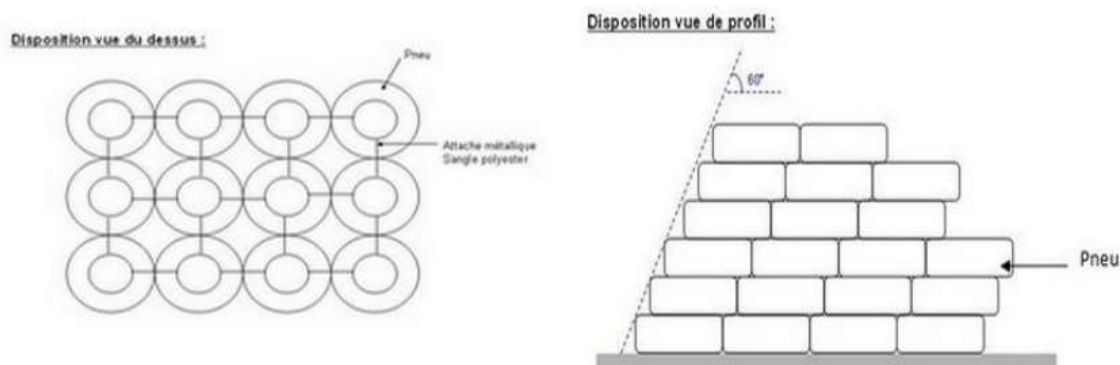


Figure I-19. Le Pneusol

d'être associés en nappes, en couches superposées, grâce à des attaches métalliques.

I-4.5. Le cloutage:

Le cloutage de sol est un principe d'amélioration du sol à l'aide d'armatures métalliques mises en place à l'intérieur de forages réalisés dans le massif à stabiliser. L'intérêt d'un tel procédé est de réaliser le raidissage des pentes de talus avant de procéder au déblai. Le parement est réalisé à l'aide d'un béton projeté et les armatures sont courantes car il s'agit d'armatures de béton armé sans autre prescription complémentaire .[5]

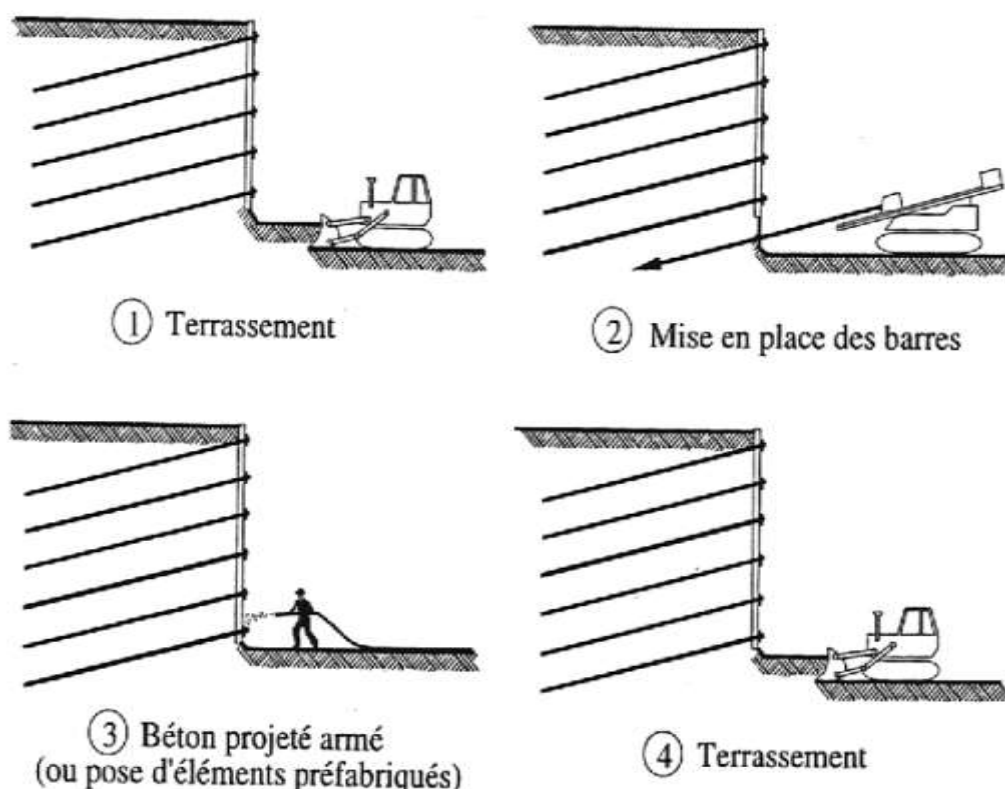


Figure I-20. Le cloutage

I-4.6. Renforcement par inclusions géosynthétiques :

Le renforcement par inclusions géosynthétiques est un procédé utilisé pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols.

Les géosynthétiques sont des produits dont le principale constituant est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'au matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Ces produits sont utilisés dans les domaines tels que la construction routière, les travaux hydrauliques, les chemins de fer, les terrains d'aviation, etc. .[11]



Figure I-21. Le renforcement par inclusions géosynthétiques

SEPARATION :

Prévention contre le mélange des deux matériaux de natures différentes par l'emploi d'un géotextile.

RENFORCEMENT :

Utilisation de la capacité de résistance d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles afin d'améliorer les propriétés mécaniques des sols.

PROTECTION :

Fonction consistant à empêcher les endommagements localisés concernant un matériau donné en utilisant le géotextile, en général une géomembrane.

ETANCHEITE :

Contrôle de la migration de gaz ou de liquide.

FILTRATION :

Maintien du sol ou d'autres particules soumis à des forces hydrauliques en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile.

DRAINAGE :

Collecte et transport des eaux pluviales, souterraines ou d'autres liquides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles.

Les géosynthétiques les plus utilisés sont:

- * Les géotextiles
- * Les géogrilles
- * Les géocomposites

GEOTEXTILES

Sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymères (polypropylènes, polyesters, polyéthylènes) et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. La fonction du géotextile dans le sol peut être la séparation, la filtration, et aussi le renforcement. Géotextiles non tissés : la fabrication consiste au filage en continu des fibres, à leur étirement, avant de les napper et de les lier par aiguilletage ; Géotextiles tissés : leurs bandelettes en polypropylène sont fabriquées par un procédé d'extrusion, elles sont ensuite tissées.[11]



Figure I-22. Infrastructures de transport par goitextile

GEOCOMPOSITE

Est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géosynthétique, par exemple une géogrille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonctions de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement (fonction de renforcement, particulièrement en réfection).



Figure I-23. des composants

GEOGRILLES

Sont des géosynthétiques dont la fonction est le renforcement des sols. Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol. La grandeur des mailles varie généralement de 1 et 10 cm pour permettre la pénétration des gros éléments du sol, et la création d'un effet d'imbrication de ces constituants dans la géogrille. Pour obtenir l'effet de renforcement il est nécessaire que les gros éléments s'imbriquent de la moitié de leur volume dans la maille. On distingue des géogrilles mono-axiales et bi-axiales: Mono-axiale: la résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal) que dans l'autre. Bi-axiale: la résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal.[7]



Figure I-24. Instalation de mur renforce par une géogrille

I-5.AVANTAGES DE L'UTILISATION DE GEOSYNTHETIQUES POUR LE RENFORCEMENT:

- amélioration des caractéristiques mécaniques des sols;
- réduction de l'interpénétration des matériaux d'apport avec les sols en place et diminution des mouvements de terre;
- réduction du mélange indésirable de terres et diminution des exigences de transfert de matériau;
- modification des structures routières et ferroviaires pour en augmenter les capacités;
- diminution des emprises;
- création de merlons antibruit d'aspect naturel;
- réduction des délais de construction (possibilité de travailler pendant la période hivernale);
- augmentation de la sécurité et de la stabilité des remblais;
- préservation de l'aspect naturel du paysage;
- optimisation des coûts de construction.

I-6. DOMAINES D'EMPLOI

Cette technique peut être appliquée dans tous les ouvrages :

- Routiers
- Ferroviaires
- Maritimes et fluviaux
- Industriels et de protection

I-6.1.OUVRAGES ROUTIERS

L'application la plus fréquente est la construction de soutènements supportant des chaussées en terrain dénivelé ou dans les sites urbains.

La souplesse d'utilisation permet une grande liberté d'implantation. Le parement peut être traité avec une large variété d'aspects.

Les principales utilisations concernent :

- Les murs sous chaussées, simples ou étagés ;
- Les culées porteuses
- Les culées mixtes
- Les murs de rampes
- Les talus raidis
- Les merlons antibruit



Figure I-25. Quelques ouvrages routiers dans le monde

1. Culées porteuses pour ouvrages d'art sur voies ferrées à Werzon, France
2. Rcade Est d'Umages, France
3. Culées porteuses à Pozo Canada Espagne
4. Murs de rampe à Kuala Lumpur, Malaisie
5. Voute Tech Span sous le trace du train a grande vitesse à Torromocha, Espagne

I-6.2. OUVRAGES FERROVIAIRES

Des massifs de soutènement en Terre Armée sont utilisés dans de nombreux pays pour le chemin de fer ou le métro. Ces applications font appel à la même technologie qu'en infrastructure routière, à l'exception de quelques dispositions constructives spécifiques. Les structures en Terre Armée résistent remarquablement bien aux vibrations engendrées par le passage des rames.

La construction de soutènements le long des voies ferrées ne nécessite pas d'échafaudages ni de fondations dépassant du parement et peut, par conséquent, être réalisée sans interrompre la circulation. montre quelques ouvrages ferroviaires .[7]



Figure I-26. Quelques ouvrages ferroviaires dans le monde

1. Tunnel de Home bush Bay, Australie
2. Tunnel de Chenton Avenue, Australie
3. Mur de soutènement ferroviaire à Lisbonne, Portugale
4. Metro Leger de portland, Etats-Unis
5. Réaménagement ferroviaire de Raiston Holly Grade, Etas-unis

I-6.3. OUVRAGES INDUSTRIELS ET DE PROTECTION

Outre le mur de soutènement classique pour stabiliser des terrains, des solutions spécifiques ont été développées pour la construction de silos de stockage de charbon ou de minerai et de murs de déchargement des postes de criblage et de concassage. On compte aujourd'hui plus d'une centaine de murs de déchargement en service dans le monde parmi les plus hauts ouvrages en Terre Armée.

Les applications industrielles présentent plusieurs caractéristiques :

- capacité d'adaptation de la technique qui permet, quels que soient la hauteur et l'aspect (écaille de béton, peau métallique, parement treillis), de s'accommoder des contraintes liées aux formes (inclinaison des parois, forme rectiligne ou circulaire) ;
- résistance aux vibrations (criblage et concassage) ;
- excellente tenue aux variations thermiques.

La Terre Armée est également idéale pour la réalisation d'ouvrages de protection civils, militaires ou industriels. Ceux-ci résistent particulièrement bien aux explosions, aux déversements accidentels ou aux incendies .[7]



Figure I-27. Quelques ouvrages industriels et protection dans le monde

1. Murs TerraMet pour la mine de Pibara, Australie
2. Sib de stockage, Glary hole, canada
3. Réservoir à mousse de Muskeg, Canada
4. Mur de protection anti avalanche, Islande

I-6.4. OUVRAGES HYDRAULIQUES

Les applications en site fluvial ou maritime sont nombreuses et très variées. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ce choix pour un maître d'œuvre :

- Résistance aux sollicitations très sévères telles que les crues, les fortes marées, la houle, les tempêtes, les efforts de la glace et les chocs divers (bateaux, épaves, etc.) ;
- Rapidité d'exécution, en particulier pour les travaux effectués en zone de marnage grâce à l'exécution simultanée de remblais.

La construction de murs de quai en Terre Armée effectuée entièrement sous l'eau est possible. La technique a déjà été utilisée avec succès dans plusieurs pays (marinas, ports de pêche) .[7]



Figure I-28. Quelques ouvrages hydrauliques dans le monde

1. Murs de soutènement Terra Trel Terra Class à den Bosch, Pays Bas
2. Barrage Taylor Draw dans le Colorada, Etas Unis
3. Murs Tympan Terra Set pour la déviation de milieu France
4. Mur de soutènement à Louveciennes, France
5. Voute Tech Span et murs Terra Trel sur la N 200, pont de Valie en corse, Franc

I-7.CONCLUSION :

À travers le chapitre sur les généralités, nous voyons l'ampleur de la diversité qui existe dans les techniques et les innovations dans les méthodes de renforcement des sols sous toutes ses formes afin de réduire la capacité du sol à résister aux effondrements et aux fissures et d'exploiter des projets optimaux au coût le plus bas possible par des techniques de renforcement vertical ou horizontal ou par les applications de jusicentic pour améliorer la capacité du sol où nous aborderons dans les chapitres à venir à l'existence d'une relation et l'intégration de ces différentes façons de parvenir à un projet intégré et plus de sécurité.

CHAPITRE:II

RENFORCEMENT DU SOL PAR GEOSYNTHETIQUE

II-1. Introduction:

Depuis leur apparition dans les années 1960, les géosynthétiques (géotextiles, géomembranes et produits apparentés) sont devenus des matériaux majeurs dans tous les domaines du génie civil. Les premiers géotextiles et les premières géomembranes ont été perfectionnés pour étendre leurs applications. Des essais et des normes ont été établis, avec des systèmes de contrôle de la qualité.

les géosynthétiques de renforcement des sols sont employés dans les ouvrages géotechniques depuis plus de quarante ans. Leur domaine d'application est très vaste puisqu'ils peuvent être installés :

- sur des talus d'ouvrages hydrauliques ou d'installations de stockage de déchets ;
- à la base de remblai construit sur :
 - sol compressible,
 - sur zone à risque de cavité,
 - sol amélioré par inclusions rigides ;
- dans des ouvrages en terre pour construire des talus renforcés ou de ouvrages de soutènements...

L'intérêt de ces produits est qu'ils apportent au sol une résistance en traction que le sol seul ne possède pas (ou très peu pour les sols cohérents) permettant ainsi d'augmenter la stabilité d'un ouvrage. Leur emploi permet en général un gain économique en comparaison à d'autres solutions de construction et permet d'exploiter de nouvelles zones, actuellement délaissées, car présentant des risques pour la sécurité des usagers.

De nombreux types de géosynthétiques de renforcement existent sur le marché ; bien qu'ils soient de constitutions différentes, ils doivent tous présenter des caractéristiques nominales déterminées par des essais normalisés en laboratoire. Ces caractéristiques peuvent être ensuite dégradées lors de la mise en œuvre des produits et pendant la durée de service de l'ouvrage renforcé, et le dimensionnement des géosynthétiques doit intégrer ces dégradations possibles. Cet article présente :

- les géosynthétiques de renforcement ;
- les essais en laboratoire permettant de déterminer leurs caractéristiques ;
- les mécanismes d'interaction entre les géosynthétiques et leur environnement ;
- la prise en compte des facteurs d'influence ;
- les principes de leur mise en œuvre et leur dimensionnement dans des ouvrages géotechniques.

II-2. définition de géosynthétique

Un géosynthétique est un produit dont au moins un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, poly-amide, polyester ou polypropylène, par exemple) ou naturel. Il se présente sous forme de nappe, de bande ou de structure tridi-mensionnelle. Il est utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. Un certain nombre de géosynthétiques sont définis par la norme de terminologie NF EN ISO 10318 . Certains termes qui ne sont pas définis dans cette norme peuvent être trouvés dans la terminologie établie par l'International Geosynthetics Society (IGS).

Les ouvrages dans lesquels les géosynthétiques sont utilisés sont multiples : infrastructures linéaires de transport (routes, voies ferrées), ouvrages hydrauliques (barrages, bassins, canaux), ouvrages pour la protection de l'environnement (installations de stockage de déchets, stockage de déchets miniers, sites et sols pollués), bâtiments. Ces différentes applications seront illustrées dans la suite de ce document. Pour le cas particulier des tunnels, le fascicule 67 Titre III du cahier des clauses techniques générales (CCTG) régit l'utilisation des géosynthétiques . Il n'est pas repris ici. Les géosynthétiques sont généralement répartis en deux grandes familles :

- les géotextiles et produits apparentés aux géotextiles qui sont des produits perméables ;
- les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques qui sont essentiellement imperméables.

Les géosynthétiques sont définis par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques selon des essais normalisés, identifiés pour l'essentiel par des normes internationales de type ISO, européennes de type EN, ou nationales de type NF, DIN, ASTM.[6]

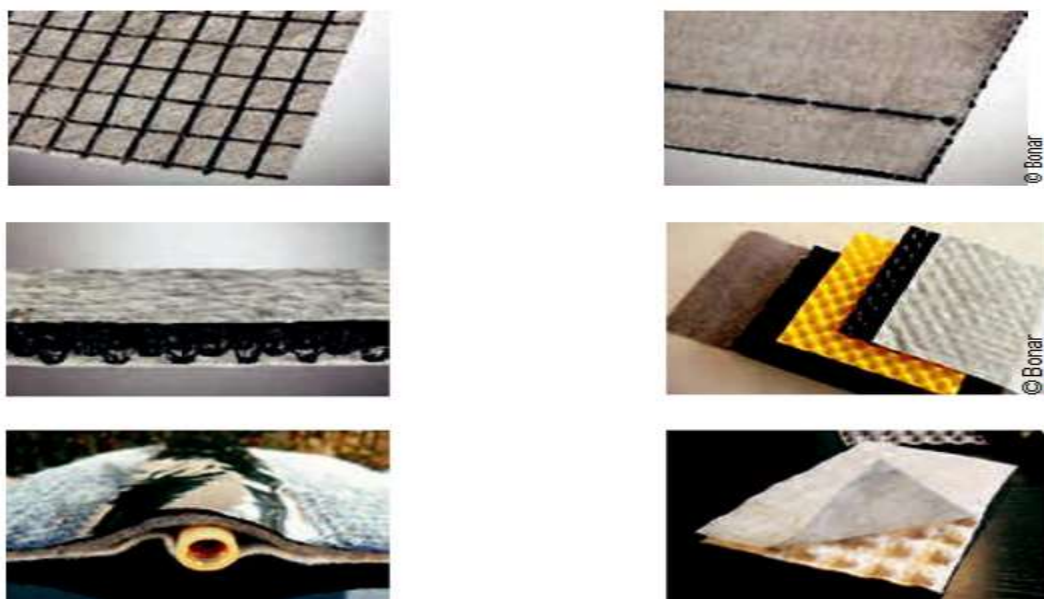


Figure II-1. Quelques exemples de géocomposites.

II-3. différentes familles de geosynthetique :

Parmi les géosynthétiques, on distingue en général :

- les produits perméables : les géotextiles et produits apparentés de géotextiles,
- les produits essentiellement étanches : les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques L'association de ces produits forme des géocomposites .[6]

II-3. 1.geotextiles:

Les géotextiles sont des produits textiles en polymères (naturels ou synthétiques), plans, perméables, pouvant être non-tissés, tricotés ou tissés, utilisés en contact avec un sol et/ou d'autres matériaux pour les applications géotechniques et de génie civil.

Les principaux polymères utilisés pour la fabrication de géotextiles sont :

- le polyéthylène (PE) ;
- le polyamide (PA) ;
- le polyester (PET) ;
- le polypropylène (PP)

Ces polymères ont des propriétés différentes et le choix d'un géotextile peut être motivé dans certains cas par le type du polymère. Parmi les géotextiles . on distingue :

- les tricotés ;
- les tissés
- les non tissés thermoliés ;
- les non tissés aiguilletés

II-3. 2. Produits apparentés:

Sont regroupés sous l'appellation de « produits apparentés de géotextiles », tous les produits perméables qui ne sont pas des géotextiles On distingue dans cette famille :

- les géogrilles utilisées pour le renforcement des sols ;
- les géomats assurant la fonction anti-érosion ;
- les géospaceurs (geonets) assurant la fonction de drainage ;
- les géocellules permettant de confiner une couche de sol de faible épaisseur ;
- les géoconteneurs remplis de sol ou d'un autre matériau.

II-3. 3.géosynthétiques étanches:

Les géomembranes [C5430] sont des produits adaptés au génie civil, minces, souples, continus, étanches au liquide même sous des déformations de service, principalement en traction.

L'étanchéité d'une membrane doit être inférieure à 0,1 l/j/m² sous une charge hydraulique de 100 kPa (hors joints). On distingue les géomembranes synthétiques [C5436] et les géomembranes bitumineuses [C5437].

■ Parmi les géomembranes synthétiques (figure 3), il y a :

– les plastomères :

- polychlorure de vinyle (PVC),
- polyéthylène haute densité (PEHD),
- poly

– les élastomères :

- éthylène-propylène-diène monomère (EPDM),
- polypropylène (PP).

Leur formulation comprend en plus du polymère, des plastifiants, des stabilisants, des lubrifiants, des pigments qui permettent d'améliorer les caractéristiques de la géomembrane :

– flexibilité sous basse température ; – résistance aux UV ; – augmentation du frottement

■ Les géomembranes bitumineuses sont constituées d'un géosynthétique imprégné de bitume.

Leur frottement peut être augmenté en sablant une de leur face. Un film anti-racinaire peut être ajouté sur la face opposée. Les géosynthétiques bentonitiques sont des matériaux composites étanches composés d'un ou plusieurs géosynthétiques et d'une couche d'argile.

Il existe deux types de géosynthétiques bentonitiques :

- ceux pour lesquels l'argile est fixée entre deux géotextiles ;
- ceux pour lesquels l'argile est collée sur une géomembrane. [6]

II-3.4. géosynthétiques composites:

Les géosynthétiques composites sont des produits qui associent au minimum un géosynthétique

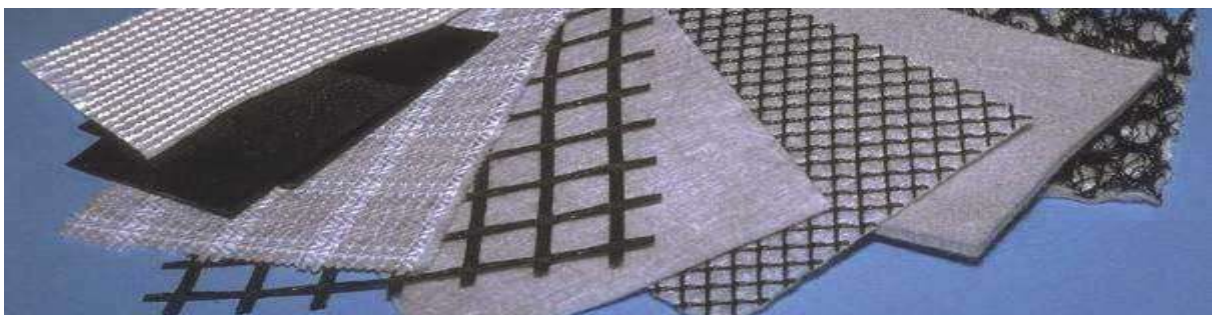


Figure II-2. Les géosynthétiques

II-4. fonction des géosynthétiques:

II-4.1. Fonctions des géotextiles et produits apparentés:

Les géotextiles et produits apparentés peuvent remplir, dans les domaines de la géotechnique et du génie civil où ils sont utilisés, différentes fonctions

--**la séparation** : prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblais adjacents de natures différentes ;

--**la filtration** : rétention du sol, ou d'autres particules sou-mises à des forces hydrodynamiques, tout en permettant le pas-sage de fluides à travers ou dans un géotextile, ou un produit apparenté aux géotextiles. Le géotextile permet de créer un auto-filtre dans le sol en amont ;

--**le drainage** : collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit appa-arenté aux géotextiles ;

--**le renforcement** : utilisation du comportement en traction-déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres maté-riaux de construction

--**la protection** : prévention ou limitation des endommage-ments localisés d'un élément ou d'un matériau donné, en utilisant un géotextile ou un produit apparenté ;

--**la lutte contre l'érosion de surface** : utilisation d'un géotex-tile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface

Les géotextiles peuvent également être utilisés pour retarder les remontées de fissures en surface des structures de chaussée. Cette utilisation n'est pas définie comme une fonction officielle par la norme NF EN ISO 10318. [6]

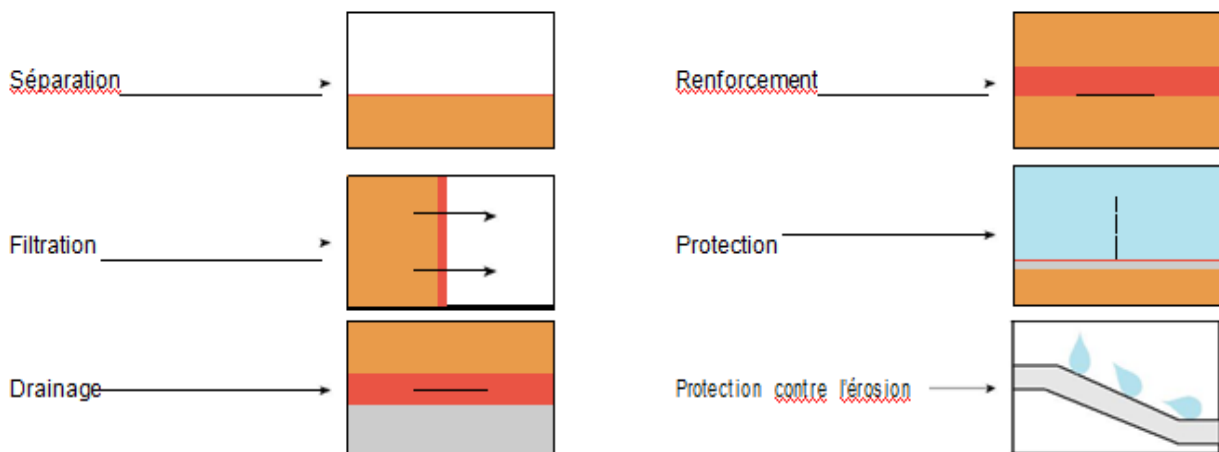


Figure II-3. Principales fonctions des géotextiles et produits apparentés d'après la norme NF EN ISO 10318

II-4.2. Fonction des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques :

L'unique fonction des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques est d'assurer une étanchéité (Tab. 1).

La géomembrane comme le géosynthétique bentonitique sont utilisés au sein d'un dispositif d'étanchéité par géosynthétiques (DEG) . Ces dispositifs sont décrits en détail dans les normes NF P84-500 et XP P84-700 [3, 4]. [6]

	Géotextile	Géospaceur	Géogrille	Géococteneur	Géomembrane	Géosynthétique bentonitique
Etanchéité					*	*
Protection	*			*		
Drainage	*	*				
Filtration	*		*	*		
Séparation	*					
Renforcement	*		*	*		
Résistance à l'érosion	*	*		*		

Tableau II-1. Fonction principale par les principaux géosynthétiques élémentaires

II-4.3. Principales propriétés des géosynthétiques :

Les principales propriétés des géosynthétiques, par comparaison aux matériaux naturels qu'ils servent à remplacer, sont :

- **une performance généralement meilleure**, puisque les géosynthétiques sont développés autour d'une ou deux fonctions spécifiques. Chaque fonction est par conséquent optimisée au sein du produit. Par exemple, un produit drainant développera la fonction unique de drainage. Ses propriétés hydrauliques seront spécifiquement développées pour répondre de manière optimale à un besoin spécifique, ce que ne pourrait faire un autre produit comme le sable par exemple, dont les caractéristiques sont plus difficilement prévisibles sur site.
- **une qualité supérieure**, ou tout au moins parfaitement maîtrisée, puisque les géosynthétiques sont fabriqués dans un espace conditionné, leur contrôle en usine est possible, dans des conditions idéales, à une fréquence régulière et adaptable.
- **une durabilité plus grande**, puisque les géosynthétiques sont développés autour d'une ou deux fonctions principales, la durabilité des produits est plus facile à assurer (choix des résines, des additifs, produits synthétiques non ou faiblement dégradables). Par exemple, une géogrille de renforcement en PeHD ne sera pas dégradée dans le temps par l'action de l'eau (rouille,

électrolyse). Un géotextile de filtration pourra être réalisé dans une fibre traitée contre l'effet des rayonnements UV.[6]

II-4.4.Principales produits géosynthétiques :

II-4.4.1. le type de Géotextile :

Les géotextiles sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymère et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. La fonction du géotextile dans le sol peut être la séparation, la filtration, et aussi le renforcement.[10]

- **Un non tissé** est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée d'un voile ou d'une nappe de fibres, orientées selon une direction ou distribuées aléatoirement, et dont la liaison peut être de différents types :



Figure II-4.Géotextile non-tissé



Figure II-5.Géotextiles tissés bandelette



Figure II-6.Géotextiles filtrants

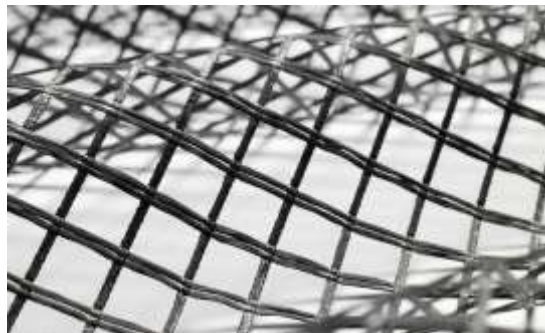


Figure II-7.Géogrille constituée de câbles en polyester à haute ténacité

- **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 aiguillet).

- **La liaison chimique** est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des composés 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 thermosoudé).

- **Un tissé** est constitué de séries de fils perpendiculaires combinés de façon systématique (Exemple : des tissus utilisés pour des chemises, des voiles de bateaux, les bâches).

- **Un tricoté** 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 .[10]

II-4.4.2. le type de Géocomposite :



Figure II-8. Géocomposite pour le drainage horizontal



Figure II-9. Géocomposite composé de trois couches

Un géocomposite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géosynthétique, par exemple une géogrille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonctions de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement (fonction de renforcement, particulièrement en réfection).[9]

II-4.4.3. le type de Géomembrane :

Sont des feuilles étanches, souples, minces et continues, fabriquées à partir de produits synthétiques ou bitumineux, utilisées dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. La principale application des géomembranes est donc constituer une barrière étanche entre un sol et un fluide.

II-4.4.4. le type de Géogrilles :**Figure II-10. Géogrille****Figure II-11. Grille anti-fissures de renforcement d'enrobé**

Les géogrilles sont des géosynthétiques dont la fonction est le renforcement des sols. Une géogrille est une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants et permettant le confinement du sol.

À l'heure actuelle, il existe une multitude de géogrilles normalisées différant d'une entreprise à l'autre (Tensar, Maccaferri,...) et ayant des caractéristiques propres à leur application. Type de géogrilles : Il existe trois grands types de géogrilles :

- uni-axiales : la résistance à la traction étant plus importante dans un sens (travers ou production) que dans l'autre, elles seront surtout utilisées pour renforcer les talus et les berges.
- bi-axiales : la résistance à la traction étant sensiblement équivalente dans les deux sens, elles seront plutôt utilisées pour le renforcement et la fondation des routes.
- tridimensionnelles : servant de protection contre l'érosion (de talus très raides, berges et canaux de drainage à fort débit), cette géogrille, grâce à ses fibres naturelles intégrées dans la structure, offre aussi une aide à l'installation de la végétation en favorisant la germination.

Propriétés des géogrilles utilisées en renforcement :

- Les géogrilles ont des taux de travail très élevés, car les matières premières à haut module ont un faible fluage.
- Les géogrilles sont disponibles avec différentes résistances à la traction (entre 20 kN/m et 1000 kN/m) et différentes ouvertures de mailles. Pour des utilisations spéciales, nous pouvons réaliser des résistances à la traction de plus de 1000kN/m. [9]

- Les caractéristiques de traction et d'allongement des géogrilles ne varient que faiblement sous des variations importantes de température et sous des contraintes permanentes.
- Les géogrilles sont conditionnées de manière standard, ceci afin de réduire au mieux les recouvrements.
- Les géogrilles 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 pouvant entraîner des blessures.

Principales caractéristiques des géosynthétiques :

Une inclusion géosynthétique de renforcement doit remplir les deux fonctions suivantes:

- Avoir une bonne résistance à la rupture
- Mobiliser le frottement du sol.

II-5. Durée de vie:

Afin d'obtenir une durée de vie en adéquation avec la fonction du géosynthétique dans l'ouvrage, les concepteurs doivent prendre en compte les facteurs environnementaux impactant la pérennité des géosynthétiques. Le vieillissement des géosynthétiques exposés est principalement dû au rayonnement ultraviolet, à la chaleur et à l'oxygène, mais aussi à d'autres facteurs climatiques tels que l'humidité, la pluie...

Une caractérisation adéquate des matériaux en contact avec les géosynthétiques est par ailleurs essentielle pour une bonne prise en compte de la durabilité des géosynthétiques enfouis: pH, présence d'oxygène, agressivité chimique, teneur en eau, température, matière organique et micro-organismes.[2]

II-5.1. Durée de vie des géotextiles:

Les exigences concernant le temps maximum d'exposition et éventuellement le coefficient de réduction correspondant sont définis dans la norme NF EN 13251 . et dans le guide ISO TR 20432 . À moins que les géotextiles ne soient destinés à être recouverts rapidement, ils doivent être soumis à l'essai accéléré de résistance aux agents climatiques selon la norme NF EN 12224. La résistance résiduelle du géotextile ou du produit apparenté à l'issue de l'essai, ainsi que l'application spécifique du produit, définiront la durée pendant laquelle le matériau peut rester exposé sur le site. Les durées maximales d'exposition sont données dans le tableau 2. En cas d'exposition prolongée, il faut donc s'assurer, auprès du fournisseur, de la résistance résiduelle du

produit à l'issue de la période d'exposition ou envisager des solutions alternatives de protection ou d'autres dispositions constructives.[2]

Application	Résistance résiduelle après essai de vieillissement	Durée maximale d'exposition pendant la mise en œuvre
Renforcement ou autres applications dans lesquelles la résistance à long terme est un paramètre significatif	> 80 %	1 mois ⁽¹⁾
	60 à 80 %	2 semaines
	< 60 %	1 jour
Autres applications	> 60 %	1 mois ⁽¹⁾
	20 à 60 %	2 semaines
	< 20 %	1 jour

Tableau II-2. Durée maximale d'exposition des géotextiles et produits apparentes

II-5.2. Durée de vie des géomembranes:

Les géomembranes en polyéthylène haute densité (PEHD) sont celles pour lesquelles le plus de connaissances sont disponibles quant à leur durabilité dans les installations de stockage de déchets. Des experts proposent une synthèse des connaissances relatives à la durabilité des géomembranes en PEHD dans les installations de stockage de déchets. Comme pour les autres polyoléfinés, le mécanisme de vieillissement de ces géomembranes est l'oxydation. Il n'existe pas aujourd'hui de modèle fiable pour prédire la durée de vie des géomembranes en PEHD dans cette application. Il manque en effet à l'heure actuelle une analyse d'échantillons vieillis in situ pendant des durées de 10 ans au moins pour pouvoir valider les modèles.

C'est dans le cadre des ouvrages hydrauliques que le plus grand nombre d'études a été effectué sur la durabilité. Des publications récentes font état de bons comportements des géomembranes en PEHD de 17 ans, en éthylène propylène diène terpolymère (EPDM) pour une durée de 21 ans . en, en polychlorure de vinyle plastifié (PVC-P) renforcé de 25 ans . À noter que ces durées ne correspondent pas à une rupture de l'étanchéité mais à l'âge le plus élevé de la géomembrane au moment de son prélèvement. On peut donc espérer des durées de vie plus importantes que celles citées précédemment en l'absence de sollicitations mécaniques .[2]

II-6. Utilisations géosynthétiques dans divers domaines :

II-6.1. Ouvrages hydrauliques :

Les applications hydrauliques des géosynthétiques correspondent à un vaste domaine d'applications. Ces applications recouvrent leur utilisation dans les barrages

- dont les retenues d'altitude.
- Dans les canaux, les réservoirs de stockage d'eau et les couvertures flottantes de stockage d'eau potable.

Dans la suite de ce chapitre, on rappelle brièvement l'historique de l'utilisation des géosynthétiques dans les ouvrages hydrauliques et la diversité des matériaux qui peut y être rencontrée. On donne ensuite les grands principes relatifs à la conception des ouvrages hydrauliques, afin d'assurer un fonctionnement optimal des géosynthétiques. Dans ces ouvrages. [2]



Figure II-12. Quelques exemples d'ouvrages hydrauliques étanchés par géosynthétiques

II -6.1.1. Historique

L'utilisation des géosynthétiques dans les ouvrages hydrauliques remonte aux années 1940 et s'est vraiment étendue à partir des années 1960 et 1970. Les applications hydrauliques représentent la première utilisation des géomembranes pour l'étanchéité des ouvrages.

Les premières utilisations ont conduit, à partir de retours d'expérience, à l'amélioration des pratiques dans différents domaines :

--l'amélioration physico-chimique des matériaux et de leurs composés on a ainsi vu apparaître une variété de polymères au-delà des géomembranes bitumineuses comme le polyéthylène chloré (CPE), le polyéthylène chlorosulfoné (CSPE) – aussi connu sous le nom de « Hypalon » –, le PVC-P, le néoprène, l'EPDM, le PEHD, le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polypropylène flexible (PP-f) pour les principaux.

Les applications hydrauliques sont celles dans lesquelles on trouve la plus grande diversité de géomembranes utilisées, car ce sont celles où les risques d'incompatibilité chimique sont les plus limités

--l'**inclusion de matériaux de renforcement** : cette technique utilisée initialement dans la fabrication des géomembranes bitu-mineuses a également été appliquée aux géomembranes CPE, CSPE et PVC-P ;

--la **conception de couches additionnelles nécessaires au maintien de la fonction étanchéité de la géomembrane**

ainsi le matériau support doit être préparé avant la pose de la géo-membrane et des couches de géosynthétiques destinées à assurer la fonction de drainage ou de protection peuvent être mises en place sur la géomembrane (cf. 1.3.3).

Parmi les ouvrages anciens, on peut citer : le réservoir du pont de Claix (40 ans) ; le barrage de Contrada Sabetta du lac Bai-tone et les tranchées drainantes de Roissard .

Le premier géotextile utilisé dans un barrage est, à notre connaissance, un géotextile non tissé utilisé comme filtre à Val-cros en 1970 .

Dans la suite de ce document la fonction de filtration interne des barrages, qui n'est pas une application courante, n'est pas abordée bien qu'elle demande une grande technicité. On se focalise principalement sur la conception des dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques (DEG) pour les bassins, les barrages et les canaux.

Des éléments sont également apportés en matière d'applications courantes de géotextiles filtrants et de tubes géosynthétiques.[2]

II -6.1.2. Conception des DEG

Préparation du support

Le support doit être exempt de tout végétal ou de toute matière organique pour éviter les risques de dégazage sous la géomembrane. Tous les éléments potentiellement agressifs doivent être éliminés. Le support doit ensuite être compacté dans les règles de l'art. On évitera ainsi au maximum le risque d'endommagement de la géomembrane

Drainage et protection sous la géomembrane

Il n'est en général pas recommandé, dans le cas des ouvrages hydrauliques, de poser directement la géomembrane sur le fond de forme, sauf lorsque tout risque de poinçonnement ou de dégazage a été définitivement écarté.

L'objectif d'un drainage de l'eau sous la géomembrane est de prévenir l'accumulation des fuites éventuelles, ainsi que les risques de sous-pression. De nombreux matériaux, dont des géocomposites drainants, peuvent assurer ces fonctions (géobandes).

Le drainage des gaz est également essentiel lorsque des remon-tées de nappe sont attendues ou que toute la matière organique n'a pas pu être enlevée.

Les pratiques actuelles tendent à découpler les systèmes de drainage de liquides de ceux des gaz.

Une couche de protection, souvent un géotextile, peut être interposée entre le fond de forme et la géomembrane si le sup-port n'est pas assez lisse pour garantir le maintien de l'intégrité.[2]

Protection et recouvrement

Une des meilleures manières de prévenir le vieillissement des géosynthétiques, et des géomembranes en particulier, est de les couvrir pour limiter leur exposition aux conditions climatiques.

La couche recouvrant la géomembrane aura pour effet de pré-venir le risque d'endommagement :

- par des solides transportés ou flottants ;
- par des engins ou des machines telles des pompes ;
- par des animaux fousseurs ou des racines de végétaux ;
- par le vandalisme ou des actions humaines.

La nécessité de recouvrir la géomembrane diffère d'une appli-cation hydraulique à une autre . Il semble toutefois que, dans la plupart des ouvrages hydrauliques, la géomembrane reste exposée.La configuration la plus courante, lorsque la géomembrane est protégée, est le recouvrement par un géotextile, lui-même recou-vert de matériaux granulaires, de dalles en béton ou de pavés autoblocants .Les actions mécaniques liées au passage d'engins nécessitent la mise en œuvre de dalles de béton ou de béton projeté sur la géomembrane.

Une protection locale peut également être envisagée lorsque des zones particulières ont été identifiées

Une alternative à l'utilisation des géomembranes pour l'étan-chéité des ouvrages peut être le recours à l'utilisation de géosyn-thétiques bentonitiques.

Dans tous les cas, l'utilisation des géomembranes, comme celle de géosynthétiques bentonitiques, doit être effectuée dans le respect des règles de l'art. On pourra utilement se référer aux fascicules 10 et 12 du Comité français des géosynthétiques (CFG)

Singularités

Des singularités existent dans les ouvrages hydrauliques. Il s'agit par exemple des ancrages, des voies d'accès à l'ouvrage, des jonctions de l'étanchéité à des ouvrages comme des puits, des canalisations en béton ou des murs.

Des éléments relatifs aux dispositions constructives pour ces points particuliers peuvent être trouvés par exemple dans le fascicule 10 du CFG.[2]

II.6.1.3. Géotextiles filtrants

Afin de protéger les ouvrages hydrauliques (digues côtières, berges de cours d'eau...) des effets de l'érosion de l'eau, des structures de protection doivent être mises en place. Elles comprennent deux zones à vocations bien différentes :

--la zone externe doit dissiper l'énergie hydraulique apportée par les vagues : on retrouve ici soit des enrochements soit des éléments préfabriqués en béton, dénommés blocs dans la suite de ce document ;

--sous ces blocs, la zone inférieure de la structure en contact direct avec le sol doit avoir une fonction de filtration : elle doit éviter l'érosion du sol soumis aux écoulements d'eau qui ressortent du massif au rythme de la houle (Fig. 10) .[2]

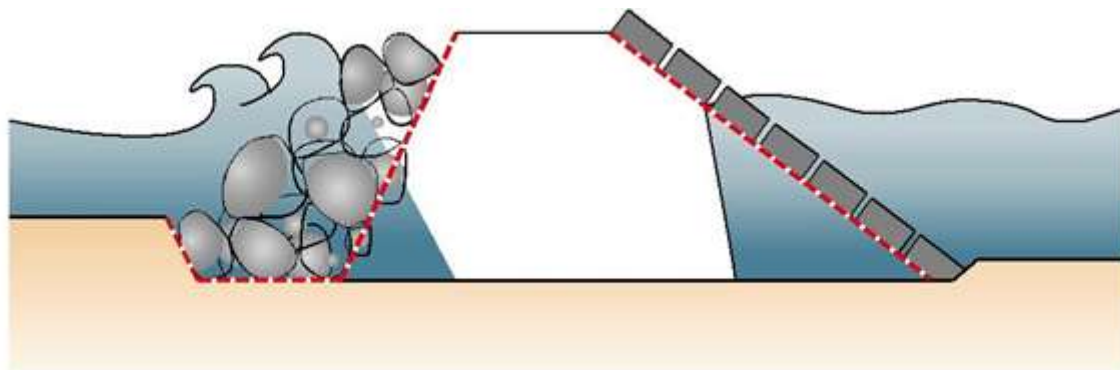


Figure II-13. Schéma d'utilisation d'un géotextile en filtration sous enrochement

Une rupture ou un dysfonctionnement du système de filtration, dus soit à un lessivage du sol soit à un colmatage du filtre, peu-vent avoir des conséquences sévères sur la stabilité globale de l'ouvrage hydraulique.

Les géotextiles peuvent remplir ce rôle de couche protectrice en servant de filtre sous les enrochements. Ils sont plus simples à mettre en œuvre que des couches de matériaux granulaires et ont fait leurs preuves en termes d'économie et de fiabilité.

Par ailleurs, ces géotextiles doivent présenter des caractéristiques mécaniques et de souplesse suffisantes pour résister aux agressions lors de l'installation des enrochements de plusieurs centaines de kilogrammes, comme le montre .[2]



Figure II-14. Géotextile de filtration sous enrochement

II.6.1.4. les Tubes géosynthétiques

Dans le domaine de la protection côtière, des techniques de réalisation de corps de digues en tubes de géosynthétiques se développent pour combattre l'érosion ou permettre la construction d'infrastructures côtières. Le tube maintient le sol contenu en place, empêchant ainsi l'érosion et les dommages matériels.

Cette technique très simple peut tout à fait être réalisée pour des aménagements d'ampleur tels que la création d'îles ou le gain de terres sur la mer, voire des aménagements plus petits comme la sécurisation d'un terrain privé .

Les tubes géosynthétiques sont empilables. Ils peuvent donc composer le noyau d'une digue de protection, ou protéger le pied d'une digue (comme ce fut le cas, par exemple, pour l'aménagement de Port-Médoc en 2003), tout en utilisant les matériaux sableux présents sur site . présentent l'utilisation des tubes géosynthétiques sur le chantier de Port-Médoc.

D'autres utilisations des tubes géosynthétiques sont faites dans le domaine de l'aménagement côtier. Ils sont par exemple employés immergés. Ils forment alors une digue sous-marine qui permet d'atténuer la houle et de limiter l'impact des vagues sur les plages (ex. : ville de Cannes –

Figure II-15. Schéma d'aménagement simple pour limiter l'érosion d'un terrain par tubes géosynthétiques



Figure II-16. Photographie du chantier en tubes géosynthétiques de Port

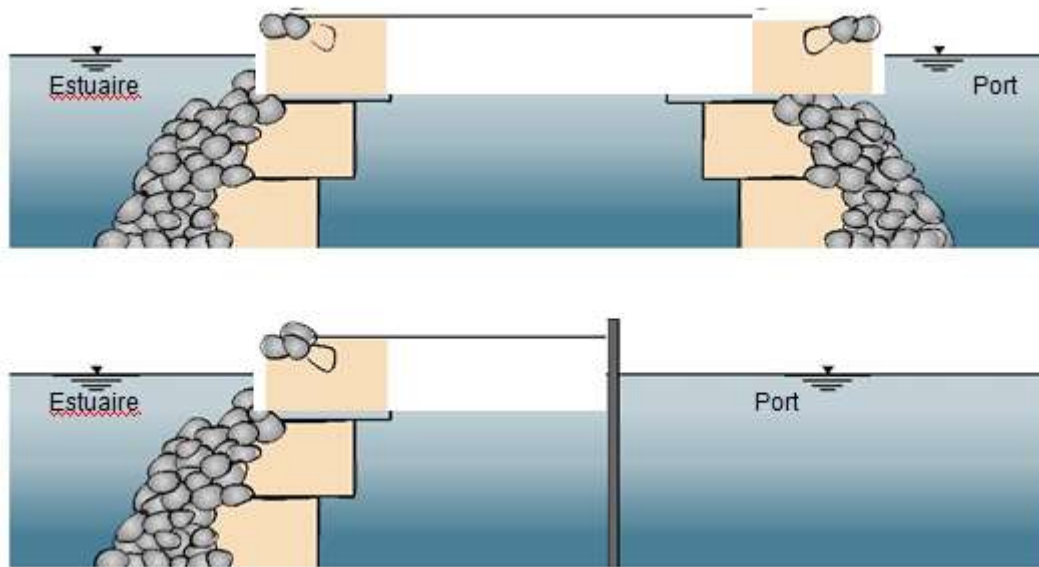


Figure II-17. Schéma d'aménagement en tubes géosynthétiques

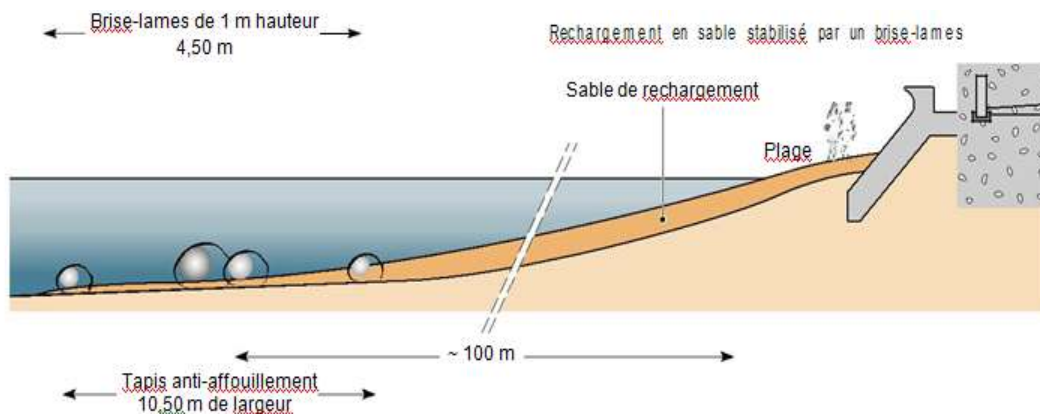


Figure II-18. Plan schématique des tronçons en tubes géosynthétiques pour la protection des plages de la Croisette à Cannes

II.6.2. ouvrages routs et infrastructures lineaires :

Les géosynthétiques trouvent une application dans de nombreux aménagements routiers et d'infrastructures linéaires. Ils interviennent dans ce type d'application très souvent en remplacement ou en optimisation technique et économique d'autres solutions. En prenant l'exemple d'une construction de route, les géosynthétiques sont présents dans les applications suivantes (Fig. 19) :

--En séparation, sous la couche de forme afin de préserver les caractéristiques de la couche de forme (1).

--En base de remblais, pour permettre de construire sur des sols peu porteurs voire compressibles, ou encore sur des zones à risque karstique (2).

--Dans des tranchées en tant qu'éléments filtrants entre les matériaux en place et les matériaux drainants de la tranchée (3).

--Dans des pentes de talus pour éviter l'érosion avant la végétalisation du rampant (4).

--Dans des merlons ou des remblais pour raidir les talus ou réaliser des murs de soutènement. Il est ainsi possible de réaliser des élargissements de voies, des merlons de protection, ou anti-bruit par exemple, en limitant les emprises au sol (5).

--À l'intérieur des structures de chaussées enrobées pour ralentir la remontée des fissurations des couches inférieures (6) (cf. 3.3). [2]

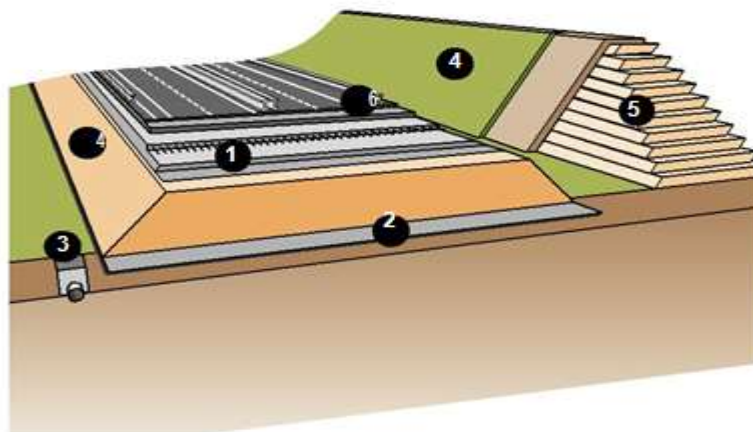


Figure II-19. Applications des géosynthétiques dans les infrastructures linéaires

II.6.2.1. Terrassements routiers et ferroviaires

La première utilisation des géotextiles dans les terrassements est celle de séparation (anti-contaminant). Elle est prévue par exemple par le guide des terrassements routiers

« L'intercalation d'un géotextile anti-contaminant entre une couche de forme en matériau granulaire et un sol fin sensible à l'eau, humide, permet de sauvegarder les caractéristiques du matériau granulaire et de réduire ainsi l'épaisseur de la couche de forme. »

Le principe est ici d'éviter la pollution des matériaux granulaires d'apport par les matériaux fins des couches sous-jacentes en place. On utilise alors un géotextile de séparation. Les géotextiles non tissés sont ainsi privilégiés, leur grande déformabilité étant un avantage .



Figure II-20. Exemples de déformation des géotextiles non tissés

Si les sols en place présentent de très fortes teneurs en eau, il peut être intéressant d'utiliser des géosynthétiques de renforcement afin de limiter les épaisseurs de couche de forme ou d'éviter une substitution des matériaux du sol.

Plusieurs solutions, allant du géotextile tissé à la géogrille en passant par des géocomposites, peuvent être utilisées. Il est important dans cette application de conserver une fonction anti-contaminant (séparation). Une géogrille sera ainsi associée à un géotextile de séparation à la base de la couche de forme, la géogrille étant placée dans le matériau granulaire de la couche de forme. Les géotextiles tissés et les non-tissés renforcés peuvent être utilisés à la base du terrassement.



Figure II-21. Utilisation d'une géogrille en renforcement de couche de forme



Figure II-22. Utilisation d'un géotextile tissé en renforcement de couche de forme

Quelle que soit la solution choisie, il est recommandé d'avoir une épaisseur de matériaux d'au moins 0,2 m au-dessus du géotextile ou de la géogrille afin d'ancrer correctement le géosynthétique.

Les intérêts de ces solutions de renforcement de la couche de forme et/ou de substitution à la base du terrassement sont multiples :

- réduction des épaisseurs des couches granulaires ;
- diminution du volume de terrassement ;
- réduction des évacuations en filière de traitement de déchets ;
- gain de temps ;
- économie sur la globalité du chantier.

II.6.2.2. Anti-fissuration de chaussées

Depuis plusieurs dizaines d'années, les géotextiles sont également utilisés pour ralentir le remontée de fissures (Fig. 20). Plus récemment, l'utilisation, notamment, de fibres de verre dans les géotextiles a permis de renforcer plus efficacement les chaussées, en construction ou en rénovation. Une norme s'applique à ce domaine (NF EN 15381). Pour autant il n'existe pas encore de méthode normalisée pour le dimensionnement de ces solutions. L'enjeu principal de l'utilisation des géotextiles dans les chaussées est d'allonger la durée de vie de la couche de roulement et donc d'espacer au maximum les opérations d'entretien.

Le premier objectif de l'interposition d'un géotextile est de servir de support à la couche d'imperméabilisation de la structure de chaussée. Un géotextile non tissé de porosité importante permet ainsi de servir de réservoir pour le bitume entre le support (couche de forme, fondation ou base) et la couche de roulement (Fig. 20).

En effet, que ce soit sur des couches traitées aux liants hydrauliques qui subissent des fissurations de retrait ou sur des couches bitumineuses dont la fissuration est due au durcissement et à la fatigue de l'enrobé, il est important de préserver les couches inférieures des entrées d'eau. Un surdosage de bitume résiduel permet d'obtenir une couche imperméable. L'association américaine AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) a quantifié le minimum de rétention de bitume à 0,9 L/m² pour un géotextile afin d'assurer la fonction étanchéité. Cette information est reprise dans la norme NF EN 15381.[2]

Figure II-23. Application d'un géosynthétique

anti-fissuration de chaussée



Le Stac (Service technique de l'aviation civile) a réalisé en 1999 un guide sur l'utilisation des techniques anti-remontées de fissures. La solution avec géotextile non tissé est comparée à des solutions de retraitement ou d'utilisation de sable enrobé. La solution avec géosynthétique apparaît comme la plus économique

Si un géotextile non tissé est suffisant dans l'entretien courant des routes, il existe certains cas où les géocomposites ou géo-grilles composés de fibres de verre ou d'autres polymères comme le polyester prennent le relais :

- en renforcement de chaussée sur des anciennes chaussées en béton ;
- en renforcement partiel de fissures longitudinales ou lors d'un élargissement, au contact de l'ancienne et de la nouvelle chaussée ;
- en renforcement d'une chaussée lors d'une réparation au-dessus d'une tranchée.

Quel que soit le produit utilisé, l'installation présente des constantes :

- préparation et nettoyage du support ;
- comblement des fissures larges ou autres dégradations ;
- fracturation des dalles dans le cas de la pose sur des dalles béton ;
- pose de l'émulsion de bitume selon le dosage recommandé en fonction du support et du géosynthétique utilisé ;
- installation du géotextile après avoir attendu la rupture de l'émulsion.

Enfin si les solutions de renforcement de structures de chaussée sont intéressantes d'un point de vue économique, elles ne se substituent pas à la réalisation d'un diagnostic de la structure existante. Certaines structures anciennes peuvent être dans un état de fatigue trop important pour supporter le trafic même avec un géosynthétique anti-remontées de fissures.

II.6.2.3. Base de remblais

En plus de la fonction de séparation à la base du remblai, les géotextiles sont utilisés en renforcement dans les cas suivants :

- sur les sols compressibles ;
- au-dessus des inclusions rigides ;
- au-dessus des zones karstiques

Sur les sols compressibles

Pour la réalisation de remblais sur des sols mous et/ou compressibles, on peut observer :

- des problèmes de stabilité générale du remblai dus aux faibles caractéristiques mécaniques du support ;
- des problèmes de tassements du remblai dus à la consolidation des sols sous-jacents

L'utilisation des géosynthétiques de renforcement en base des remblais permet d'améliorer les conditions de stabilité. Même si le géosynthétique ne réduit pas les amplitudes des tassements, il permet de les lisser et d'éviter des ruptures localisées, provoquées par les tassements différentiels et les terrains hétérogènes.

Cette solution de renforcement par géosynthétiques permet d'optimiser notamment la durée du chantier et les emprises de terrassement par comparaison aux solutions classiques (construction par étapes ou réalisation de bermes [interruptions intermédiaires]). Elle est aussi plus économique, comparée aux solutions utilisant des colonnes ballastées ou traitées au ciment, et plus écologique car elle limite les volumes de purge

Les nappes de géosynthétiques généralement utilisées sont plus résistantes en traction dans la direction transversale à l'ouvrage linéaire. Il est donc nécessaire de faire attention au sens de la pose du géosynthétique

[2]

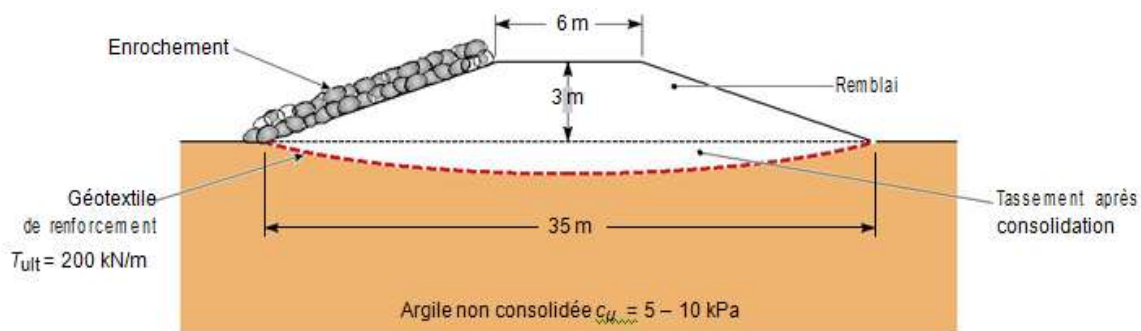


Figure II-24. Exemple de remblai sur sol compressible renforcé par géosynthétiques.

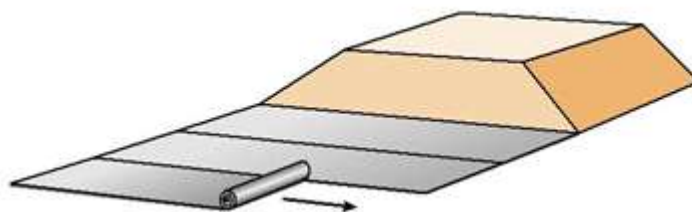


Figure II-25. Orientation de pose des géosynthétiques de renforcement en base des remblais

Dans le matelas de répartition des inclusions rigides

Dans le cas de l'amélioration des sols par inclusions rigides, on utilise des inclusions qui ne sont pas liées par des éléments rigides.

La transmission des efforts venant de l'ouvrage est assurée par une plate-forme ou matelas de transfert de charge constitué de matériaux granulaires .[2]

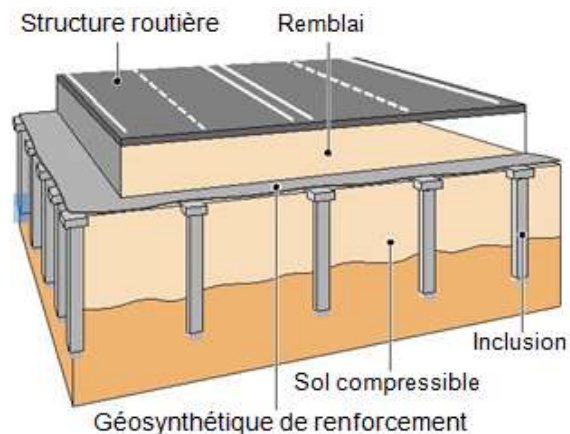


Figure II-26. Application d'un géosynthétique de renforcement sur inclusions rigides.

L'application des géosynthétiques en renforcement du matelas de transfert de charge sur inclusions est apparue dans les années 1980, mais son développement en France est plus récent.

Le projet de recherche national Asiri (Amélioration de sols par inclusions rigides), lancé en 2002 et associant de nombreux professionnels et des universités, a permis de démontrer l'importance du géosynthétique dans le transfert de charge et son comportement en déformation .

Le renforcement est constitué d'un géosynthétique placé en général à la base du matelas de transfert de charge et peut être éventuellement complété par d'autres nappes positionnées dans l'épaisseur du matelas. Le renforcement par géosynthétiques reprend une partie des charges du remblai et la reporte sur les inclusions .

Le principal bénéfice de cette technique est l'optimisation de la structure par une meilleure combinaison espacement – dimension des têtes d'inclusion.

En plus de l'amélioration du transfert de charge, un géosynthétique de renforcement, positionné perpendiculairement à l'axe du remblai, permet de reprendre les efforts horizontaux engendrés par la poussée latérale du remblai et donc d'éviter d'incliner ou de renforcer les inclusions sous les bordures de remblais .[2]

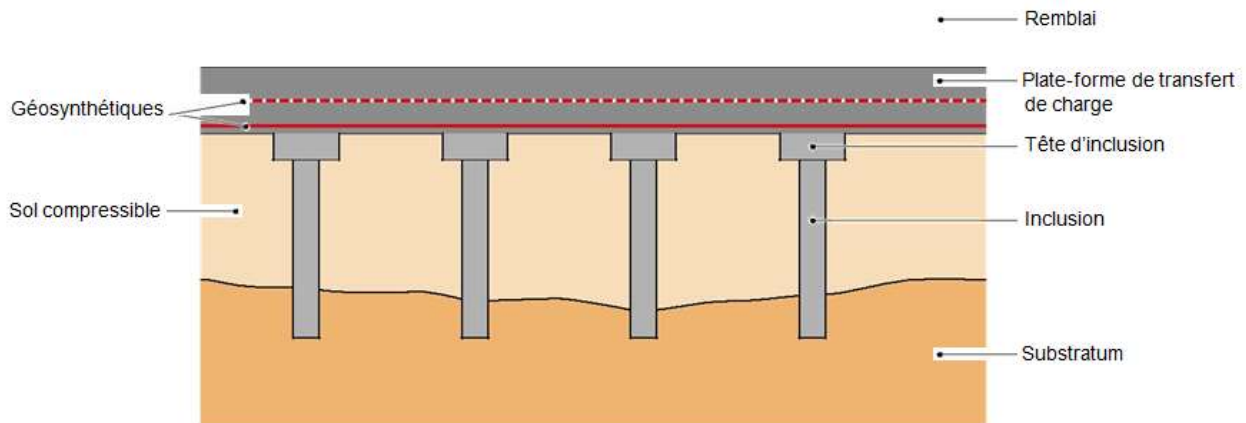


Figure II-27. Schéma de principe du renforcement sur inclusions rigides.

Au-dessus des zones karstiques

Dans des zones karstiques, les géosynthétiques peuvent être utilisés pour renforcer la base du remblai et éviter la ruine de l'ouvrage. Ainsi le renforcement par géosynthétiques a pour but essentiel de préserver la sécurité des usagers en évitant tout effondrement brutal de l'ouvrage. Il permet d'assurer l'utilisation de l'ouvrage en limitant sa déformation à une valeur tolérable, pour la durée comprise entre le moment où l'effondrement s'est produit et le déclenchement des opérations de traitement de la cavité.

La connaissance des mécanismes de fonctionnement des renforcements par géosynthétiques s'est considérablement développée, en particulier grâce aux programmes de recherche entrepris comme le projet Rafael (Renforcement des assises ferroviaires et autoroutières contre les effondrements localisés)

En fonction de la taille de la cavité, de l'épaisseur de la structure, le renforcement permet d'éviter ou de limiter les désordres en surface pour la durée définie par le maître d'ouvrage. [2]

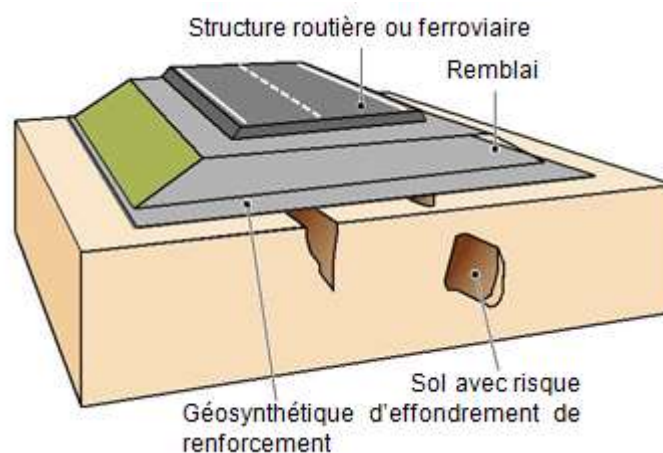


Figure II-28. Application d'un géosynthétique de renforcement sur cavités

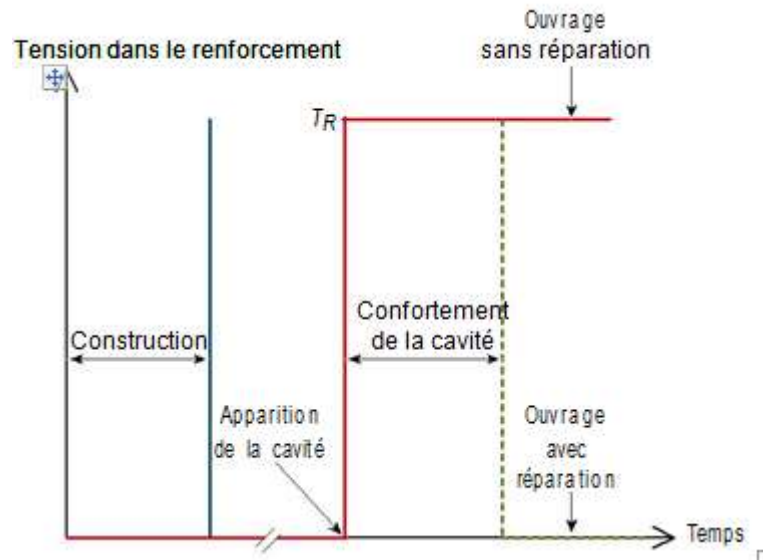


Figure II-29. Deux options pour le renforcement sur cavités

Après la construction du remblai, le renfort géosynthétique demeure dans un état de tension nulle jusqu'à ce qu'un vide apparaisse sous le remblai. Le géosynthétique se met alors en tension et permet de supporter les charges du remblai.

Dans le cas d'un traitement spécifique (comblement de la cavité par exemple), la tension dans le renforcement sera ramenée à une valeur nulle.

Selon la stratégie d'entretien adoptée, le renfort pourra continuer à soutenir la structure de remblai pendant le reste de la vie de l'ouvrage.

Le renforcement par géosynthétique pourra être calculé pour une durée allant de quelques jours à plusieurs dizaines d'années

Drainage sous remblais

Pour les remblais routiers ou ferroviaires, un drainage par géosynthétiques permet de :

- limiter les remontées d'eau dans le corps du remblai et donc de conserver toutes les caractéristiques géotechniques des matériaux mis en œuvre (la pose est faite sous tout le remblai avec raccordement aux tranchées latérales)

- pour les zones compressibles, ce drainage sous remblai peut être associé à un réseau de drains verticaux permettant d'accélérer la vitesse de consolidation du sol support, et donc de diminuer le temps d'attente pour obtenir le tassement attendu



Figure II-30. Mise en œuvre du remblai sur le géocomposite de drainage



Figure II-31. Pose du géocomposite de drainage au contact des drains verticaux

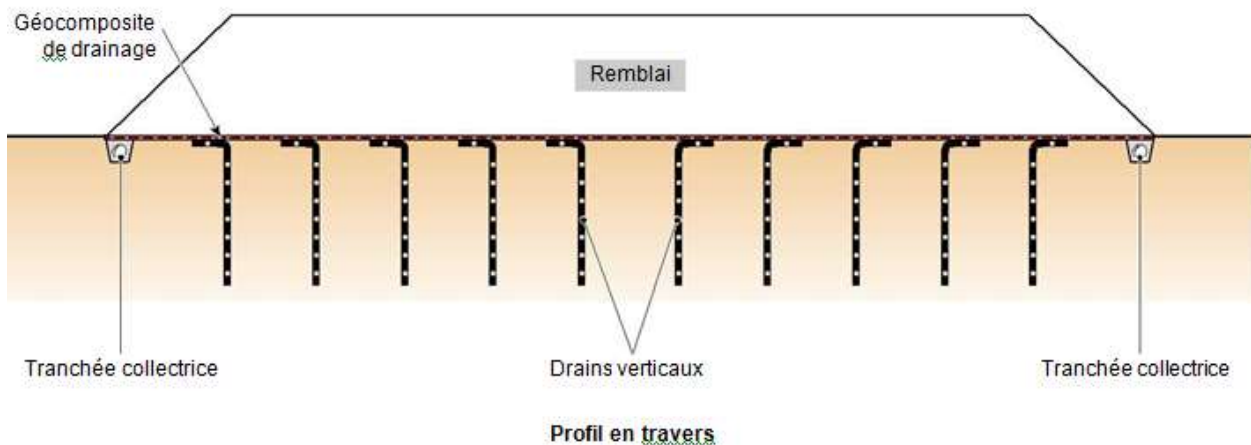


Figure II-32. Drainage sous remblai sur zones compressibles

Écran drainant en rive de chaussée (EDRC)

Le fonctionnement des structures de chaussée routière peut être amélioré en limitant les teneurs en eau des matériaux. Un géocomposite de drainage placé verticalement en rive de chaussée permet :

- de collecter les eaux d'infiltration provenant du corps de chaussée ;
- de s'opposer à la migration des eaux en provenance de l'ac-cotement.

Une tranchée de faible largeur permet de placer le drain collecteur, raccordé au géocomposite, à la profondeur nécessaire

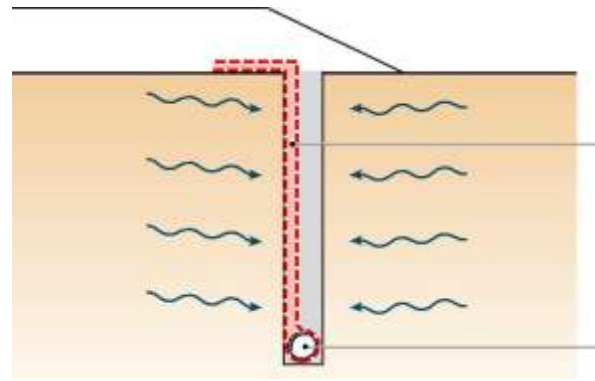


Figure II-33. Géocomposite de drainage en EDRC

Figure II-34. Géocomposite de drainage en EDRC : principe

II.6.2.4. Filtres drains

Les géotextiles sont utilisés en tant que filtres dans de nombreux aménagements et ouvrages de terrassement (Fig. 32).

Ils sont utilisés par exemple autour de matériaux granulaires pour éviter leur contact avec des matériaux plus fins, qui risqueraient de les polluer. Ils protègent ainsi le rôle drainant dans le cas de couches drainantes sous des remblais (Fig. 33).

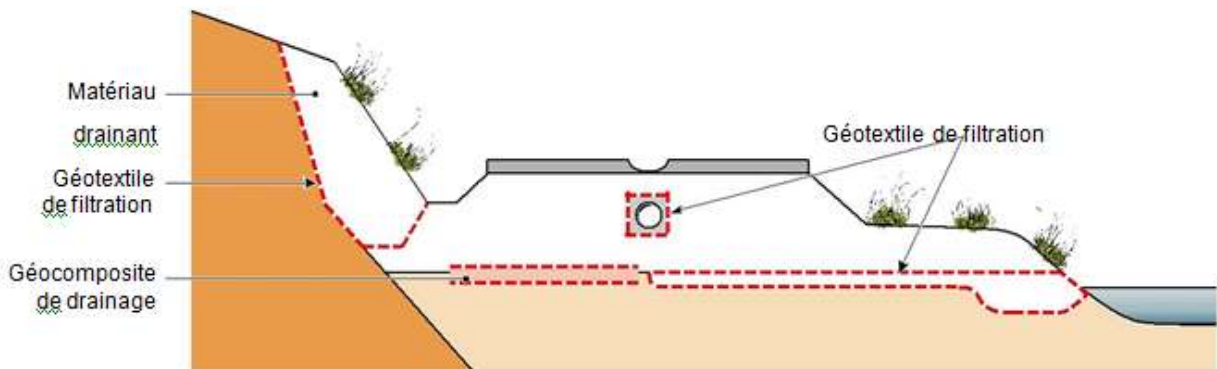


Figure II-35. Applications des géosynthétiques en drainage et filtration



Figure II-36. Filtre géotextile entre un matériau fin et un matériau drainant

Le filtre se place donc entre deux matériaux, de granulométries différentes. La perméabilité du filtre doit être supérieure à celle des matériaux granulaires afin de ne pas être un frein à l'écoulement de l'eau entre les matériaux. Son ouverture de filtration (cf. 6.3) doit permettre d'assurer que le sol extérieur au massif drainant ne vienne pas se mélanger avec celui-ci et le polluer par des particules fines

Remblai renforcé par géosynthétiques : une solution économique

De nombreuses études ont porté sur l'avantage économique des remblais renforcés par géosynthétiques. Tout d'abord, comparé aux autres solutions de soutènement (mur poids, mur béton en L, renforcement métallique...), le remblai renforcé par géosynthétiques apparaît comme la solution la moins coûteuse à hauteur équivalente

Ensuite, cette solution permet de rendre le soutènement accessible techniquement et avec des délais de réalisation très courts. Ainsi, une route effondrée peut-elle être remise en circulation à moindre coût et en quelques semaines, ou un aménagement en remblais peut-il éviter une zone inondable ou l'achat de terrains supplémentaires.[2]

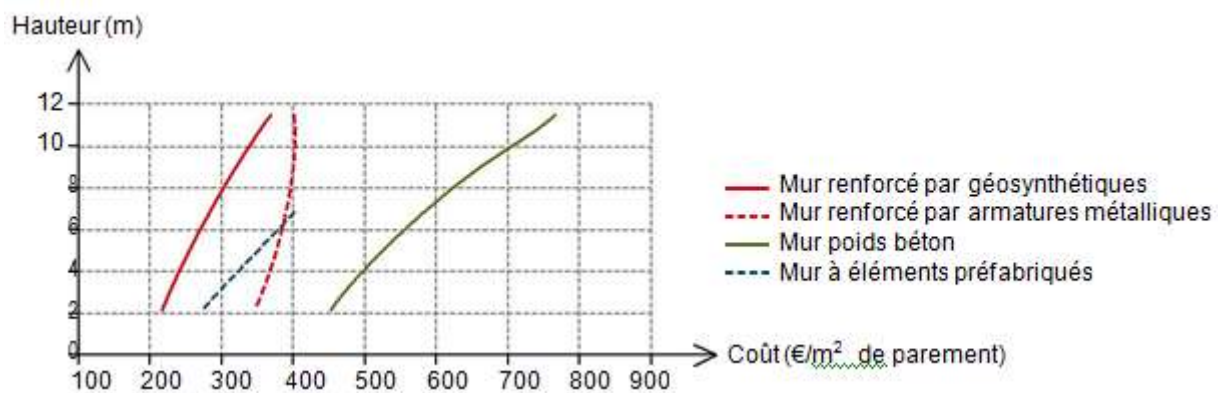


Figure II-37. Étude comparative du coût de construction d'un mur selon sa technique de réalisation

II.7.EXEMPLES D'UTILISATION DES GEOSYNTHETIQUES EN ALGERIE:**II.7.1.Traitement d'un glissement de terrain et reconstruction de la chaussée avec un remblai renforcé par géosynthétiques dans la willaya de Bedjaia :**

Le glissement concerne une route dans une zone montagneuse suite à un événement pluviométrique. Il a emporté le coté aval de la route sur un linéaire de 80 m.



Figure II-38– Vue du glissement.

La solution retenue est celle d'un massif renforcé par géotextiles avec un parement à face enveloppée végétalisables. Le remblai est construit par couches de 0,4 m d'épaisseur compactée à l'optimum Proctor. La confection du parement à " boudins " est réalisée par l'utilisation d'un coffrage simple amovible .[5]



Figure II-39– Construction de l'ouvrage par couches

Figure II-40.montre l'ouvrage achevé.



Figure II-41- Vue de l'ouvrage achevé.

II.7.2. Dispositif d'étanchéité par géosynthétique de la station d'épuration d'Oued Souf :

Le projet est de l'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation de la région de Oued Souf pour le but d'assurer la collecte, le transit, au besoin la rétention de l'ensemble des eaux polluées, pluviales et usées et de procéder à leur traitement avant leurs rejet dans le milieu naturel .[5]

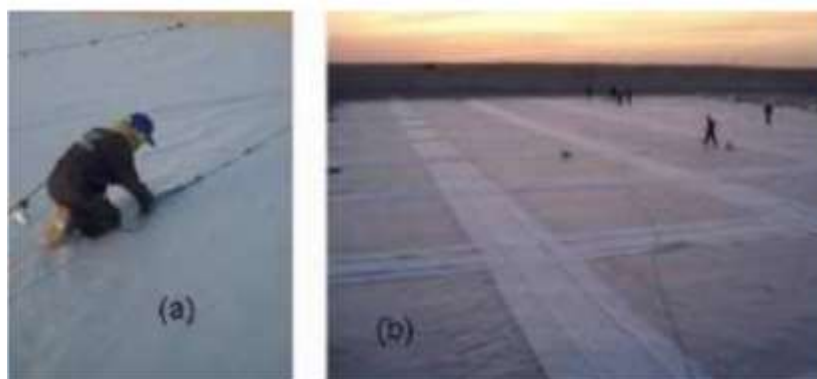


Figure II-42 .(a) Pose du géotextile de protection et (b) drainage par bande.

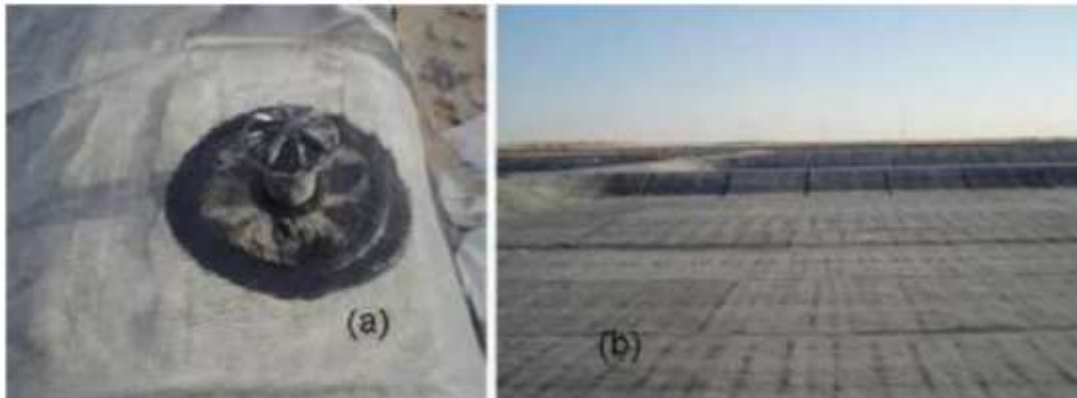


Figure II-43– (a) Event de dégazage et (b) vue des bassins avec géomembrane posée.



Figure II-44 – Lagunes en service.

II.8.MURS EN REMBLAI RENFORCE PAR ELEMENTS GEOSYNTHETIQUES :

Les premiers remblais renforcés par géosynthétiques sont apparus dans les années 1970. Ce domaine d'application, désor-mais normalisé (normes NF P94-270 et XP G38-064), prend toute sa place dans les projets d'infrastructures. En effet, alors que la pression foncière est de plus en plus forte, les emprises des nouveaux aménagements doivent être réduites pour des raisons économiques, voire écologiques.

Les remblais renforcés par géosynthétiques voient leurs applications dans les ouvrages et aménagements suivants :

- merlons de protection contre les éboulements rocheux et les avalanches ;
- merlons anti-bruit ;
- élargissements de voies en zone de fort dénivelé ;
- reprises de voies effondrées ;
- réalisation de remblais de pré-chargement ;
- rampes et culées de pont ;
- digues ;

Ces types de remblais répondent aux exigences des ouvrages d'art (le dimensionnement peut prendre en compte une durée de service allant jusqu'à 100 ans).

Les géosynthétiques utilisés peuvent être des géogrilles, des géotextiles tissés de renforcement ou encore des géocomposites de renforcement.

Le choix des matériaux se fait en fonction des contraintes techniques et économiques du chantier. Les matériaux de remblais ont une importance dans le choix du géosynthétique. Dans le cas de l'utilisation de matériaux de carrière, présentant une granulométrie calibrée, une géogrille ou un géotextile tissé sera suffisant

Néanmoins, dans le cas de la réutilisation de matériaux de déblais, comprenant une fraction fine sensible à l'eau, il sera préférable d'utiliser un géosynthétique ou un géocomposite de renforcement, présentant une composante de drainage permettant de limiter les pressions interstitielles dans le remblai.[5]

Tout type de parement

Un remblai renforcé par géosynthétiques s'associe à une multitude de parements végétalisés, gabions, béton pré-fabriqués ou projetés, pierre sèche ou maçonnée, blocs en béton modulaires, pneus...

Les méthodes d'exécution varient en fonction du type de parement, mais deux grands principes se dégagent :

--soit par le retournement de la nappe géosynthétique au parement à l'aide de coffrage amovible . Cette technique russe permet par exemple de dissocier le remblai de son parement (cas des parements préfabriqués indépendants béton ou de pierres) ;

--soit par l'utilisation des éléments du parement (gabions, panneaux de treillis métalliques pliés, pierres sèches ou maçonnées, blocs béton) en tant que coffrage perdu.

Le géosynthétique peut alors être lié au parement (pincement entre deux gabions par exemple) .

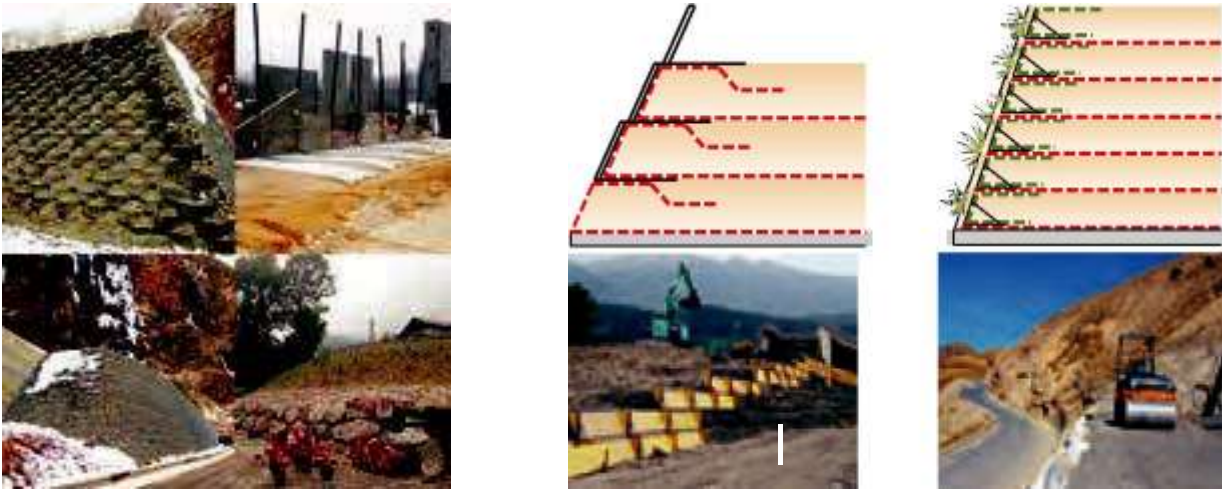


Figure II-46. Principe d'installation avec coffrage amovible

Figure II-45. Différents types de parements possibles (non exhaustif)

Drainage de massifs renforcés

La réalisation de massifs renforcés par géotextiles (ou autres matériaux) nécessite le plus souvent l'utilisation de remblais techniques possédant des caractéristiques spécifiques (angle de frottement, cohésion, etc.). Afin de limiter les entrées d'eau dans ce remblai, car elles peuvent diminuer nettement ses caractéristiques, la mise en œuvre d'un géotextile de drainage en face amont (Fig. 45 et Fig. 46) est souvent préconisée. Le dimensionnement de ce géocomposite dépend de la géométrie du remblai et des arrivées d'eau estimées ou mesurées .[6]

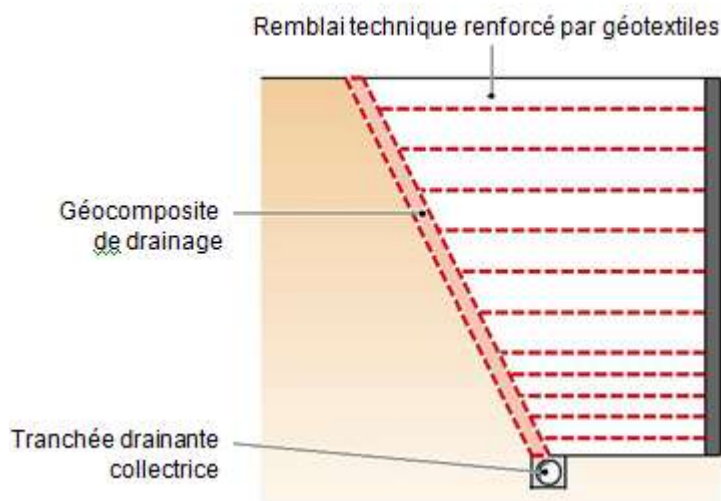


Figure II-47. Profil type de position du géocomposite de drainage en talus renforcé : principe



Figure II-48. Profil type de position du géocomposite de drainage en talus renforcé

II.8.1. Renforcement par géosynthétiques

Principes généraux

Le principe général du renforcement par géosynthétiques est basé sur le frottement entre le sol et le géotextile. Il impose qu'il y ait déformation du géosynthétique afin de concentrer les efforts dans ce dernier.

Les règles de dimensionnement font appel en tout premier lieu à l'Eurocode 7 et à ses normes d'application, comme la NF P94-270. Même si les applications ne font pas encore l'objet de méthodes normalisées en France, des guides et recommandations existent et les dimensionnements peuvent s'appuyer également sur les normes anglaises (BS8006 notamment) et allemandes (EBGEO) applicables.

Généralement le dimensionnement par l'approche des états limites est applicable.

On retiendra le plus souvent les états limites suivants :

- rupture par dépassement de la résistance du géosynthétique ;
- rupture de l'ancrage par glissement du géosynthétique ;
- état limite de service, déformation admissible de l'ouvrage.

Résistance à la traction et coefficient de réduction

Pour les prescriptions des applications de renforcement, la raideur du géotextile (soit le rapport entre la résistance à la traction et la déformation du produit) est une caractéristique qui peut très souvent être suffisante.

Différents facteurs influent sur les caractéristiques mécaniques du géosynthétique. Les calculs doivent prendre en compte les phénomènes sui-vants :

- l'endommagement du géosynthétique dû aux agressions mécaniques lors de la construction ;
- l'évolution physique du matériau sous l'effet du fluage ;
- les dégradations d'origine chimique et/ou biochimique, dues à l'environnement. Des coefficients de réduction ont donc été définis notamment dans la norme NF P94-270 pour chacun de ces phénomènes. Bien que la norme NF P94-270 soit applicable aux remblais renforcés, les coefficients sont généralement repris pour le dimensionnement des autres applications. Par ailleurs, le frottement à l'interface sol-géosynthétique est une caractéristique à connaître pour l'ensemble des dimensionnements de renforcement. Il permet de déterminer par exemple les dimensions des ancrages.

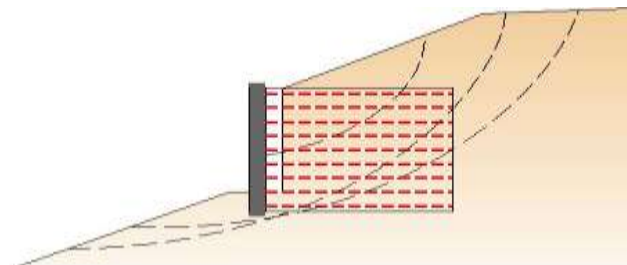
Néanmoins, ces valeurs, liées aux produits et différentes selon les fabricants, ne doivent pas être considérées comme des valeurs de prescription. Ainsi, un CCTP ne devrait pas mentionner une valeur maximale de coefficient de réduction lié à l'endommagement lors de l'installation ou au fluage. Un produit ne peut donc pas être refusé par le maître d'œuvre sur la base de ces critères. Ils servent par exemple à affiner le dimensionnement en phase d'exécution

Remblais renforcés par géosynthétiques

Les remblais par géosynthétiques se dimensionnent en fonction des contraintes suivantes

- topographie du terrain ;
- géométrie du remblai (hauteur, pente...) ;
- coupe géotechnique (caractéristiques mécaniques des matériaux supports du remblai) ;
- poids volumique et angle de frottement des matériaux constituant le remblai renforcé ;
- charge d'exploitation.[6].

Figure II-49. Exemple de surfaces de glissement potentiel



Les éléments en parement sont très généralement négligés dans les calculs de stabilité.

Par ailleurs, les calculs sont le plus souvent réalisés à la rupture .

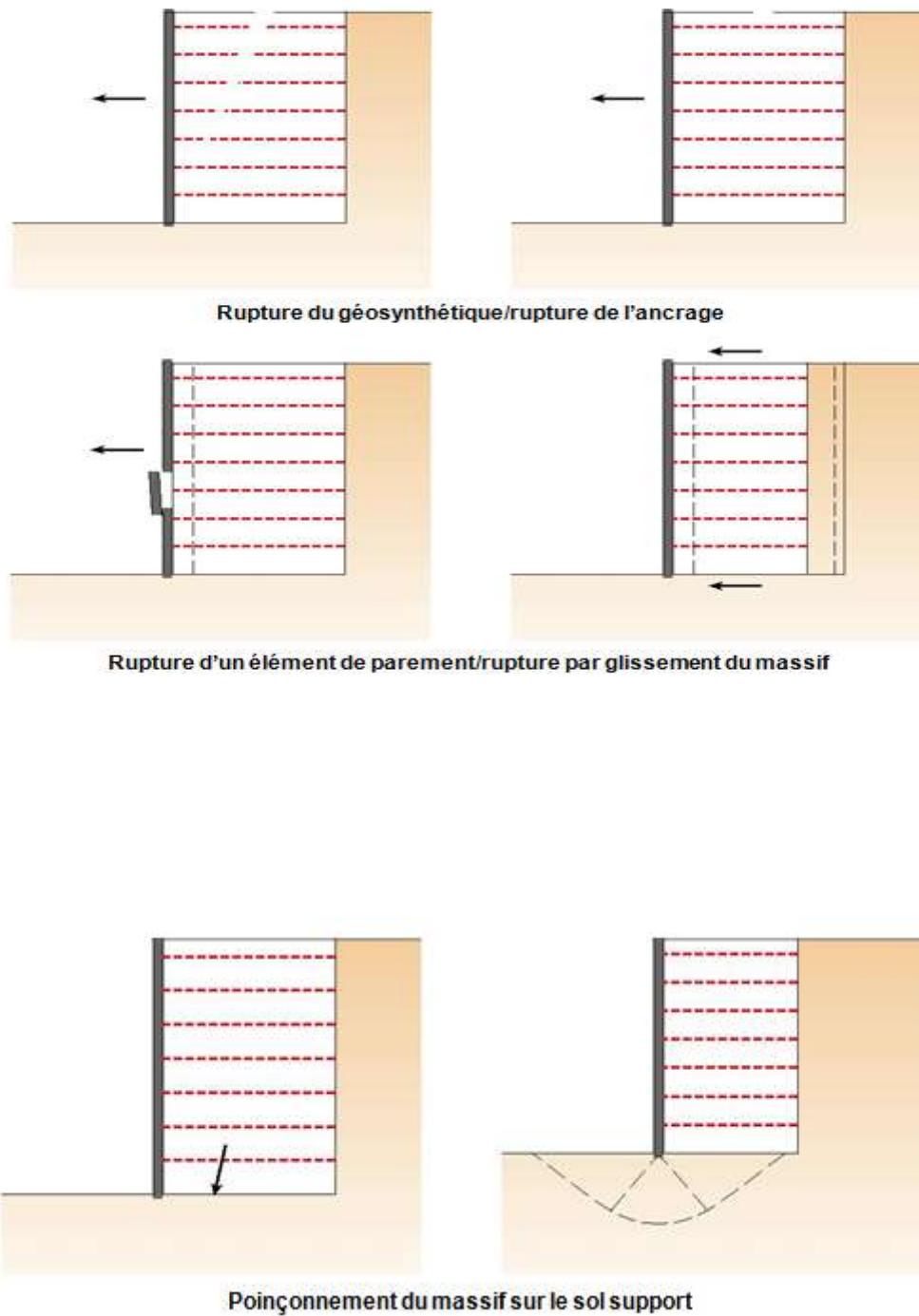


Figure II-50. Autres états limites étudiés

II.8.2.les différentes étapes de l'installation:

- Préparation de la fondation et mise en place du coffrage sur le devant
- Pose du premier niveau des géogrilles sur le devant
- En plusieurs couches de 30 cm, réalisation du niveau renforcé de base

- Compactage méticuleux du premier niveau du sol
- Scellement du premier niveau avec le rabat de la grille vers l'intérieur
- Répétition des opérations 1-5 pour les niveaux suivants ; ensemencement hydraulique en couches épaisses sur tout le parement vertical La figure 51 présente les différentes étapes de réalisation d'un mur en terre armée.[6]

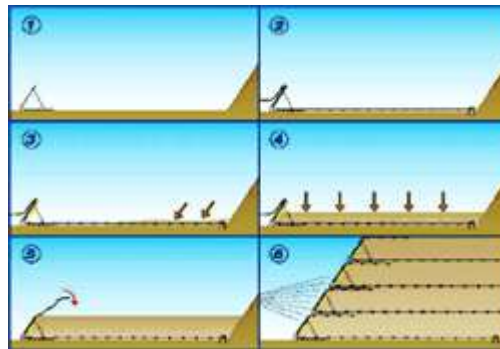


Figure II-51. Les étapes d'installation du mur en terre armée

II.9. principe de dimensionnement des terres armées:

le principe de dimensionnement des massifs de soutènement en sol renforcé, il prend en compte :

Des mécanismes de rupture externe (ouvrage considéré comme un mur-poids) :

- a- glissement du massif sur la base ;
- b- Renversement ;
- c- Poinçonnement.

Des mécanismes de rupture interne au massif en sol renforcé :

- d- Rupture en traction des géosynthétiques ;
- e- Arrachement des géosynthétiques ;
- f- Glissement aux interfaces des géosynthétiques. Des mécanismes de rupture du parement
- g- Rupture du liaisonnement ;
- h- Cisaillement de l'empilement des blocs ;
- i- Flexion du parement

Se rajoute l'analyse de la stabilité globale (glissement général) incluant la zone adjacente à l'ouvrage de soutènement ; cette analyse est généralement conduite en utilisant des méthodes conventionnelles de stabilité des pentes

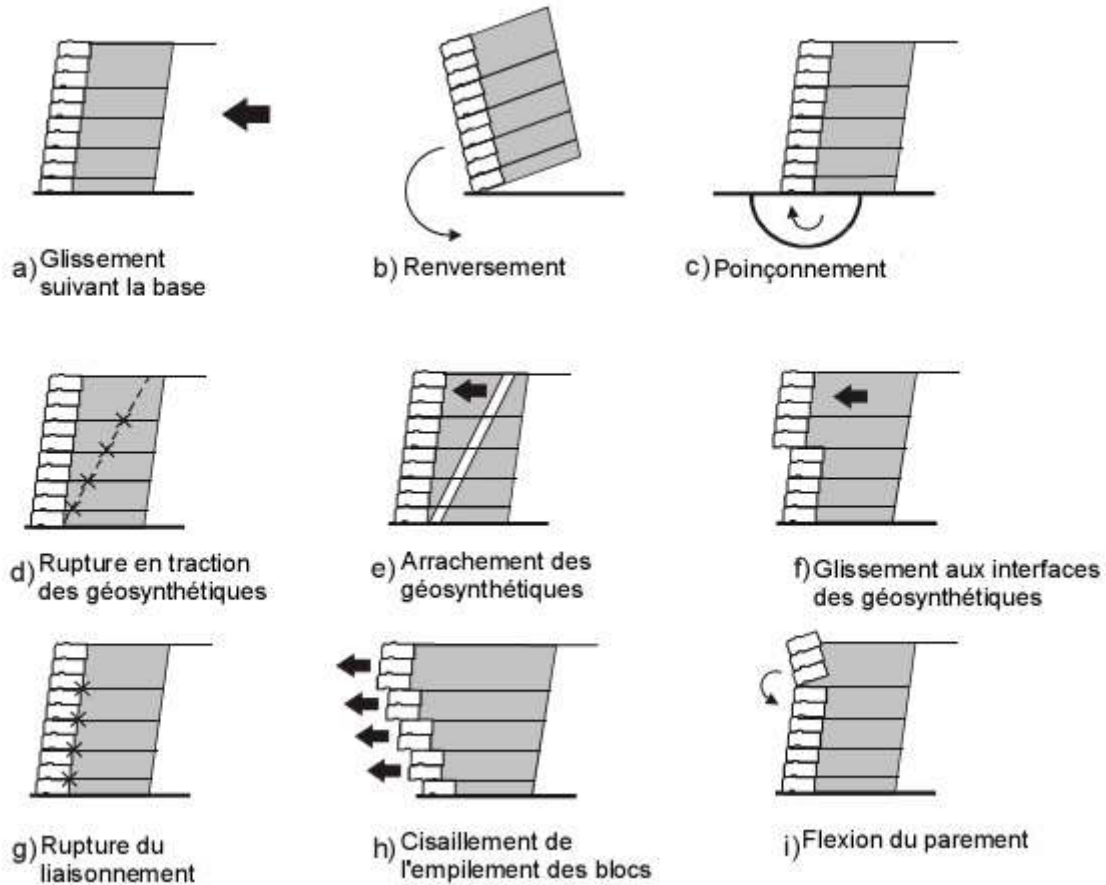


Figure II-52. Dimensionnement à la rupture des massifs en sol renforcé : stabilité externe : a), b), c) ; stabilité interne : d), e), f) ; stabilité du parement : g), h), i).

II-10. CONCLUSION :

La technique géosynthétique pour le renforcement des murs de soutènement constitue une réelle alternative innovante et économique par rapport aux solutions classiques de soutènement. Les principaux avantages de cette technique résident dans la grande souplesse des massifs renforcés par géosynthétiques, l'utilisation des matériaux locaux, et l'intégration des ouvrages leurs environnement.

CHAPITRE III
PRESENTATION DE
L'OUTIL
DE SIMULATION
NUMERIQUE

III-1. Introduction:

Le code PLAXIS bidimensionnel de géotechnique a été développé en premier lieu à l'Université Technique de Delft en 1987 pour analyser initialement les digues en sols mous (argileux). Au cours des années, PLAXIS a été étendu à la plupart des autres domaines de l'ingénierie géotechnique, une société nommée PLAXIS b.v. a été créée en 1993. En 1998, la première version de PLAXIS a été publiée pour Windows, elle peut résoudre des différents problèmes comme les fondations superficielles, les soutènements, les remblais et les excavations. Dans le même temps, un calcul noyau pour la version 3D était en cours d'élaboration. Après plusieurs années de développement, le programme PLAXIS 3D a été publié en 2001. Stratégie Plaxis globale :

- Analyse aux éléments finis des projets géotechniques : déplacements, stabilité, capacité portante, etc.
- Mots-clés : robustesse, convivialité et qualité
- Equilibre entre recherche et pratique
- Développements 2D : logiciel principal + modules pour les calculs avancés Plaxis 3D 2010
- Développements 3D : couvrent l'analyse des modèles géotechniques les plus simples aux plus complexes
- Amélioration permanente des lois de comportement des sols prises en compte (basées sur des paramètres "compréhensibles")

Dans le présent chapitre, nous donnons une description du code de calcul par élément finis PLAXIS3D, qui sera utilisé dans notre étude.

III-2. Méthode des éléments finis:

Les outils de calcul numérique sont utilisés dans le domaine de l'ingénierie depuis des décennies. Un des outils numériques les plus utilisés en ingénierie est la méthode des éléments finis, qui peut être mise en œuvre grâce à l'utilisation de nombreux codes de calcul. Une difficulté apparaît lors de l'utilisation de la méthode des éléments finis, spécialement en géotechnique, lorsque la structure étudiée est en interaction avec un domaine de dimensions infinies. L'usage courant en ingénierie est alors de réaliser les calculs sur des domaines bornés, mais la définition de la frontière de tels domaines bornés pose de sérieux problèmes. La méthode des éléments finis est encore le plus largement utilisée et probablement la méthode la plus polyvalente pour analyser les problèmes de valeur limite dans l'ingénierie géotechnique. Les principaux avantages et inconvénients pour l'analyse géotechnique peuvent être résumés comme suit.

Avantages

- le comportement du matériel non linéaire peut être considéré pour l'ensemble du domaine analysé.
- la modélisation des séquences d'excavation, y compris l'installation de renfort et un soutien structurel systèmes est possible
- les caractéristiques structurelles dans le sol ou la masse rocheuse, comme rapprochées des séries parallèles de joints ou de fissures, peut être efficacement modélisés, par exemple, en appliquant une technique d'homogénéisation approprié.
- le comportement du matériel en fonction du temps peuvent être introduits.
- le système d'équation est symétrique (à l'exception des règles de flux non liés au comportement élasto-plastique des problèmes en utilisant méthodes de rigidité tangente).
- La formulation de déplacement classique peut être utilisée pour la plupart des analyses load path.
- formulations spéciales sont désormais disponibles pour d'autres types de problèmes géotechniques, par exemple, l'analyse d'infiltration, et les solutions liés au théorème de la théorie de la plasticité.
- la méthode a été largement appliquée pour résoudre des problèmes pratiques et donc beaucoup d'expérience est déjà disponibles

Inconvénients

Les inconvénients suivants sont particulièrement prononcés pour les 3-D et les analyses sont moins pertinentes pour les 2-D modèles.

- la totalité du volume du domaine analysé doit être discrétisé, c'est à dire, les grands pré-et post-traitement des efforts sont nécessaires.
- à cause de systèmes d'équations grand temps d'exécution et les exigences de stockage sur disque peut être excessive (selon le la structure générale et les algorithmes mis en œuvre du code aux éléments finis).
- Les algorithmes sophistiqués sont nécessaires pour écrouissage et adoucissement de modèles constitutifs
- la méthode ne convient généralement pas pour les roches fortement articulées ou les sols très fissurés quand ces défauts sont distribués au hasard et à dominer le comportement mécanique.

III-3. Présentation de PLAXIS :

Développement de PLAXIS a commencé en 1987 à l'Université technique de Delft comme une initiative du Département néerlandais des Travaux publics et Gestion de l'eau. L'objectif initial était de développer un outil facile à utiliser, code 2D éléments finis pour l'analyse des digues sur les sols mous de la plaine de la Hollande. Dans les années subséquentes, PLAXIS a été étendu pour couvrir plupart des autres domaines de l'ingénierie géotechnique. En raison de permanence des activités en croissance, une société nommée PLAXIS BV a été créée en 1993. En 1998, la version PLAXIS première pour Windows a été libérée. En ce moment un début a déjà été faite avec le développement d'un 3D programme de calcul. Buts et objectifs principaux: PLAXIS est destiné à fournir un outil d'analyse pratique pour une utilisation par les ingénieurs en géotechnique qui ne sont pas nécessairement des spécialistes numérique. C'est souvent le cas que les ingénieurs considèrent pratiques nonlinéaire des calculs par éléments finis et la lourdeur trop de temps pour des analyses régulières. La recherche et PLAXIS équipe de développement a abordé cette question en concevant procédures de calcul robustes et théoriquement solide, qui sont encapsulés dans une enveloppe logique et facile à utiliser. En conséquence, de nombreux ingénieurs géotechniques dans le monde entier utilisent le code dans des applications pratiques

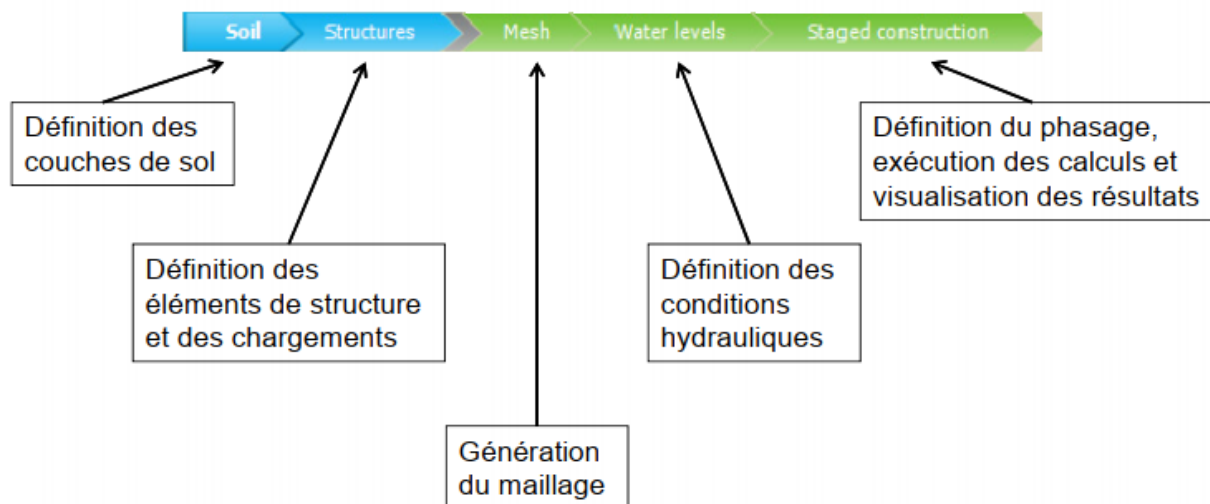


Figure III-1. Présentation Plaxis 3D

Le programme PLAXIS 3D Tunnel est un but spécial en trois dimensions par éléments finis programme d'ordinateur utilisé pour effectuer des analyses de déformation et de stabilité pour différents types des tunnels dans le sol et la roche. Le programme utilise une interface utilisateur graphique pratique qui permet aux utilisateurs de générer rapidement un véritable trois dimensions maillage d'éléments finis basés sur une répétitive géométrique section.

Le programme a des fonctions spéciales pour NATM et Bouclier tunnels, mais il peut également être utilisé pour d'autres types de structures géotechniques. Utilisateurs a besoin d'être familier avec l'environnement Windows, et devrait de préférence (mais pas nécessairement) avoir une certaine expérience avec la norme PLAXIS (2D) la déformation programme. Pour obtenir une connaissance rapide de travail des principales caractéristiques du tunnel 3D programme,

III-3-2. Modèles de comportement utilisés dans le PLAXIS :

PLAXIS est doté des modèles de comportement de sols depuis le modèle de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique et parmi lesquels on cite:

- Modèle élastique linéaire.
- Modèle de Mohr-Coulomb(MC).
- Modèle de sol avec écrouissage (HardeningSoilModel-HSM).
- Modèle pour les roches fracturées (jointed rockmodel).
- Modèle pour sols mous (SoftSoilModel-SSM). -Modèle pour sols mous avec effet du temps (Soft Creep Model-SSCM).[20]

III-3-2-1 .Modèle élastique linéaire :

Le modèle élastique utilisé dans Plaxis est classique, il représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Il comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module de Young E , et le coefficient de Poisson ν . Ce modèle est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol.

Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol (par exemple le cas du parement en bloc en béton). [17] Le modèle élastique linéaire utilisé dans PLAXIS est classique.

Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement G et le coefficient de Poisson ν . L'avantage de G est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ($G_u = G$), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si G est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser K comme second paramètre. D'une part K_u est infini (correspondant à $\nu_u = 0,5$) et il est moins courant d'emploi. G est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques.

La relation entre le module d'Young E et les autres modules sont données par les équations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1+\nu)} \quad E_{oed} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Le modèle élastique linéaire de PLAXIS peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures en béton ou métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches.

III-3-2-2. Modèle de mohr-coulomb:

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Il comporte six paramètres : le module de Young, le coefficient de Poisson, la cohésion, l'angle de frottement, l'angle de dilatance, et le facteur de réduction de l'interaction.

- Le module de Young

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au G_{max} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des 45 essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module « moyen », par exemple celui correspondant à un niveau de 50% du déviateur de rupture

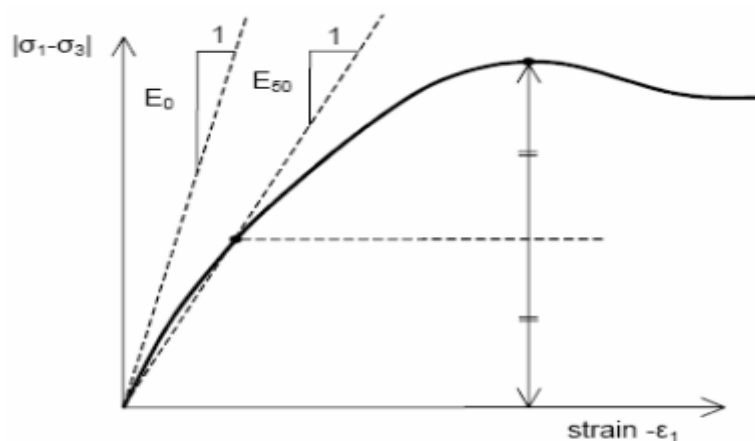


Figure III-2. Définition du module à 50% de la rupture

L'utilisateur doit rester conscient de l'importance du choix du module qu'il prendra en compte. Il n'y a là rien d'étonnant et la même question se retrouve par exemple dans tout calcul classique de fondation, par exemple. Dans les boîtes de dialogues, on peut aussi rentrer un gradient donnant la variation du module avec la profondeur.

- Le coefficient de poisson

Il est conseillé d'utiliser une valeur de 0.2 à 0.4 pour le coefficient de poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure k0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0.5 sans cette valeur soit utilisable.

- La cohésion

La cohésion a la dimension d'une contrainte. PLAXIS peut manipuler des sables sans cohésion ($c = 0$), mais certaines options ne fonctionneront pas bien. Pour éviter les complications, il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible (prendre $c > 0.2$ kPa). PLAXIS propose une option spéciale pour les couches dans lesquelles la cohésion croît avec la profondeur (voir Paramètres avancés).

- L'angle de frottement

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement « de pic » soit l'angle de frottement de palier. O attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 45° peuvent considérablement allonger les temps de calculs. Il peut être avisé de commencer des calculs avec les valeurs raisonnables d'angle de frottement φ (à volume constant, aupalier).

- Angle de dilatance

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté Ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\Psi = \varphi - 30^\circ \text{ pour } \varphi > 30^\circ.$$

$$\Psi = 0^\circ \text{ pour } \varphi < 30^\circ.$$

Le cas où $\Psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur $\Psi = 0^\circ$ correspond à un matériau Élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes.

-Le facteur de réduction de l'interaction (Rinter) :

L'interaction entre sol et structure est dite rigide si le sol a les mêmes propriétés de la structure et il est non rigide pour le cas différent. On parle ici du facteur réducteur de l'interaction sol-structure noté Rinter. Il peut être donné par les deux formules suivantes

$$C_{inter} = R_{inter} \times C_{sol}$$

$$\tan(\varphi)_{inter} = R_{inter} \times \tan(\varphi)_{sol}$$

Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données. Le modèle à critère de rupture de Mohr-Coulomb, est le plus couramment utilisé en mécanique des sols.

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élastique-parfaitement plastique (sans écrouissage).

Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$$

où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau (figure 5.2).

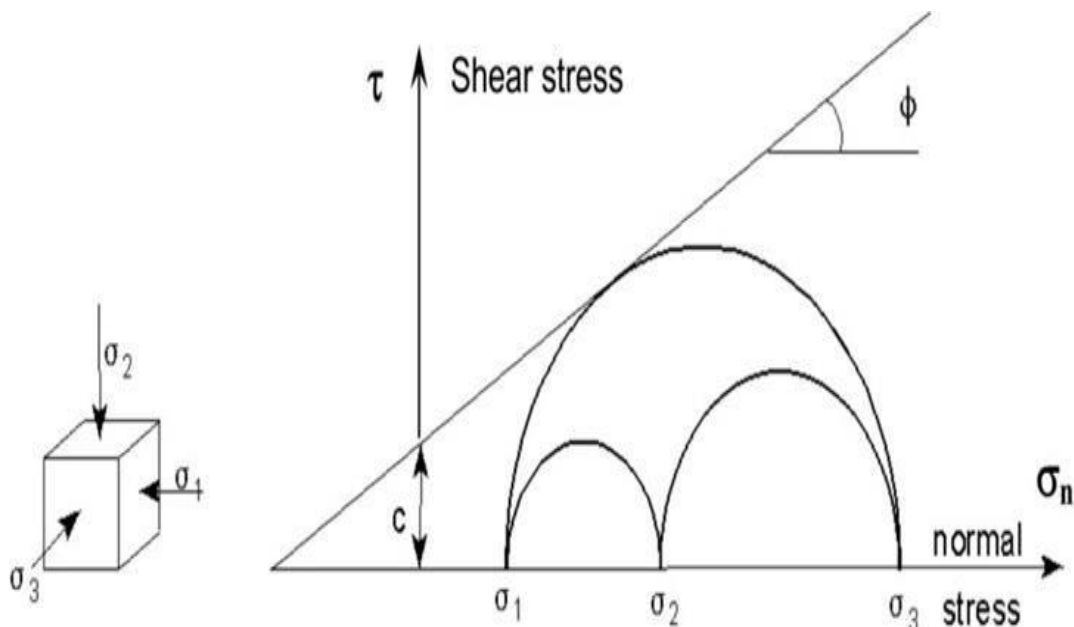


Figure III-3. Cercles de contrainte à la rupture ; l'un d'entre eux touche l'enveloppe de Coulomb.

Afin de comprendre la signification des cinq paramètres fondamentaux du modèle, considérons des courbes contraintes-déformations classiques comme celles obtenues à partir d’essais triaxiaux drainés

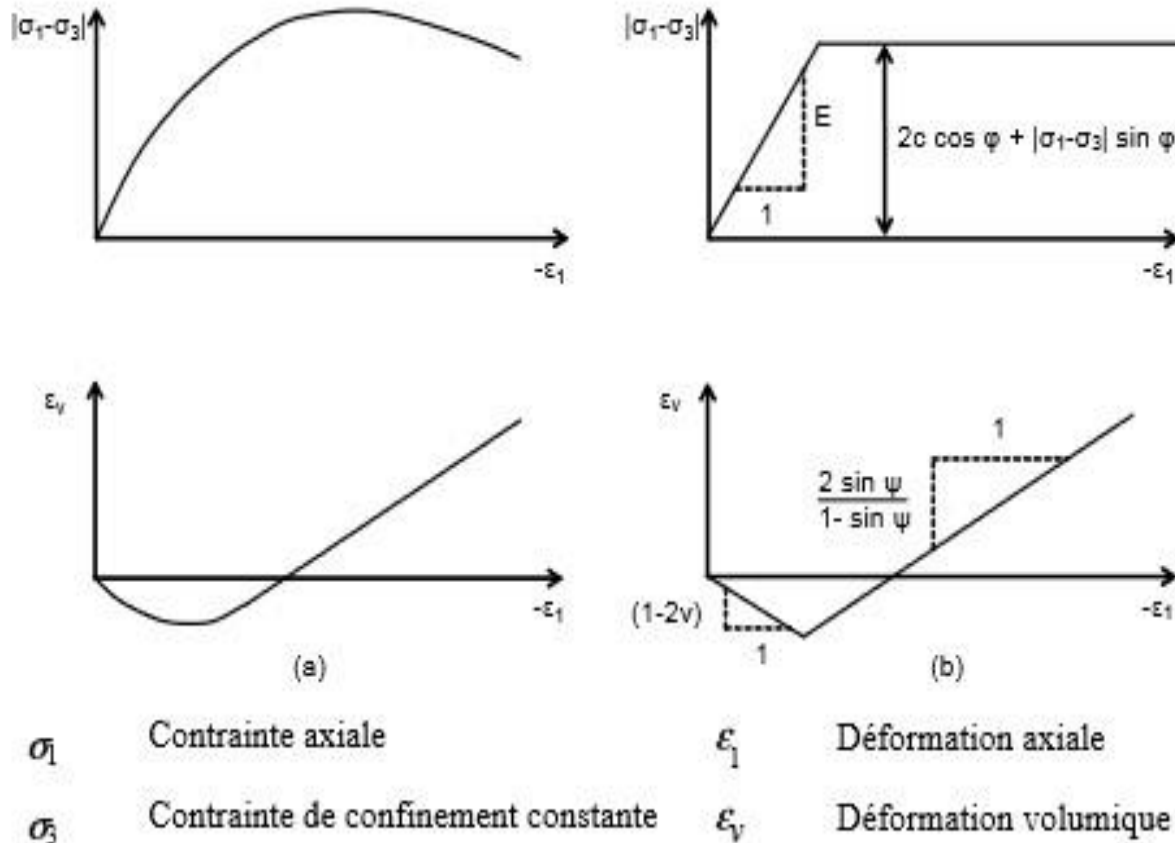


Figure III-4. des courbes contraintes-déformations classiques

Type d’élément fini utilisée par Plaxis 3D tunnel

Ce le code de calcul utilisé plusieurs type d’élément fini 1D,2Det 3D chaque type d’élément a une formulation différente dans cette paragraphe on va cité quelque type d’élément fini fréquemment utilisé par le code de calcul plaxis 3D tunnel

- **L’élément ligne de trois nœuds**

Un élément de la ligne 3-nœud est donné, qui est compatible avec le côté d'un triangle 6-nœud ou un quadrilatère à 8 nœuds ou d'un élément de volume de 15 nœuds dans les le programme PLAXIS 3D Tunnel, car ces éléments ont aussi trois noeuds à un côté. Les fonctions de forme N_i ont la propriété que la valeur de la fonction est égal à 1 au nœud i et 0 sur les autres nœuds. Pour les éléments de la ligne à 3 nœuds, où les nœuds 1, 2 et 3 sont Situé à $\xi = -1, 0$ et 1 , respectivement,

les fonctions de forme sont donnés par:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= -\frac{1}{2}(1-\xi)\xi \\
 N_2 &= (1+\xi)(1-\xi) \\
 N_3 &= \frac{1}{2}(1+\xi)\xi
 \end{aligned}$$

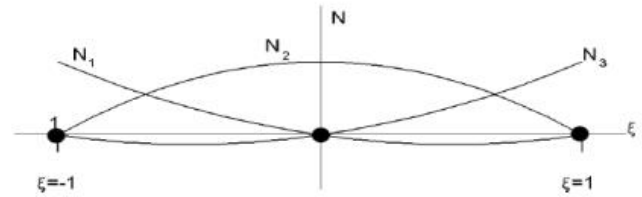


Figure III-5. Les fonctions de forme pour l’élément ligne de trois nœuds

- L’élément triangulaire de 6 nœuds

Les triangles à 6 nœuds sont créés dans le processus de génération de maillage 2D et ils sont utilisés dans les plans verticaux du modèle 3D pour former les visages des éléments de coin de 15 nœuds pour les sols. Les triangles à 6 nœuds sont également la base de z-charges sur les clusters dans le modèle 3D. Pour les éléments triangulaires il ya deux coordonnées locales (ξ et η). En outre, nous utilisons une auxiliaires de coordonner $\zeta = 1-\xi-\eta$. 6-nœud éléments triangulaires fournir un second ordre interpolation des déplacements. Les fonctions de forme peuvent être écrites comme

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \zeta(2\zeta-1) \\
 N_2 &= \xi(2\xi-1) \\
 N_3 &= \eta(2\eta-1) \\
 N_4 &= 4\zeta\xi \\
 N_5 &= 4\xi\eta \\
 N_6 &= 4\eta\zeta
 \end{aligned}$$

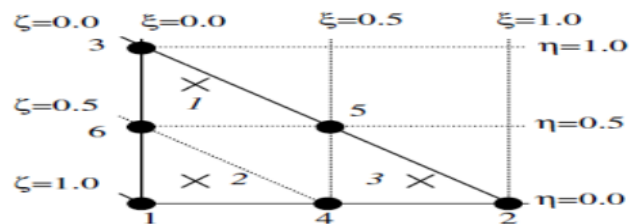


Figure III-6. L’élément triangulaire de trois nœuds

- L’élément quadrilatère de 8 nœuds

Les éléments 8-Mode quadrilatère sont créés dans le processus d’extension et de maillage 3D ils sont utilisés sur les faces des éléments de coin de 15 nœuds dans la direction z. ces éléments sont la base de charges réparties sur les tranches dans le modèle 3D et pour les éléments structuraux (plaques et les géogrilles) et des éléments d’interface. Éléments de la ligne à huit nœuds de fournir une seconde interpolation d’ordre des déplacements. Quadrilatère éléments ont deux coordonnées locales (ξ et η).

Les fonctions de forme des éléments à 8 nœuds peuvent être écrites comme suit :

$$N_1 = (1-\xi)(1-\eta)(-1-\xi-\eta)/4$$

$$N_2 = (1+\xi)(1-\eta)(-1+\xi-\eta)/4$$

$$N_3 = (1+\xi)(1+\eta)(-1+\xi+\eta)/4$$

$$N_4 = (1-\xi)(1+\eta)(-1-\xi+\eta)/4$$

$$N_5 = (1-\xi)(1+\xi)(1-\eta)/2$$

$$N_6 = (1-\xi)(1+\xi)(1+\eta)/2$$

$$N_7 = (1-\eta)(1+\eta)(1+\xi)/2$$

$$N_8 = (1-\eta)(1+\eta)(1-\xi)/2$$

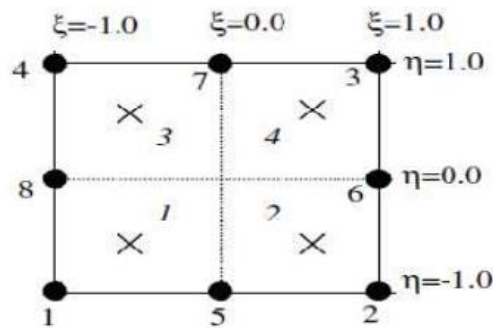


Figure III-7: Les fonctions de formes L'élément quadrilatère de 8 nœuds.

- **Élément volumique de 15 nœuds**

Les éléments de coin à 15 nœuds sont créés dans la procédure d'extension maillage 3D. Ce type des éléments fournissent une interpolation de second ordre des déplacements. Pour les éléments de coin il ya trois coordonnées locales (ξ , η et ζ). La forme de ces fonctions nœud 15 éléments de volume peut être écrit

$$\begin{aligned}
 N_{11} &= \xi (1-\zeta) (1+\zeta) \\
 N_{12} &= \eta (1-\zeta) (1+\zeta) \\
 N_{13} &= (1-\xi-\eta) \xi (1+\zeta) * 2 \\
 N_{14} &= \xi \eta (1+\zeta) * 2 \\
 N_{15} &= \eta (1-\xi-\eta) (1+\zeta) * 2
 \end{aligned}$$

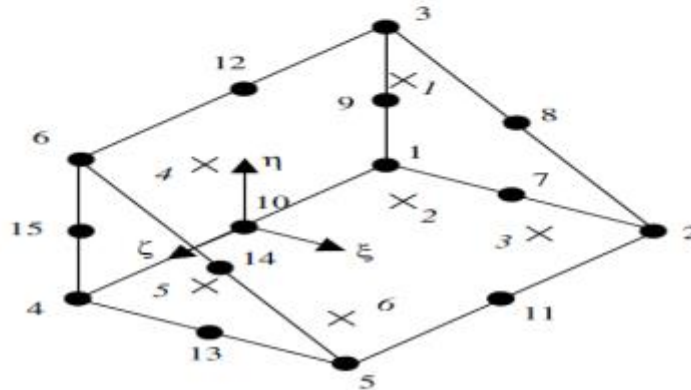


Figure III-8: Les fonctions de forme de l'élément volumique de 15 nœuds

III-4.Conclusion:

Ce rapide tour des différents types de modèle de comportement utilisée dans plaxis montre qu'il s'agit de modèle suffisamment simple pour qu'il soit possible d'en déterminer les paramètres avec une étude géotechnique classique ou avec des corrélations. Il n ya dans ces modèle aucun paramètre de calage ou sans signification physique comme on en rencontre dans les modèle avancé. Souvent la détermination des paramètres nécessite des techniques d'optimisation. Ces modèles appartiennent au domaine de roche Le code de calcul Plaxis utilise des éléments fini ligne et de surface de sorte que quelle soit compatible avec des éléments volumique quadrilatère à 15 nœuds lorsque on génère le maillage 3D dans l'axe Z ce qui permet à donnée résultats très approché est plus convergente à la solution exacte. A cause de toutes ces avantage nous adoptons ce code de calcule pour la modélisation des projets réel avec la prise en compte de phasage de construction dans tous ce qui suit.

CHAPITRE IV:
ETUDE D'UN CAS

IV-1.Introduction :

Dans toute étude géotechnique, la modélisation est une étape décisive qui conditionne la qualité des analyses de diagnostic ou de prévision du comportement des sols et des ouvrages. Un modèle n'est pas seulement une série d'équations représentant le comportement physique ou mécanique du sol, c'est aussi une représentation géométrique de l'espace, qui délimite les couches ou volumes occupés par chaque matériau

Dans ce chapitre nous allons utiliser le code Plaxis 3d et présenter les plus importants résultats obtenus à partir d'une simulation numérique par éléments finis d'un mur de soutènement 3d renforcé par géogrilles (le modèle établi par Guler et al (2007).

Une étude paramétrique basée sur les paramètres de référence a été faite pour étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement des murs en sol renforcé. Cette analyse concerne l'effet de l'espacement et la longueur des éléments de renforcement, l'angle de frottement du remblai et l'existence des nappes secondaires sur les déplacements horizontaux du parement et le facteur de sécurité.

IV-2.Simulation numérique :**IV-2.1 Présentation du modèle numérique :**

Le modèle a une hauteur de 6 m et une longueur de 25m. Le fond et les limites latérales du modèle ont été placés loin de la zone d'intérêt (zone renforcée) afin d'éviter les effets de bord et isotrope.

Le modèle est composé de deux couches :

Couche 1(couche de fondation) ayant une hauteur de 5m.

Couche 2 (couche de remblai) ayant une hauteur de 6m.

Les blocs des parements ont une section 0.25x0,5m

La position de la nappe phréatique est considérée profonde et n'a aucun effet sur l'ouvrage.

Concernant les conditions aux limites, les déplacements à la base du modèle sont bloqués dans les deux directions horizontale et verticale, alors que seuls les déplacements horizontaux sont bloqués sur les bords latéraux.

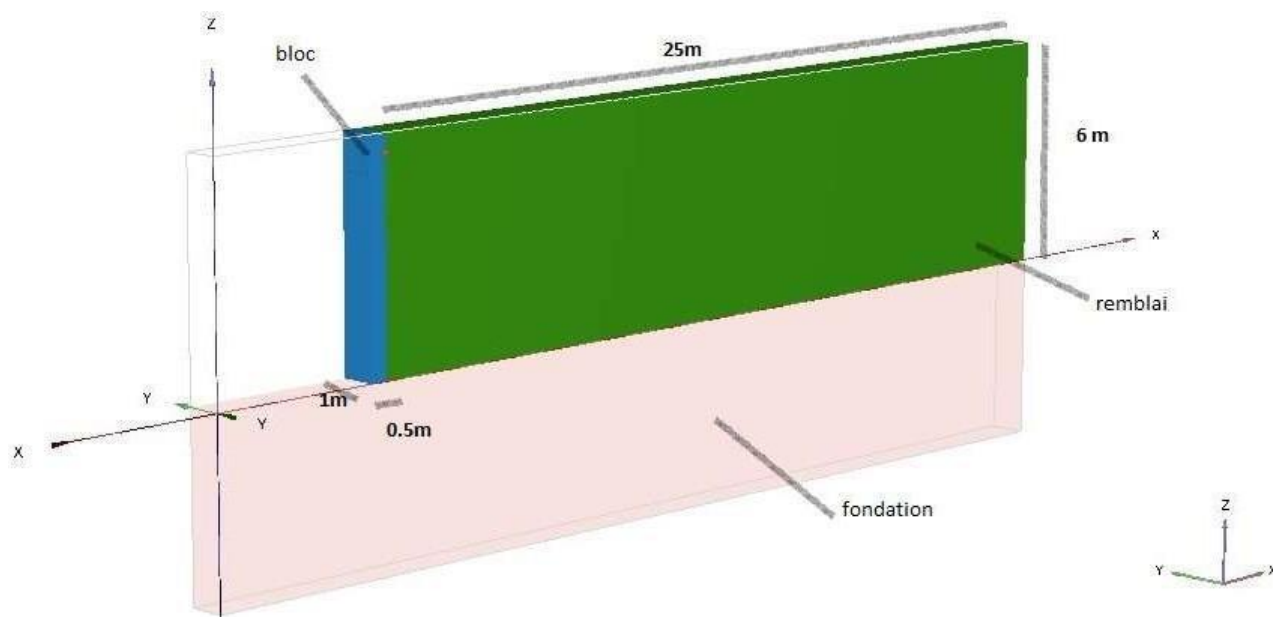


Figure IV.1. Géométrie de l'ouvrage de soutènement en sol renforcé

IV-2.2 Données et paramètres de l'étude :

Les blocs modulaires ont été modélisés comme des matériaux homogènes en utilisant un modèle de comportement élastoplastiques de Mohr-Coulomb. La géogrille a été modélisé en utilisant des éléments élastiques. Les géogrilles ont été insérés horizontalement dans les blocs modulaires pour représenter le raccordement .

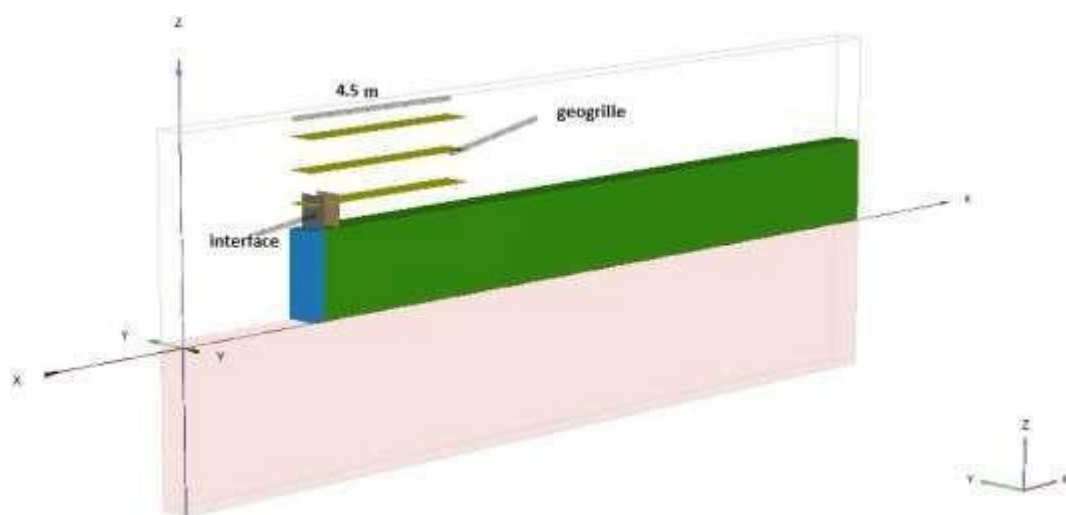


Figure IV.2. Blocs modulaires et connexion géogrille

-Caractéristiques des matériaux :

Le modèle est constitué de deux sols différents remblai renforcé et Le sol de fondation.

. Les deux types de sol sont modélisés avec un modèle de comportement linéaire élastique parfaitement plastique (modèle de Mohr- Coulomb). Ce modèle de comportement est caractérisé par cinq paramètres : Les paramètres élastiques (E : module d'Young, ν : le coefficient de Poisson) et les paramètres plastiques (angle de frottement, c : la cohésion et Ψ : angle de dilatance).

Tableau IV.1. Propriétés géomécaniques du sol

a) Le sol :

	Remblai	Sol de fondation
Modèle de comportement	Mohr coulomb	Mohr coulomb
Angle de frottement φ (degrés)	30	35
Cohésion, c (kPa)	1	200
Angle de dilatance, Ψ(degrés)	10	5
Poids spécifique γ (kN/m³)	19	20
Module de rigidité E (kPa)	20000	500000
Coefficient de Poisson ν	0,3	0.2

b) Les géogrilles de renforcement :

Les géogrilles sont modélisées en utilisant des éléments structurels appelés « geogrid » dans le logiciel plaxis. Ces éléments ont une seule propriété nécessaire, c'est la rigidité axiale EA. Les caractéristiques sont données dans le tableau 4.2

Tableau IV.2. Propriétés du géogrille

Modèle de comportement	Élastique
Rigidité axiale élastique (kN/m)	1000

c) Les blocs modulaires :

Les éléments constitutifs du parement ont un comportement élastoplastiques de MohrCoulomb. Ce modèle est caractérisé par les paramètres représentés dans le tableau 4.3 suivant.

Tableau IV.3. Propriétés du bloc modulaire.

Modèle de comportement	Élastique linéaire
Poids spécifique γ (kN/m³)	20
Module de rigidité E (kPa)	1000000
Coefficient de Poisson ν	0,2

d) Les Interfaces :

Le paramètre de réduction de résistance mécanique appliqué de part et d'autre de l'interface est : $R_{inter} = 0,7$ pour les interfaces entre le sol et les blocs.

IV-3. Processus de construction et Méthodologie de Modélisation :

La construction du mur a été modélisée par la procédure « staged construction », où des couches de sols d'épaisseur 25 cm ont été placés au fur et à mesure jusqu'à ce que la hauteur totale du mur est atteinte

Le modèle numérique est mis à jour sans interruption en ajoutant le sol et les nappes de géogrilles par étapes, ce qui représente l'ordre de construction des murs réels. La première nappe de renforcement est toujours installée à l'altitude 0.5 m sur la deuxième couche de sol et le deuxième bloc. En suite, des nappes de géogrille sont installées selon l'espacement de renforcement. Par exemple, l'ordre de modélisation d'un mur avec un espacement de renforcement égal à 0.5 m comprend les étapes suivantes .

- Étape 1 : Modèle de base (l'équilibre sous son poids propre est réalisé ; le module élastique du sol est mis à jour).
- Étape 2 : Installation d'un bloc modulaire dans la première couche
- Étape 3 : Mise en place d'une couche de remblai.
- Étape 4 : Installation de la première nappe de géogrille.
- Étape 5 : Installation d'un bloc modulaire pour la deuxième couche.
- Étape 6 : Mise en place d'une couche de remblai
- Étape 7 : Mise en place d'une nappe de géogrille.

Ces étapes seront répétées plusieurs fois jusqu'à ce que la hauteur du mur soit atteinte.

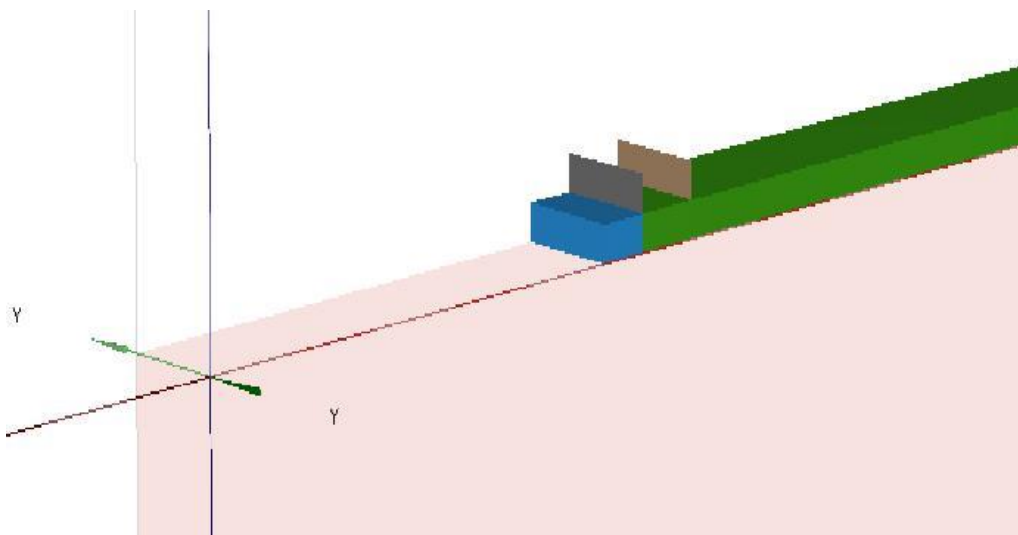


Figure IV3.. Figure 4-4.. Blocs modulaires et connexion géogrille . Étape 1 : Installation des blocs modulaires.

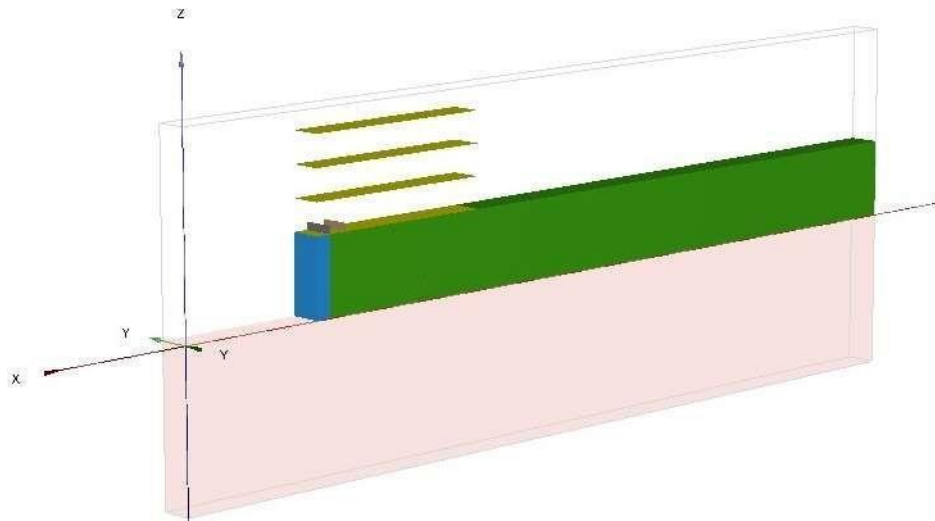


Figure IV -4. Étape 2 : Mise en place d'une couche de remblai et Installation de la première nappe de géogridle.

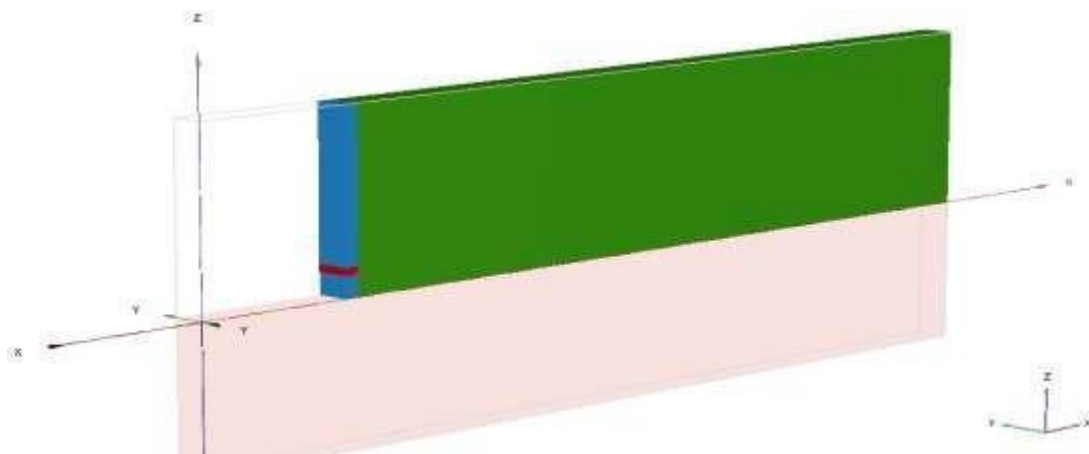


Figure IV .5. Étape 3 : étape - intermédiaire

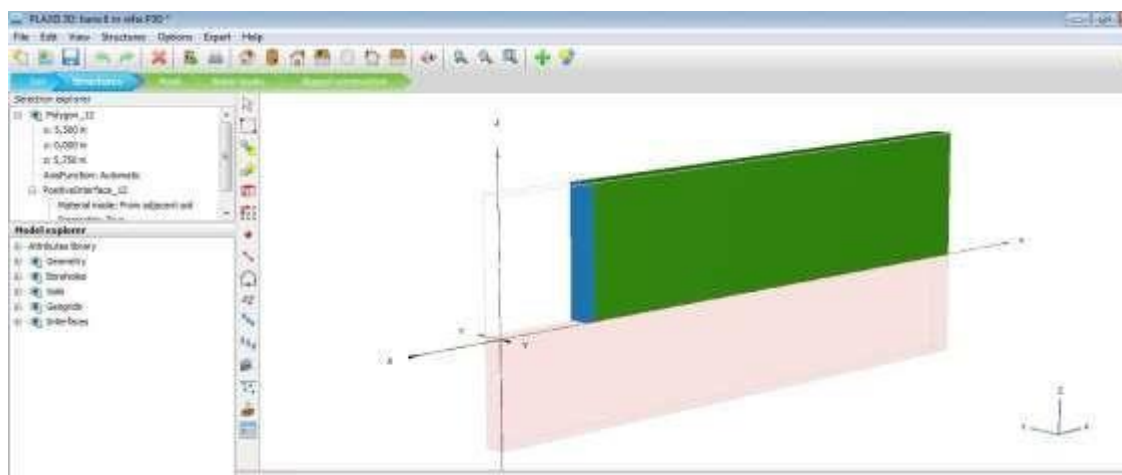


Figure IV. 6.étape –finale

Les résultats de l'analyse par éléments finis ont été évalués de deux façons : Une première phase appelée phase de construction par étapes qui peut être considéré comme l'état de service (condition de travail). Une deuxième phase appelée la phase de « φ/c réduction » qui peut être considérée comme la condition de rupture.

IV-4. Génération du maillage:

Tributaire des contraintes imposées par le modèle réel, le maillage doit respecter certaines règles essentielles relatives à la géométrie de la structure et à la mécanique des matériaux présents (hétérogénéité des matériaux,). L'optimisation du maillage doit être le fruit d'un compromis entre la capacité de calcul disponible et l'erreur acceptable sur les résultats numériques.

Pour les conditions aux limites, on a utilisé un bloc standard, les déplacements horizontaux et verticaux sont bloqués à la base du modèle et seuls les déplacements horizontaux sont bloqués sur les côtés latéraux.

La discrétisation du modèle dans notre étude a été faite par des éléments triangulaires à 15 nœuds . Le maillage est constitué en totalité de 3364 éléments triangles, 7621 nœuds.

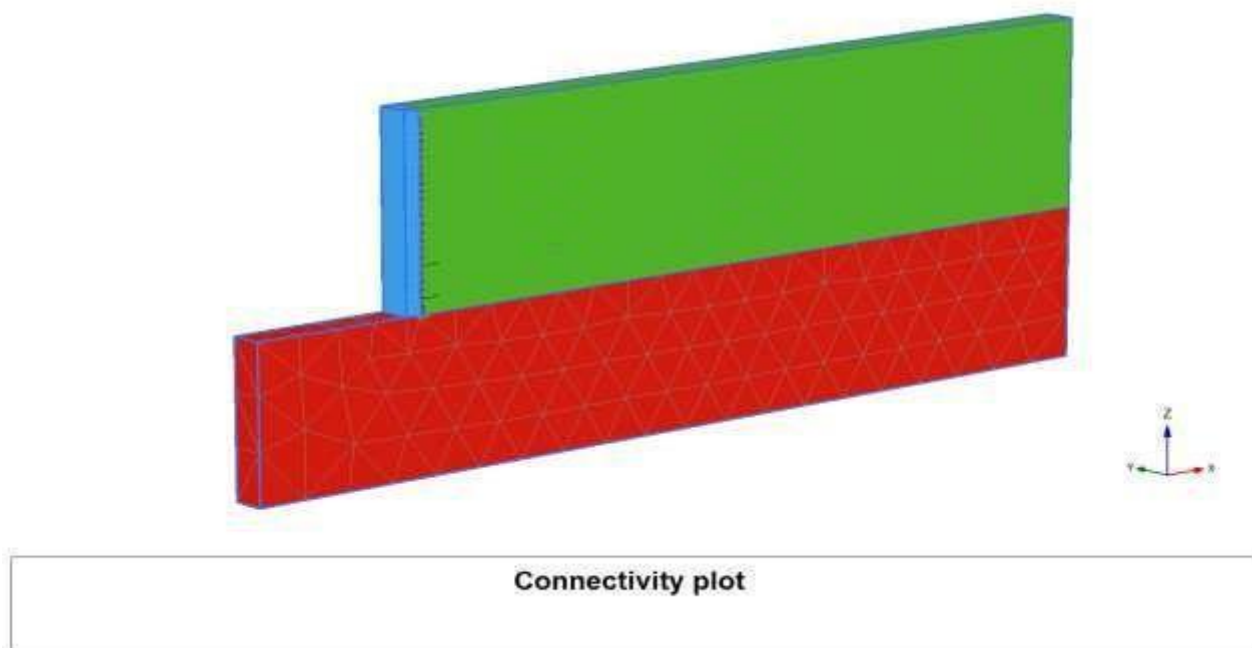


Figure IV. 7. Profil représentatif du modèle numérique(Le maillage.)

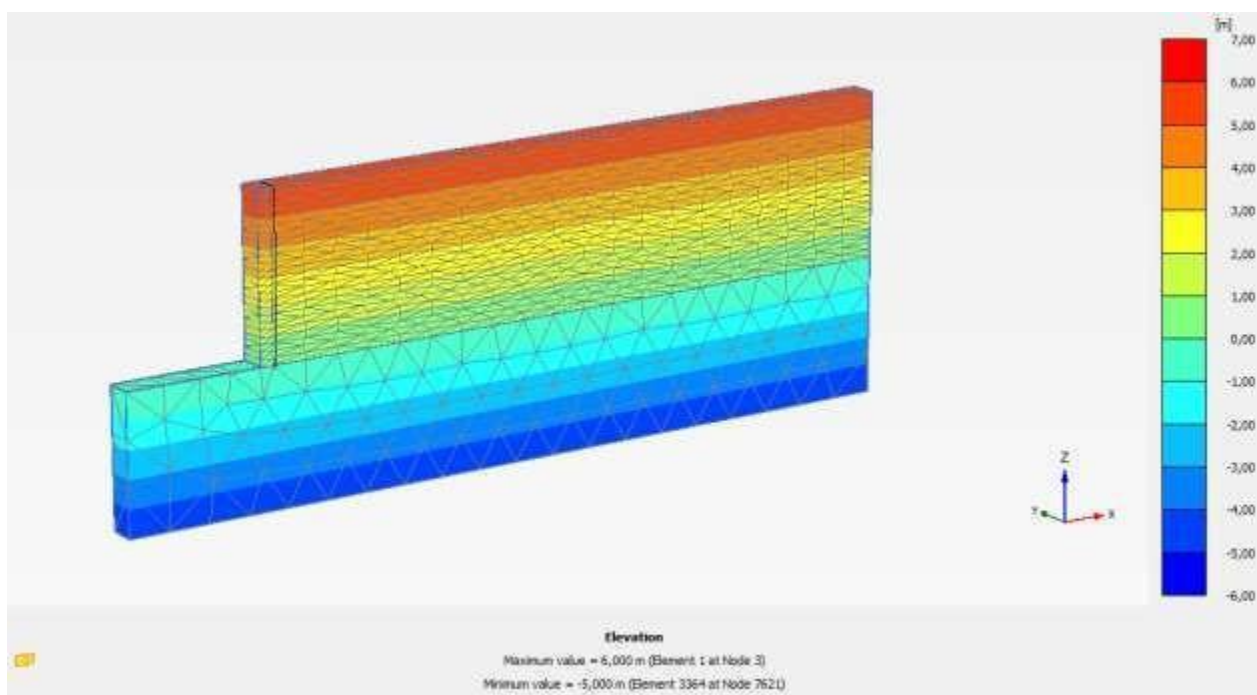


Figure IV.8. Elevation

IV.5. Les résultats :

Les principaux résultats d'un calcul d'éléments finis sont les maillages déformés, les déplacements, les contraintes et les mécanismes de rupture. On présente ci-dessous quelques résultats pour un mur

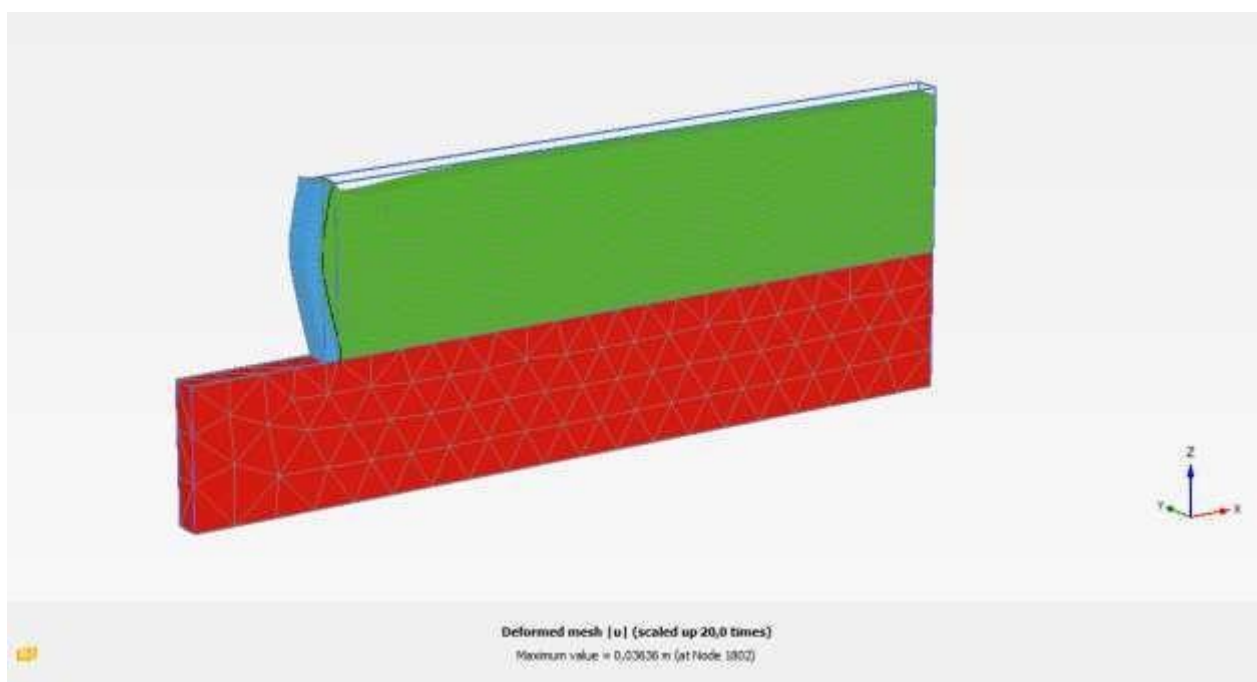


Figure IV.9. deformation mesh

- Les déplacements du mur

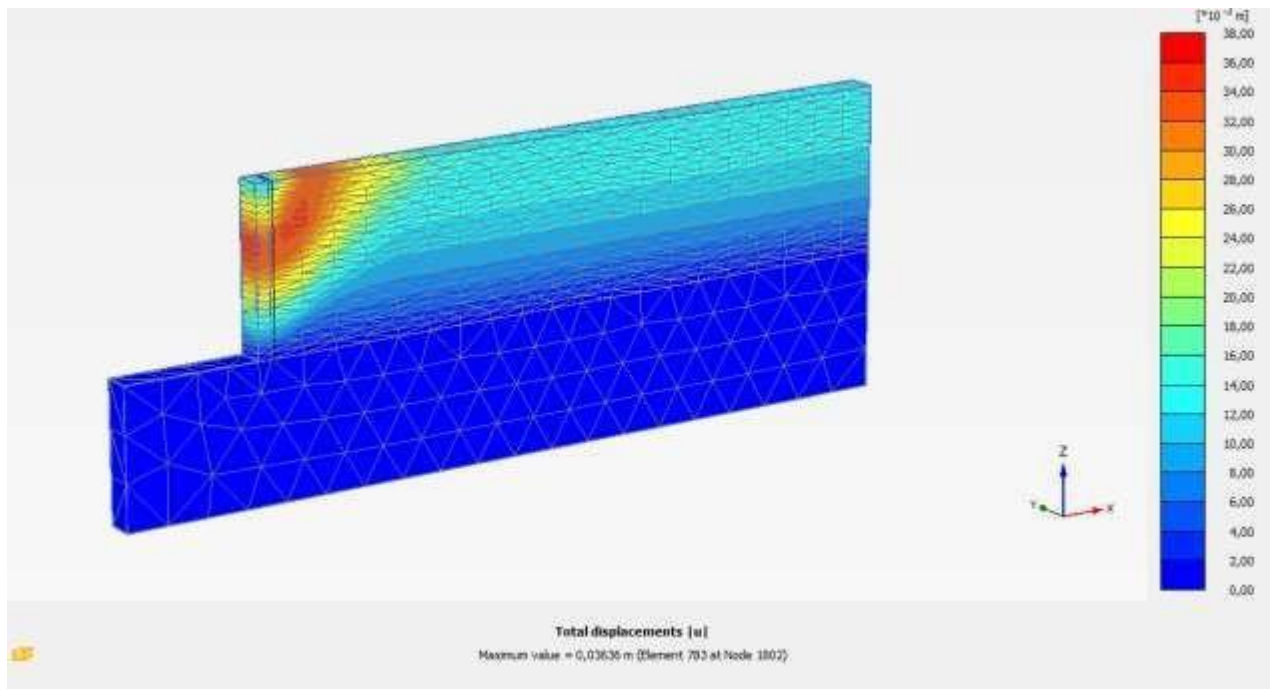


Figure IV.10. Total Déplacements

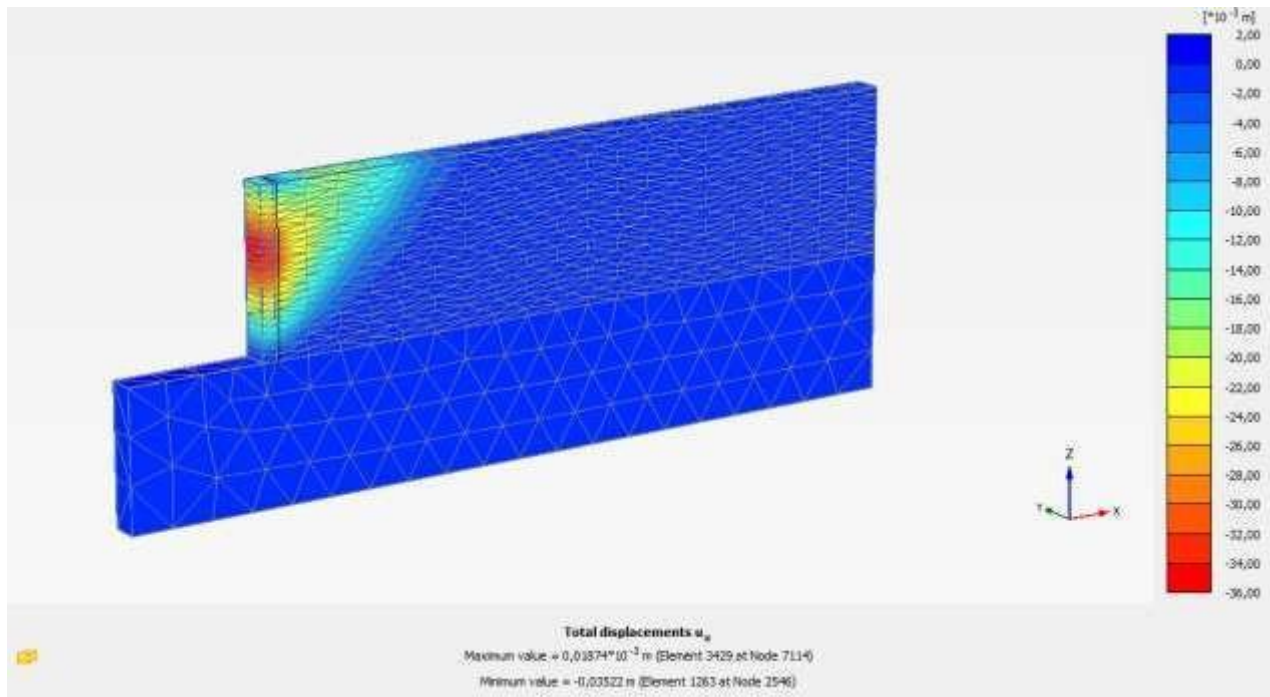


Figure IV.11. Déplacements dans le sans X

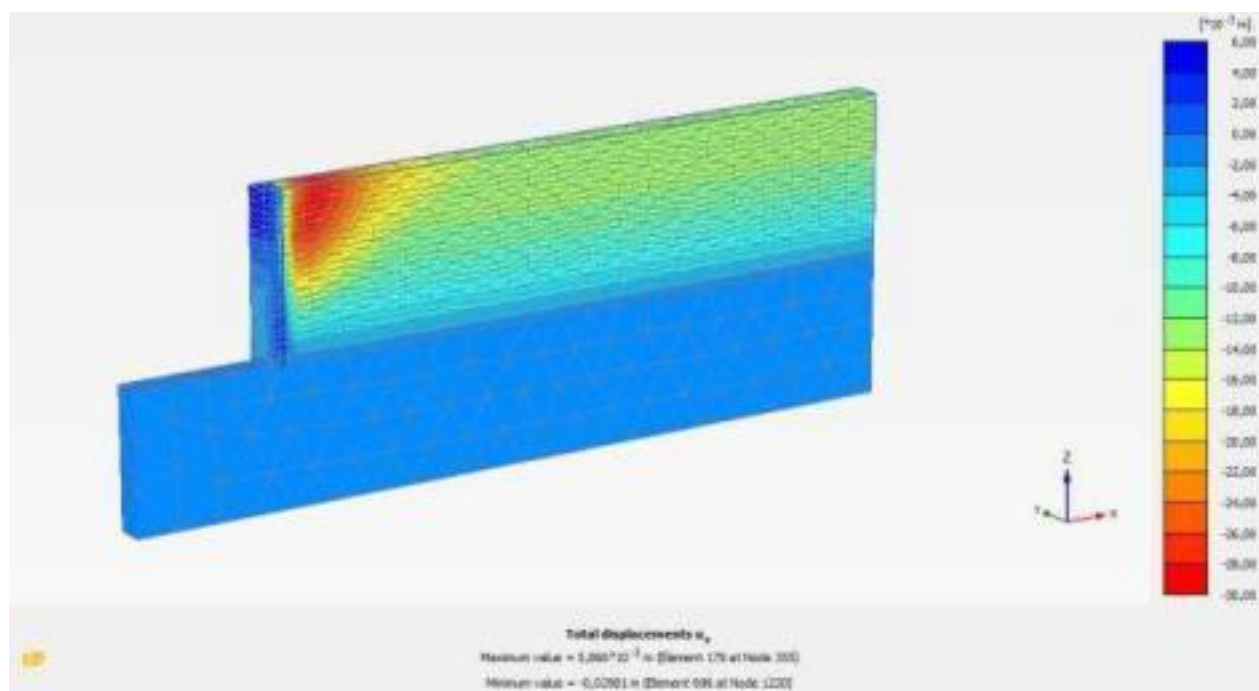


Figure IV.12. Déplacements dans le sens Z

Les résultats obtenus à la fin de la phase de construction pour ce cas sont présentés sur les figure 4.8 et 4.9, le déplacement total maximal est 36.36mm, le déplacement dans le sens x du mur 18.74 mm et le déplacement dans le sens y du mur 13.40mm . et le déplacement dans le sens z 29.81mm.

Le coefficient de sécurité de ce mur calculé par Plaxis égale à 2.110, ce coefficient est calculé à la fin de construction du mur avec l'utilisation de la méthode de réduction «méthode ϕ/c réduction».

- Le déplacement et l'effort de traction dans les géogrilles

Les figures IV.13 et 14 représentent les déplacements totaux et les efforts de traction respectivement calculés par Plaxis sur le long de la première nappe liée à la fin de construction.

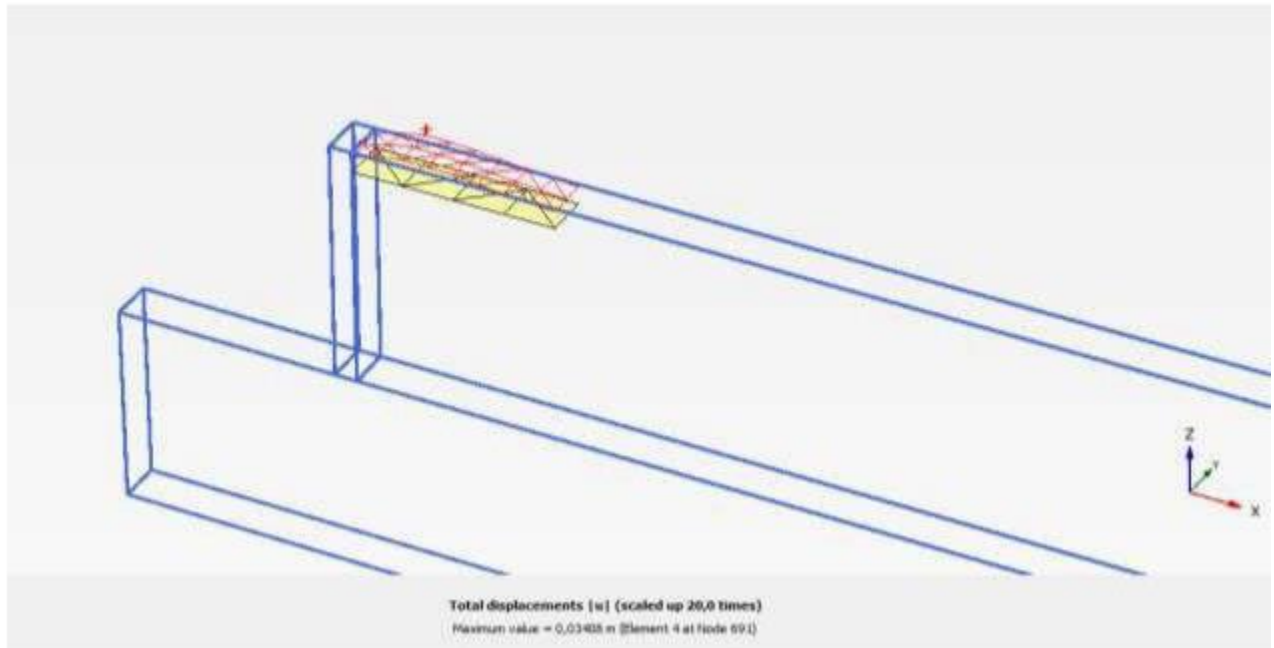


Figure IV.13. Exemple de déplacement total de la nappe géosynthétique n°01

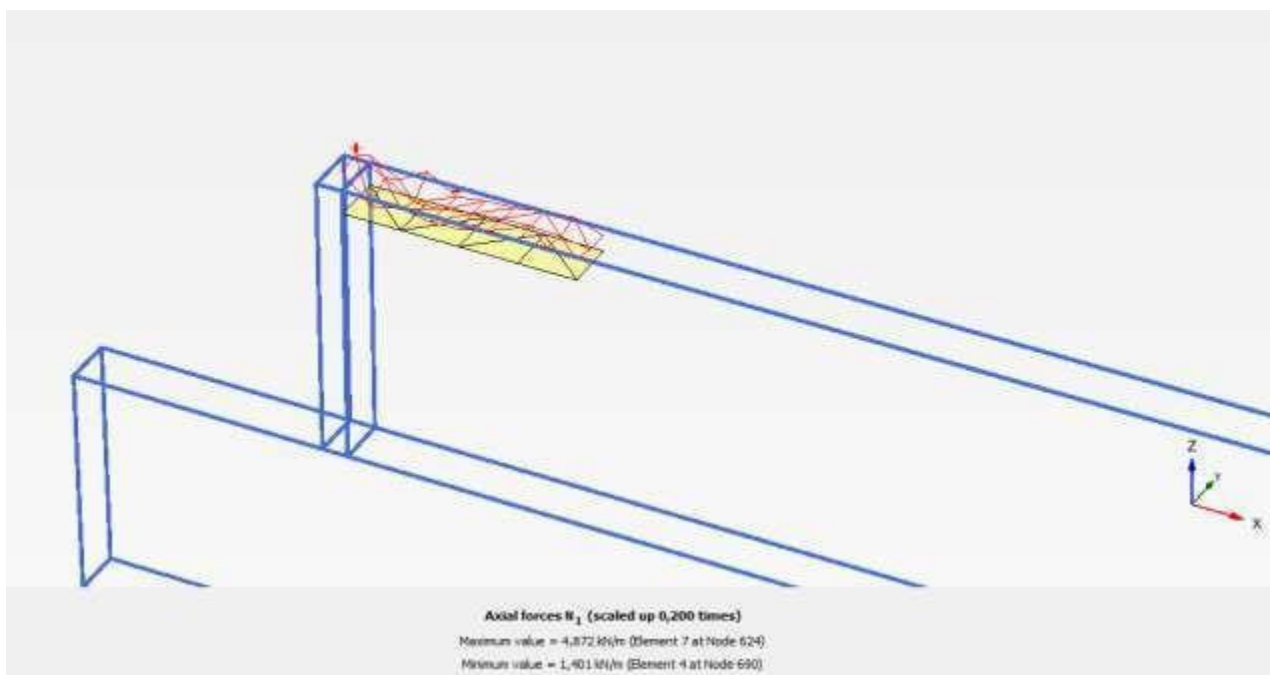


Figure IV.14: Exemple de la force axiale résulte dans la nappe géosynthétique n° 01

IV-6. Etude paramétrique :

L'étude paramétrique établie dans ce travail concerne l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement des murs en sol renforcé par géogridde. On utilise les mêmes données de modèle référence et on change à chaque fois le paramètre à comparer, et toujours dans des fourchettes raisonnables

Les paramètres étudiés sont l'effet la longueur des éléments de renforcement, l'angle de frottement du remblai et le module de rigidite géogridde . le facteur de choesion .

Les différentes combinaisons utilisées pour cette étude sont résumées dans le Tableau IV.4.

- ❖ Pour les modèles (A2-A3-A4, **effet dela longueur de renforcement**): longueurs de renforcement (L) ont été choisies comme 3 m ,6 m , et 12 m, ce qui correspond à des valeurs L / H de 0.5, 1 et 2.
- ❖ Pour les modèles (B1 - B2 - B3, **effet de Module de rigidité E de goegrille**): La valeur de cet module **E (kPa)** prend les valeurs suivantes : 500, 2000 et 2500 (La valeur de référence est de 1000).
- ❖ Pour les modèles (C1- C2- C3, **effet de l'angle de frottement ϕ du remblai**): La valeur Angle de frottement (degrés) prend les valeurs suivantes : 25°, 35° et 40° (l'angle de référence est de 30°).
- ❖ Pour les modèles (D1 - D2- D3, **effet de Cohésion, c (kPa)**): La valeur de cet facteur **c (kPa)** prend les valeurs suivantes : 0.5, 10 et 20 (La valeur de référence est de 1).
- ❖ Le modèle **A1** est considéré comme **le modèle de référence**.

Tableau IV.4. Différentes combinaisons utilisé pour les analyses.

Modèle	Variant	Espacements Sv(m)	Rapport (L/H)	Rigidete de goegrille	Cohésion	Angle de frottement (degrés)
A1	Longueur de géo grille	1	0.75	1000	1	30
A2			0.5			
A3			1			
A4			2			
B1	Rigidete de goegrille	1	0.75	500	1	30
B2				2000		
B3				2500		
C1	Angle de frottement	1	0.75	1000	1	25
C2						35
C3						40
D1	Cohésion	1	0.75	1000	0.5	30
D2					10	
D3					20	

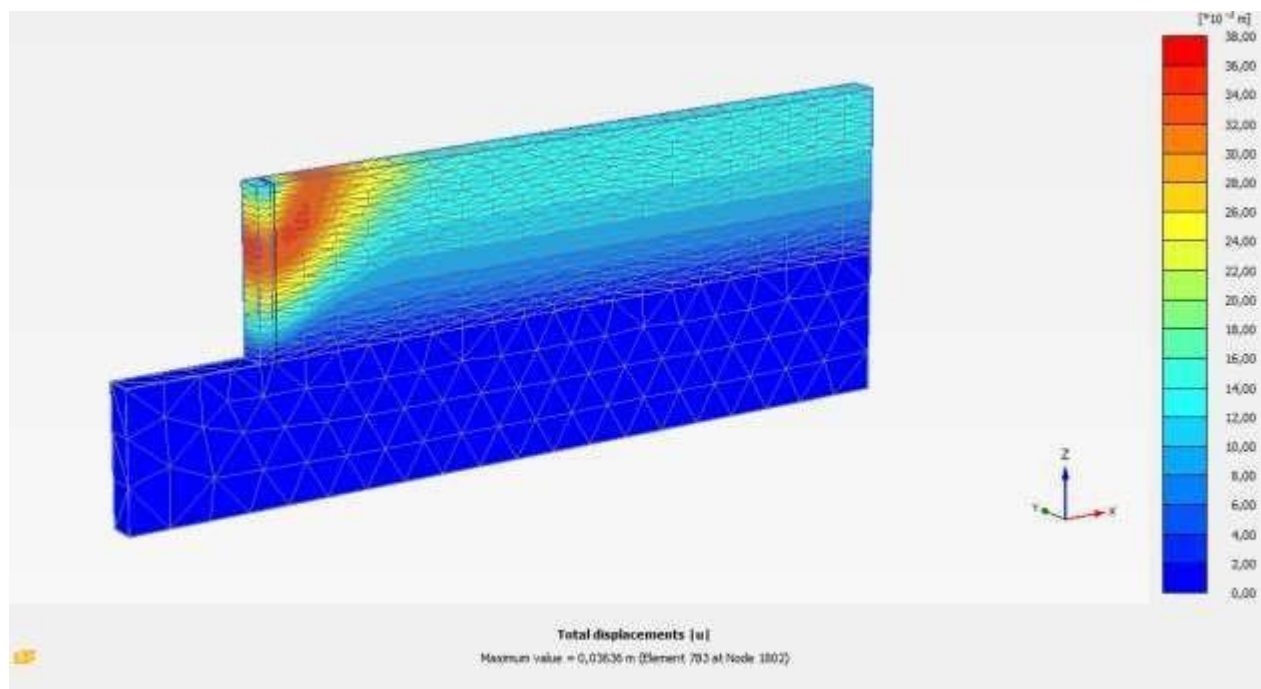
IV-6-1.Effet de la longueur des géogrilles :

Afin de comprendre l'effet de la longueur de l'armature sur la réponse du mur, les modèles A1, A2, A3 et A4 ont été analysés avec un espacement vertical de 1 m et les rapports L / H de 0.75 ,0.5,1 et 2 respectivement.

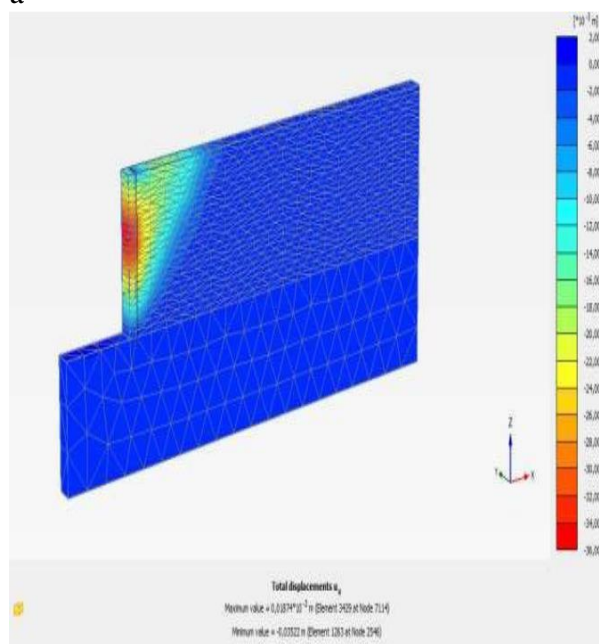
Présentation des résultats Modèle A1 :

Les résultats obtenus à la fin de la phase de construction pour ce cas sont le déplacement maximal 36.36 mm, le déplacement dans le sans x du mur 18.74mm et. le déplacement dans le sans z du mur 29.81 mm .L'utilisation de la méthode de réduction a permet d'obtenir un coefficient de sécurité égale à 2.110

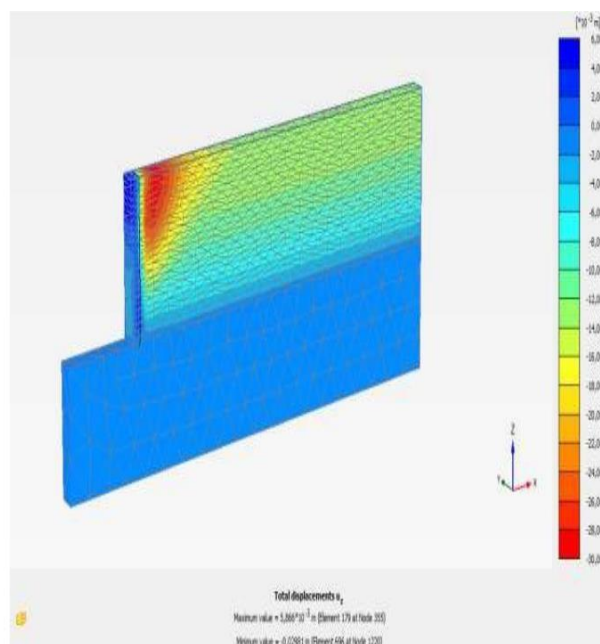
Modèle A1 : un espacement $S_v= 1$ m et une longueur $L= 4.5$ m ($L/H=0.75$)



a



b



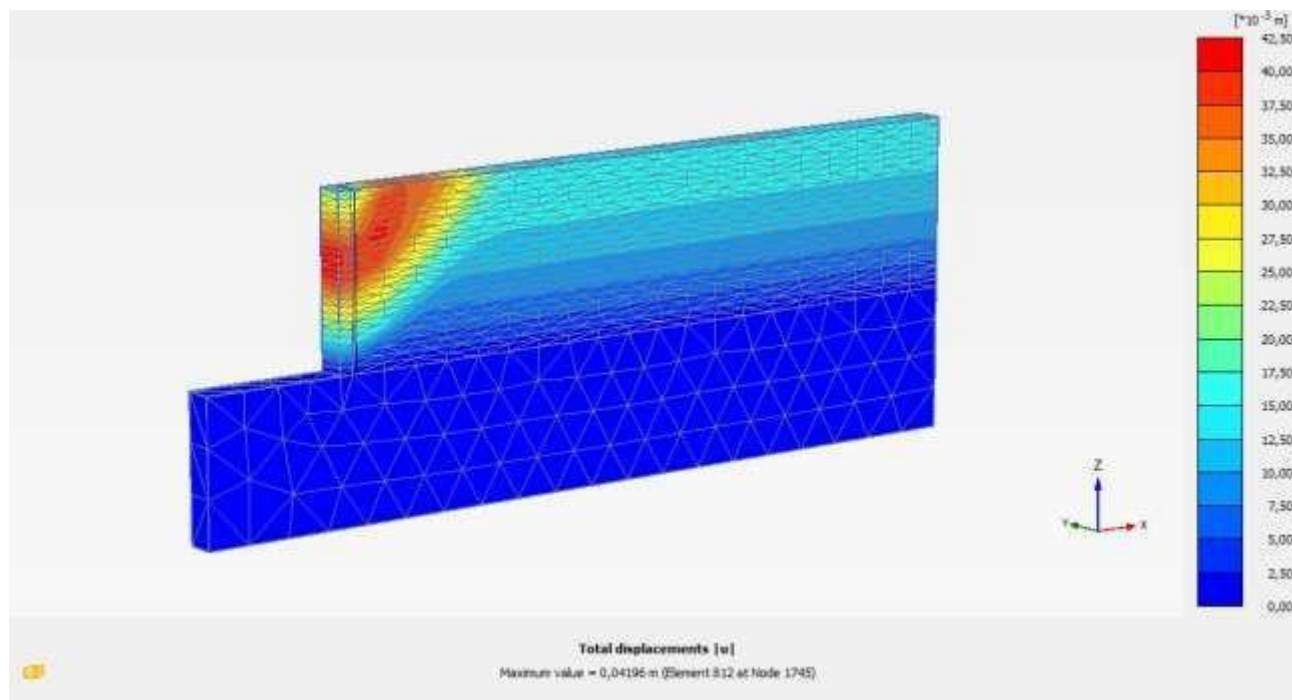
c

Figure IV.15: a-b-c Les Déplacements pour modele A1

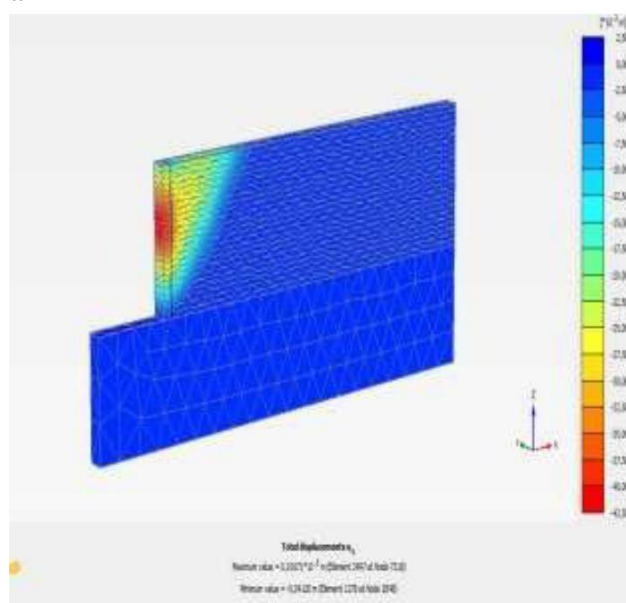
Présentation des résultats Modèle A2 :

Les résultats obtenus à la fin de la phase de construction pour ce cas sont le déplacement maximal 41.96 mm, le déplacement dans le sans x du mur 16.71 mm et. le déplacement dans le sans z du mur 31.55 mm .L'utilisation de la méthode de réduction a permet d'obtenir un coefficient de sécurité égale à 1.737.

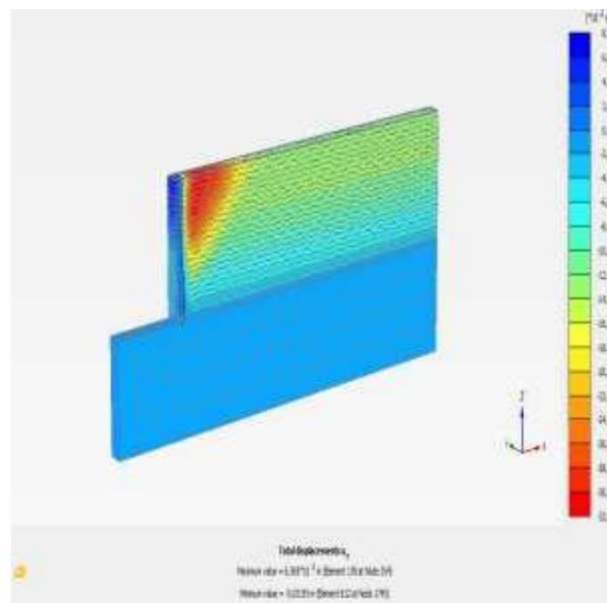
Modèle A2 : un espacement $S_v= 1$ m et une longueur $L= 3$ m ($L/H=0.5$)



a



b



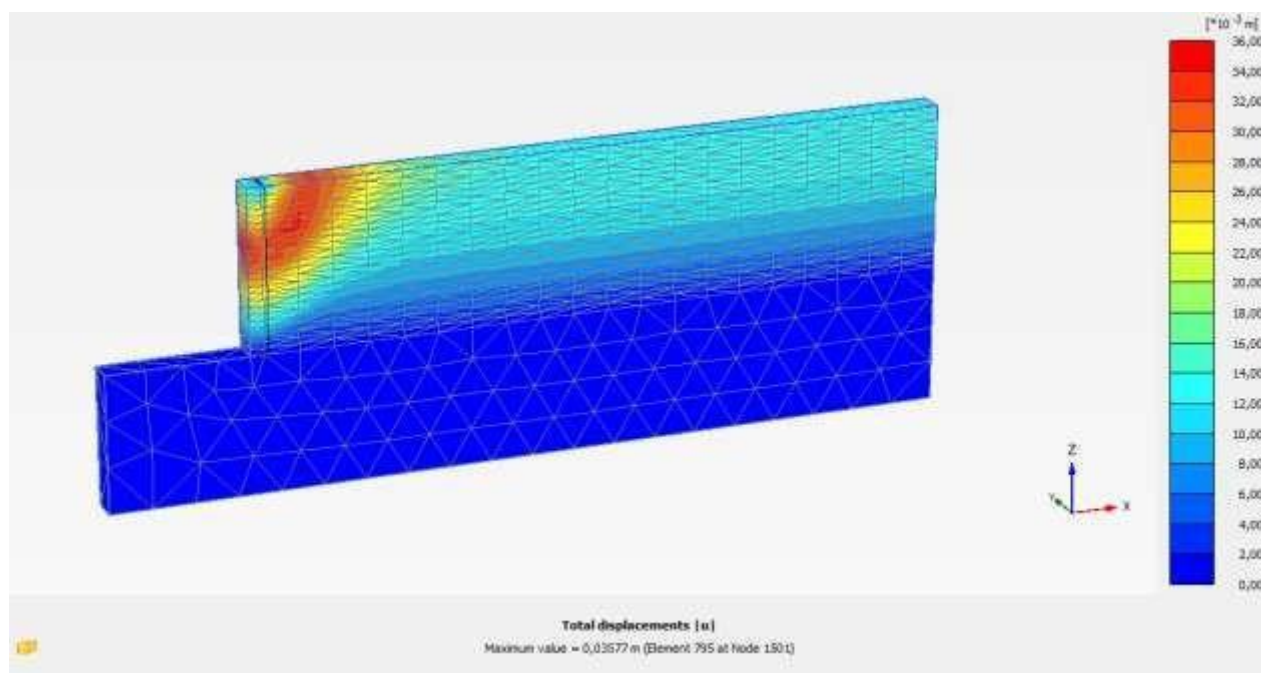
c

Figure IV.16: a-b-c Les Déplacements pour modèle A2

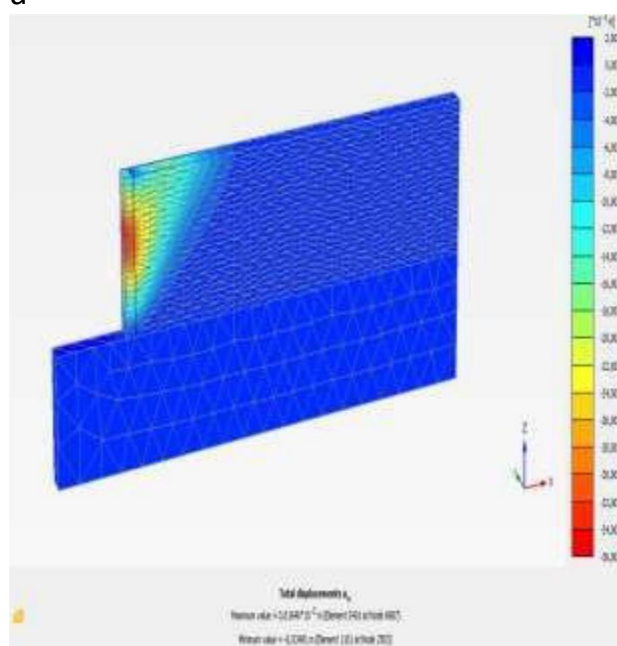
Présentation des résultats Modèle A3 :

Les résultats obtenus à la fin de la phase de construction pour ce cas sont le déplacement maximal 35.77 mm, le déplacement dans le sens x du mur 16.46 mm et le déplacement dans le sens z du mur 29.14 mm. L'utilisation de la méthode de réduction a permis d'obtenir un coefficient de sécurité égale à 2.446.

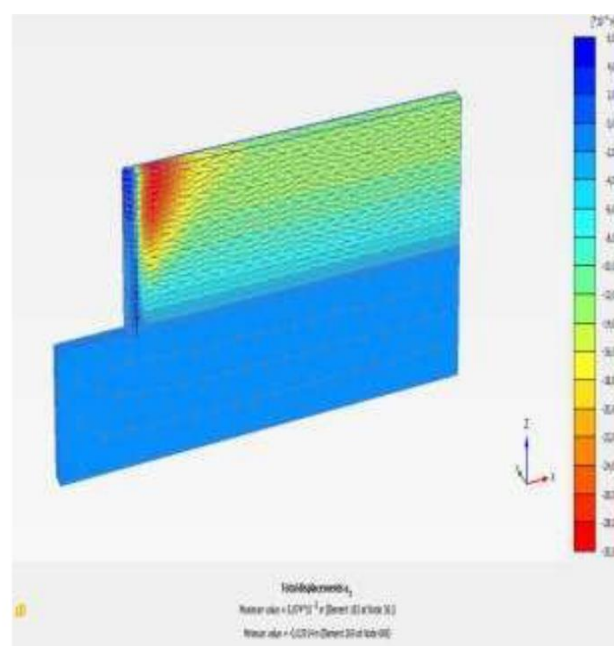
Modèle A3 : un espacement $S_v= 1$ m et une longueur $L= 6$ m ($L/H=1$)



a



b



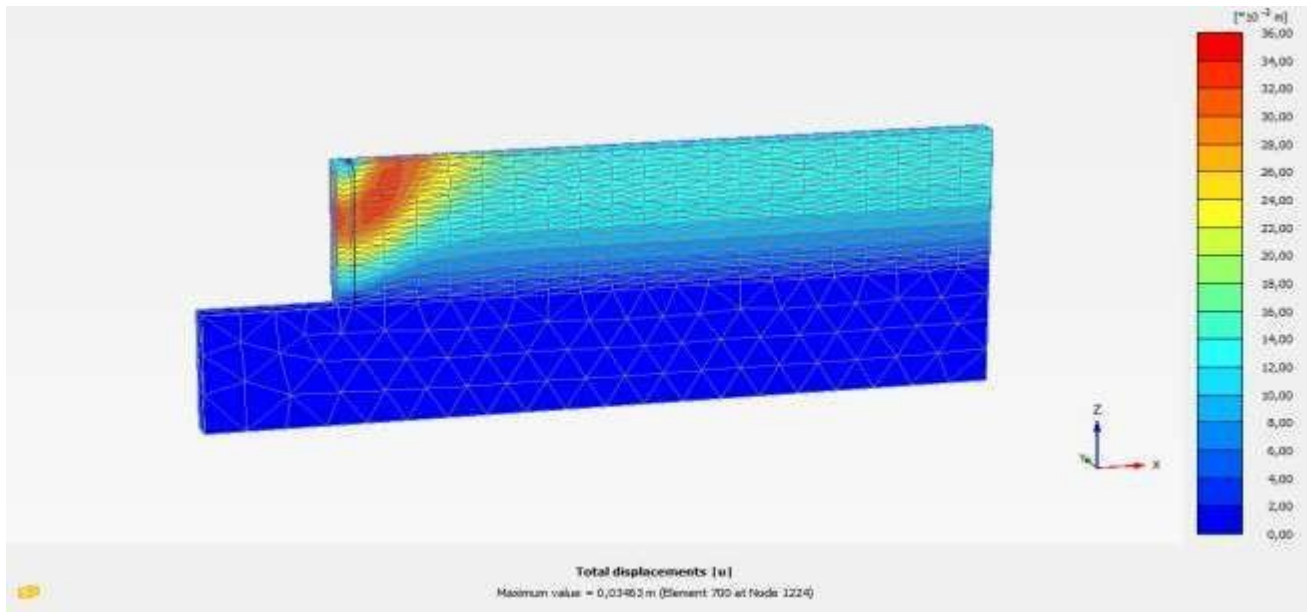
c

Figure IV.17: a-b-c Les Déplacements pour modele A3

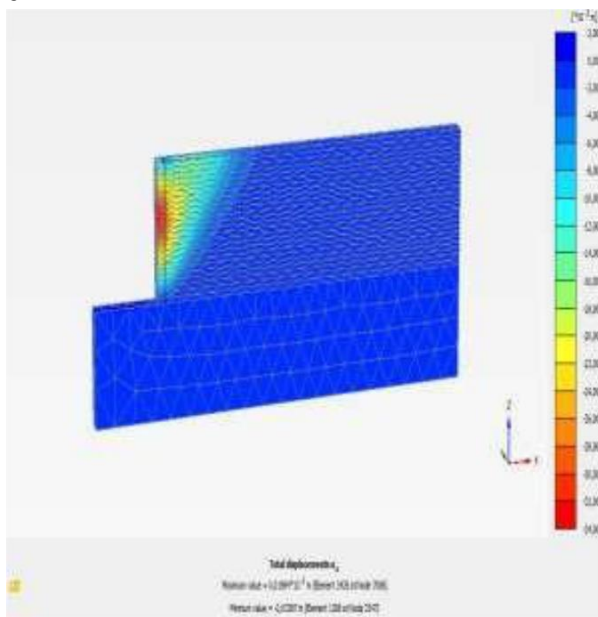
Présentation des résultats Modèle A4 :

Les résultats obtenus à la fin de la phase de construction pour ce cas sont le déplacement maximal 34.63 mm, le déplacement dans le sans x du mur 19.84 mm et. le déplacement dans le sans z du mur 29.18 mm .L'utilisation de la méthode de réduction a permet d'obtenir un coefficient de sécurité égale à 3.241.

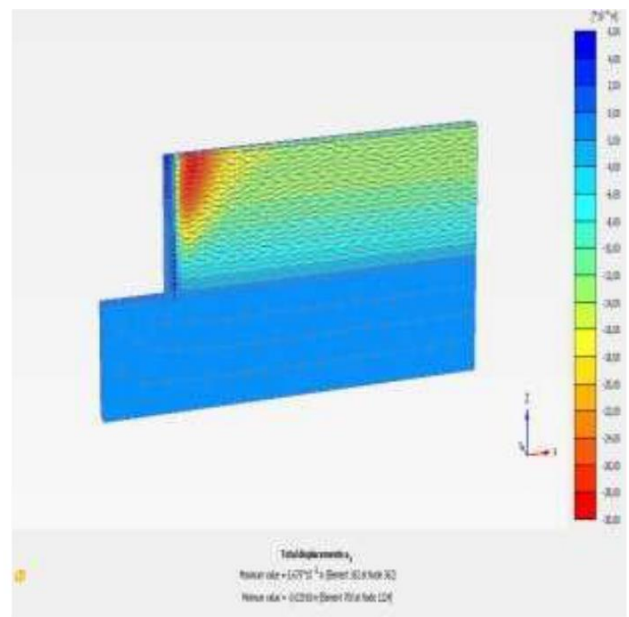
Modèle A4 : un espacement $S_v= 1$ m et une longueur $L= 12$ m ($L/H=2$)



a



b



c

Figure IV.18: a-b-c Les Déplacements pour modele A4

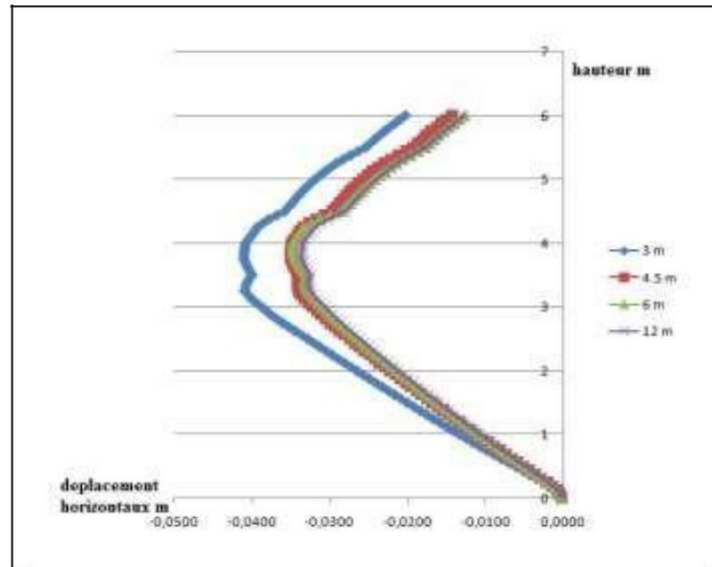


Figure IV.19. Déplacement horizontal des parements

- Discussions des résultats Modèle A :

Pour mieux simplifier, nous avons essayé de résumer les résultats dans un tableau pour afin de faciliter sa compréhension et de bien voir la différence entre les cas.

Ainsi, à partir du Tableau IV.5 et la Figure IV.19, on peut remarquer que le Coefficient de sécurité augmente avec l'augmentation de la longueur des géogrilles.

De même, d'après le Tableau IV.5 et la Figure IV.20, on peut remarquer que le déplacement horizontal diminue avec l'augmentation de la longueur des géogrilles. Ces résultats indiquent que l'effet de variation de la longueur des géogrilles a une influence majeure sur les déplacements horizontaux de mur mais à partir de longueur 4.5 m ($L/H=1$), la longueur n'a plus d'influence.

Tableau IV.5. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis.-A-

Les modèles	Espacements Sv(m)	Rapport L/H	Déplacement horizontal max U (mm)	ΔU (%)	Coefficient de sécurité (F)	ΔF (%)
A1	1	0.75	36.36	-	2.110	-
A2		0.5	41.96	+ 15.40	1.737	- 17.67
A3		1	35.77	- 1.62	2.446	+ 15.92
A4		2	34.63	- 4.75	3.241	+ 62.13

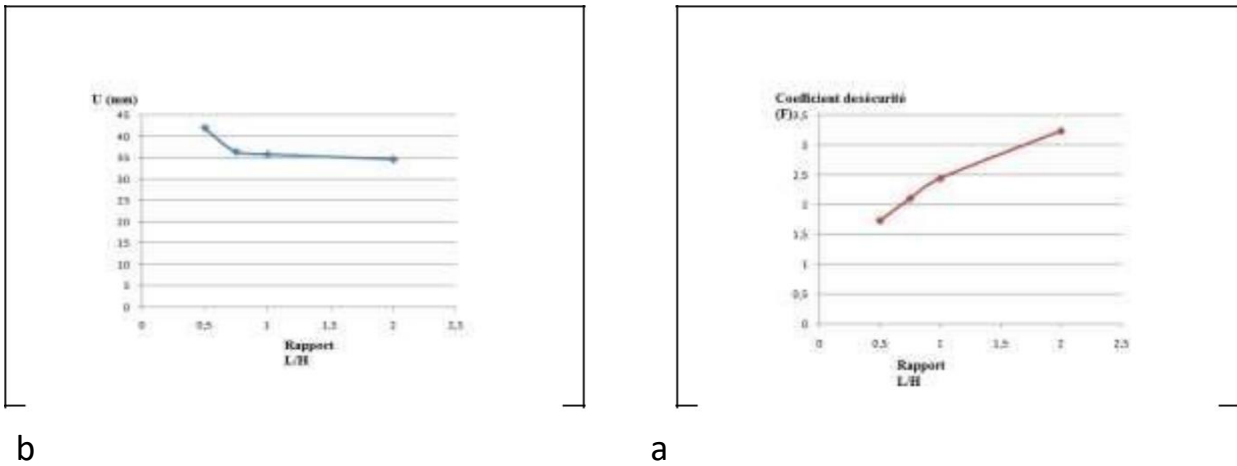


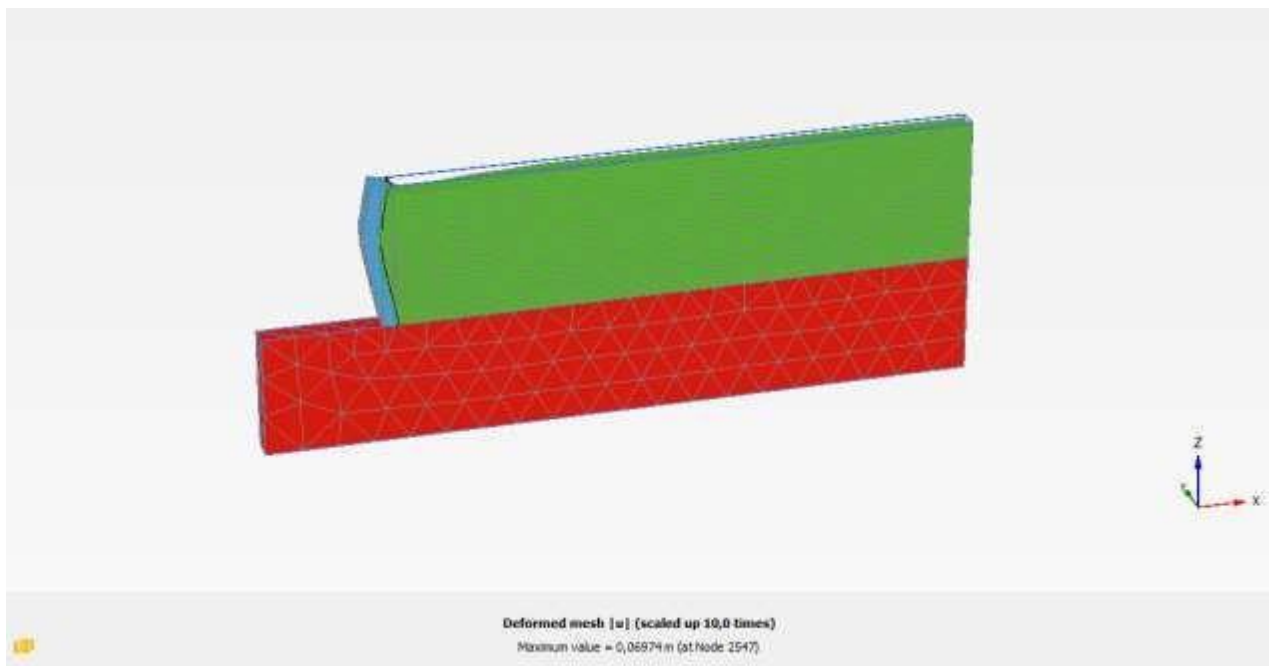
Figure IV.20. a-Courbe coefficient de sécurité en fonction le rapport L/H.

b-Les déplacements horizontal Ux en fonction le rapport L/H

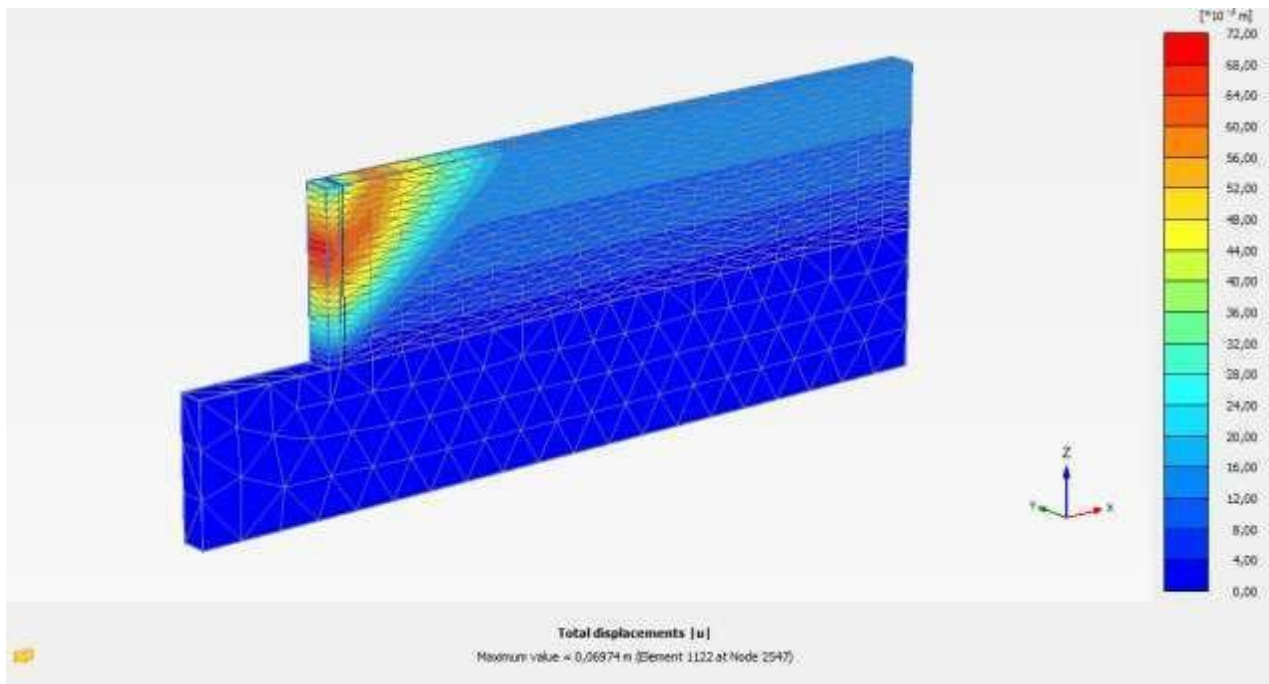
IV-6-2. Effet de Module de rigidité E de goe grille

Afin de comprendre l'effet de Module de rigidité E de goe grille, nous avons étudié les modèles B1, B2 et B3 avec un changement de Module de rigidité E , 500. 2000. 2500 respectivement (Module de rigidité E de référence est de 1000 kn/m modèleA1), les autres propriétés du modèle de référence restes fixés ($S_v = 1$ m et la longueur de goe grille $L = 4.5$ m)

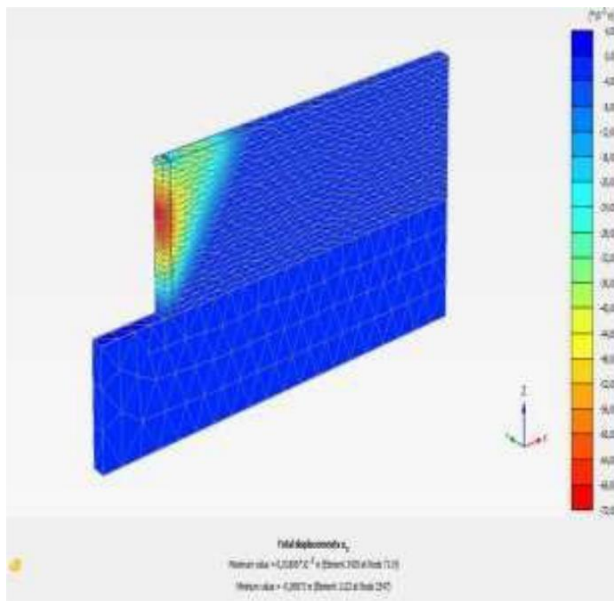
Modèle B1 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($H = 0.75$) . $E = 500$ kn/m



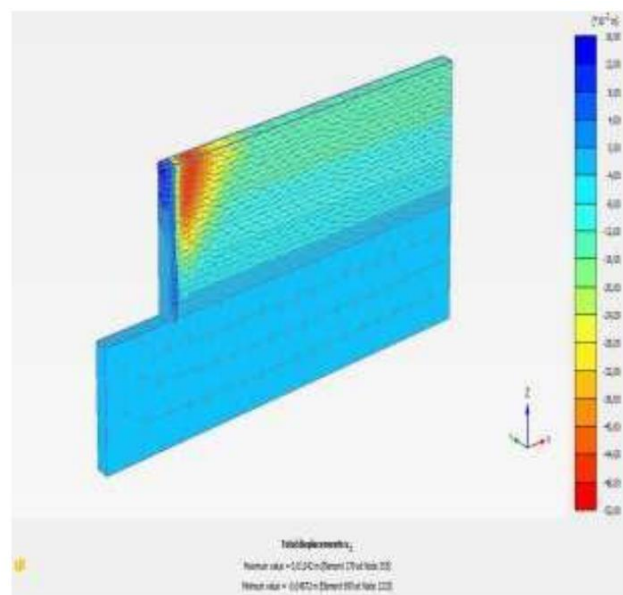
a



b



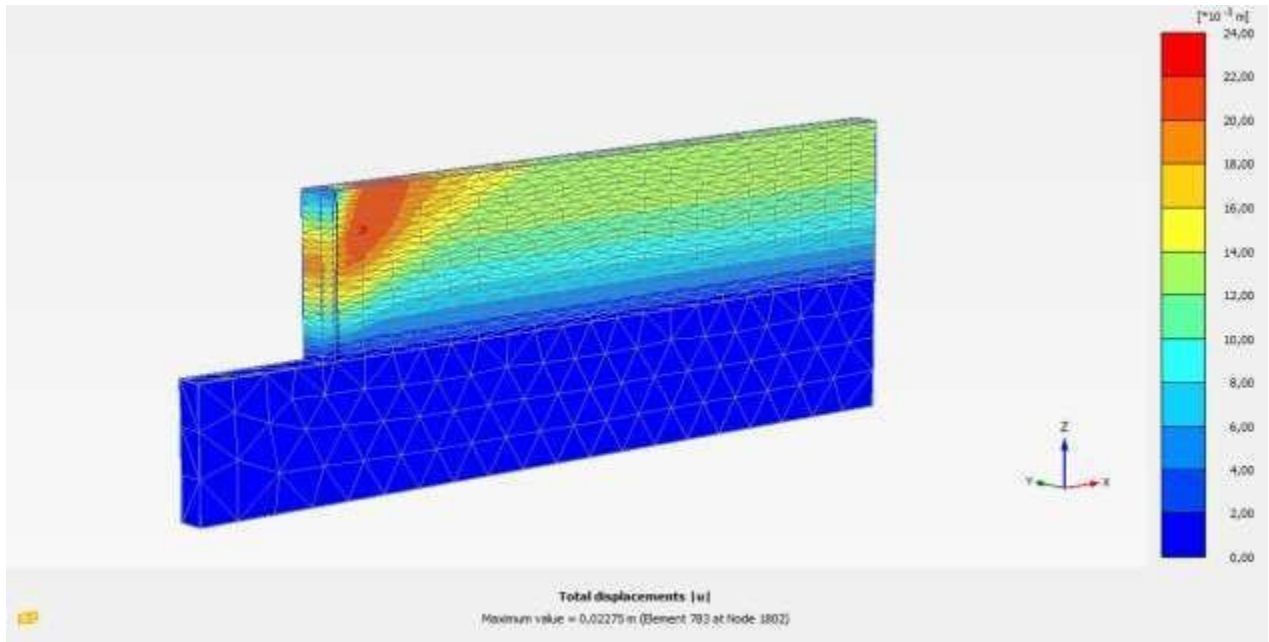
c



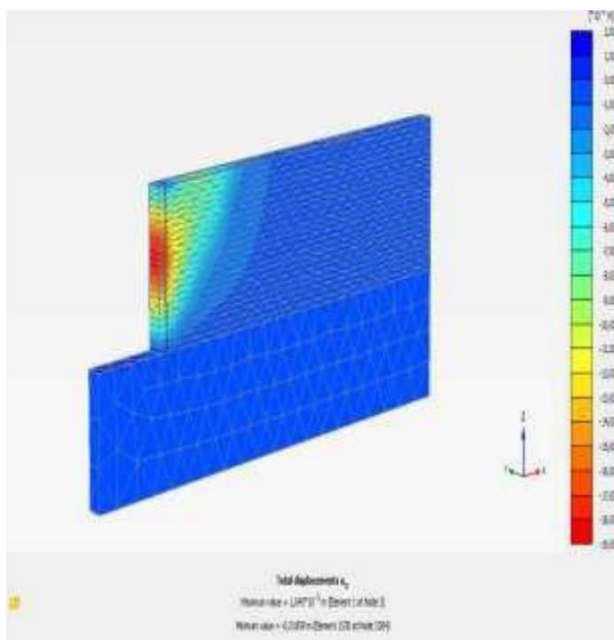
d

Figure IV.21: a-b-c -d- Les Déplacements pour modèle B1

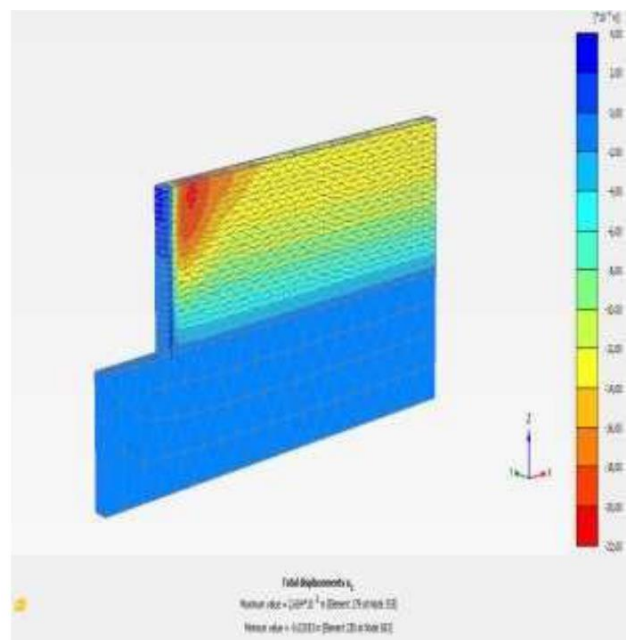
Modèle B2 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($H = 0.75$) $E = 2000$ kn/m



a



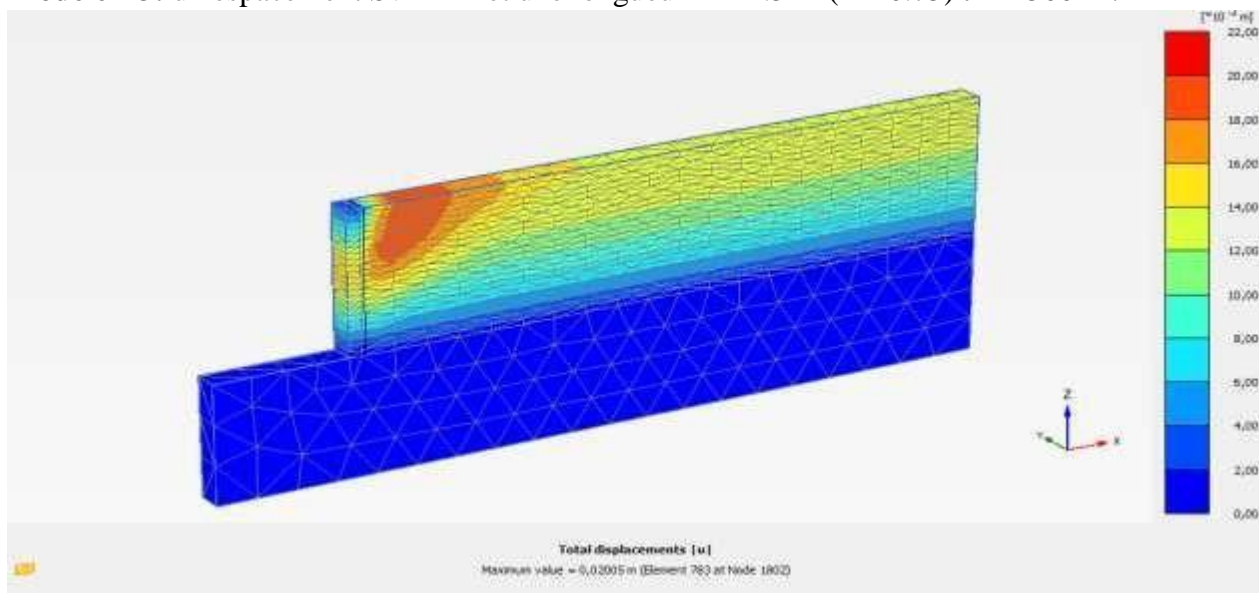
b



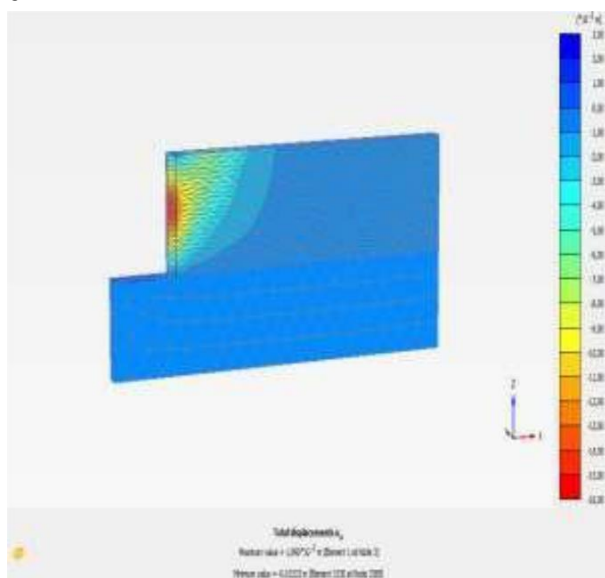
c

Figure IV.22: a-b-c Les Déplacements pour modele B2

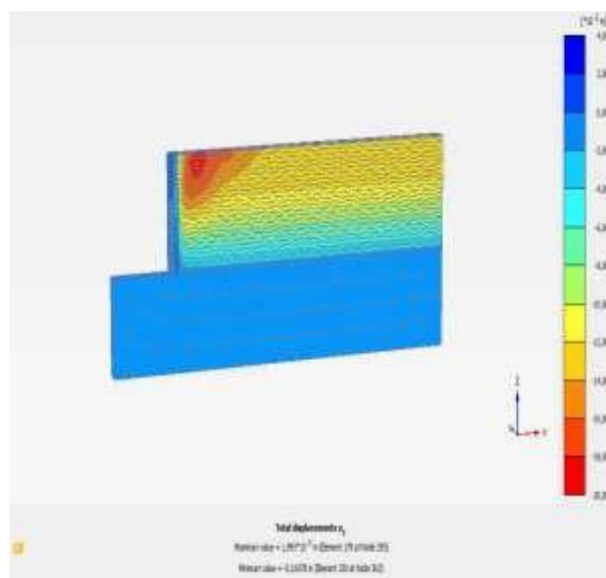
Modèle B3: un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($H = 0.75$) $E = 2500$ kn/m



a



b



c

Figure IV.23: a-b-c Les Déplacements pour modele B3

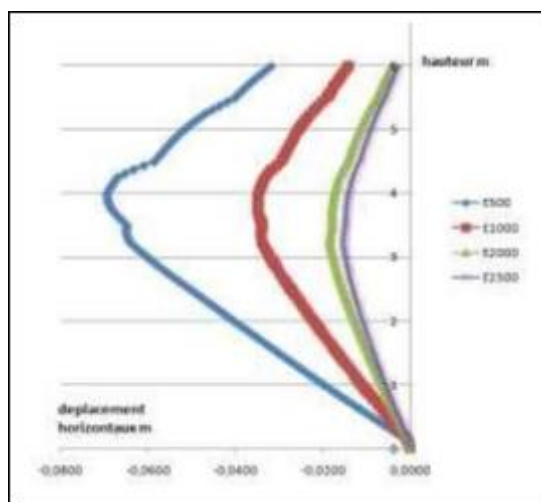


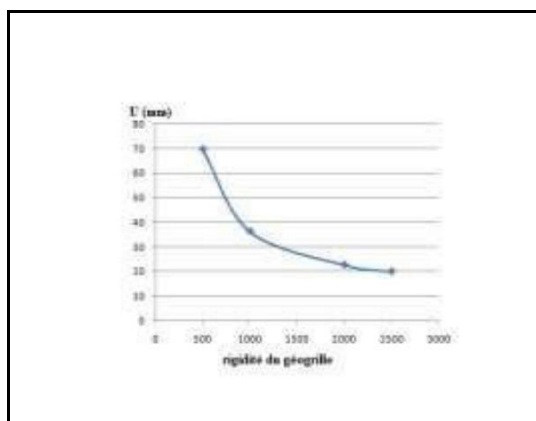
Figure IV.24. Déplacement horizontal des parements

- Discussions des résultats Modèle B :

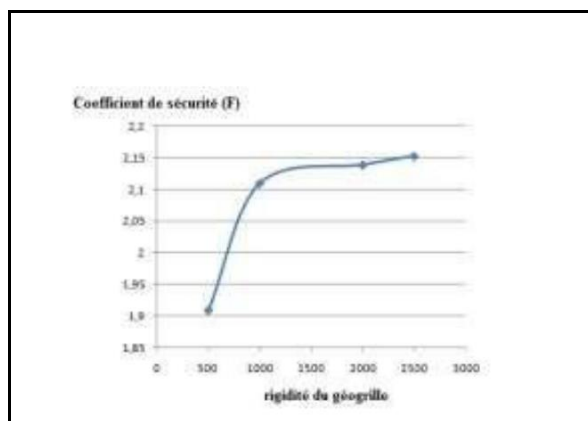
a travers les expériences réalisées sur les modèles B1.B2.B3, nous avons remarqué que l'effet de la rigidité du géogrille, à mesure que la rigidité augmente, les déplacements de mur diminuent, mais en atteignant la valeur de 2000 et plus, l'effet n'est presque pas observé, et nous concluons que la valeur de 2000 est suffisante pour le mur.

Tableau IV.6. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis-B-

Les modèles	Espacements Sv(m)	Rapport L/H	rigidité du géogrille	Déplacement horizontaux max U (mm)	Coefficient de sécurité (F)
A1 (Référence)	1	0.75	1000	36.36	2.110
B1			500	69.74	1.909
B2			2000	22.75	2.139
B3			2500	20.05	2.153



a



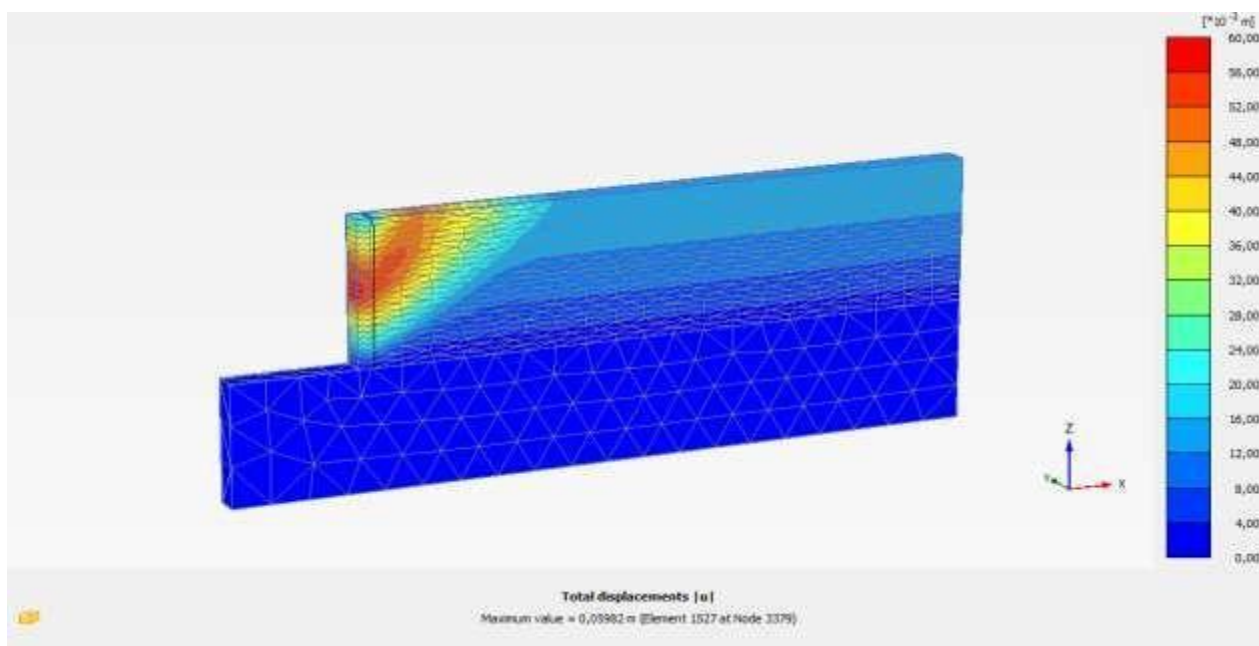
b

Figure IV.25 : a-variation du déplacement maximal Ux(mm) en fonction de la rigidité du géogrille
 b- variation de coefficient de sécurité en fonction de la rigidité du géogrille

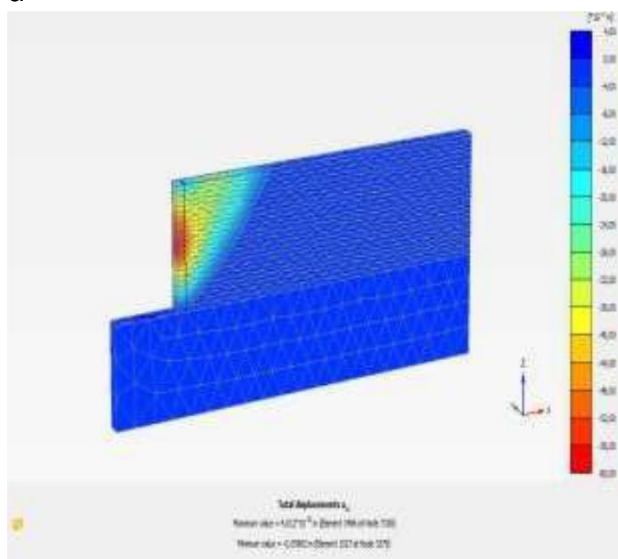
IV-6-3.Effet d'angle de frottement du remblai

Afin de comprendre l'effet de l'angle de frottement sur la mur renforcée, nous avons étudié les modèles C1, C2 et C3 avec un changement d'angle de frottement, 25° 35° 40° respectivement (l'angle de référence est de 30° modèle A1), les autres propriétés du modèle de référence restent fixés (Sv= 1 m et la longueur de geogridde L = 4.5 m)

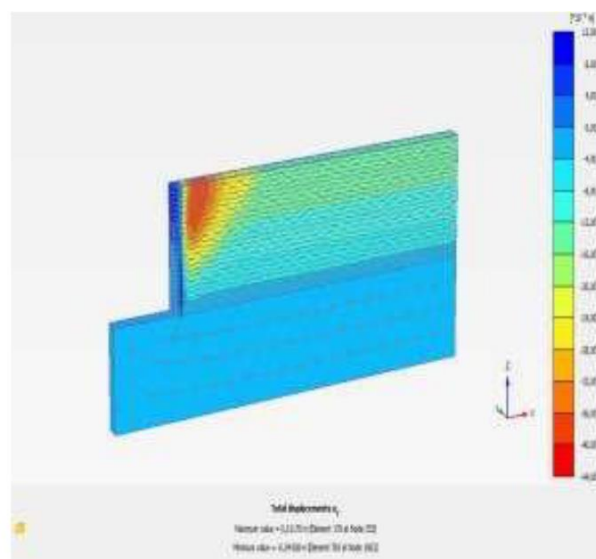
Modèle C1 : un espacement Sv= 1 m et une longueur L = 4.5 m (L/ H=0.75). $\phi = 25^\circ$.



a



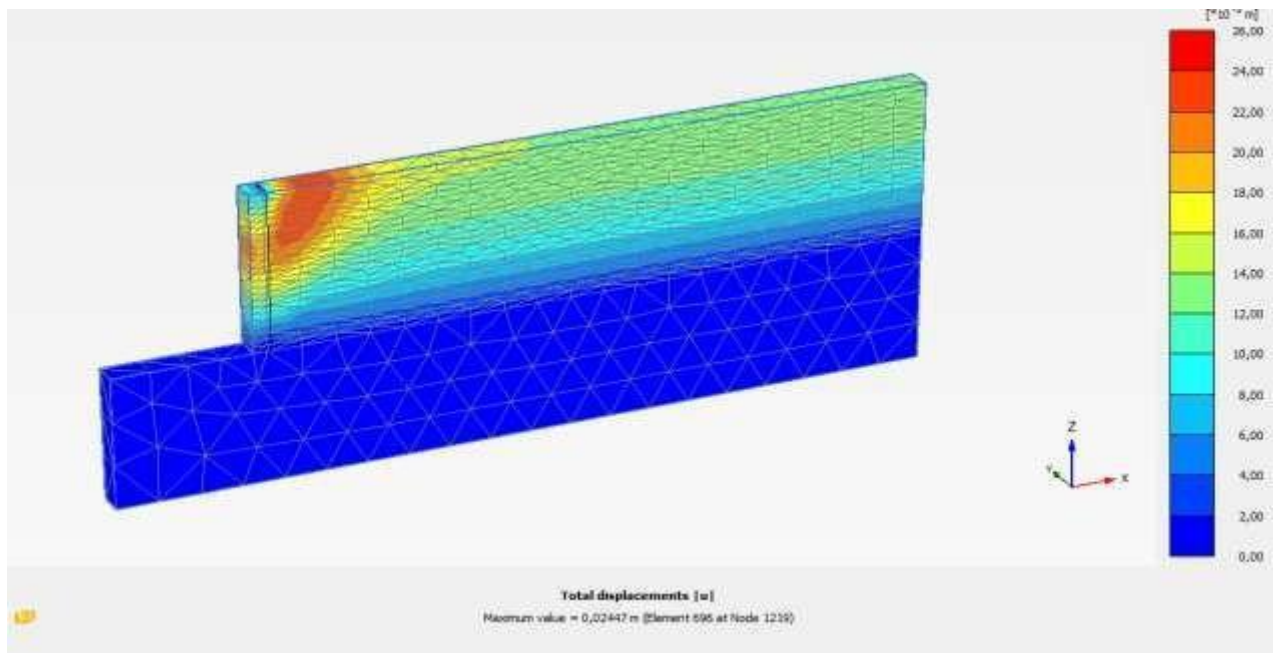
b



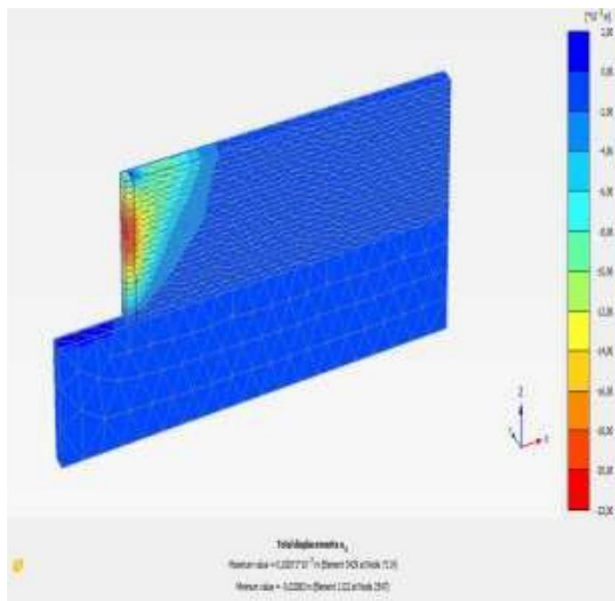
c

Figure IV.26: a-b-c Les Déplacements pour modele C1

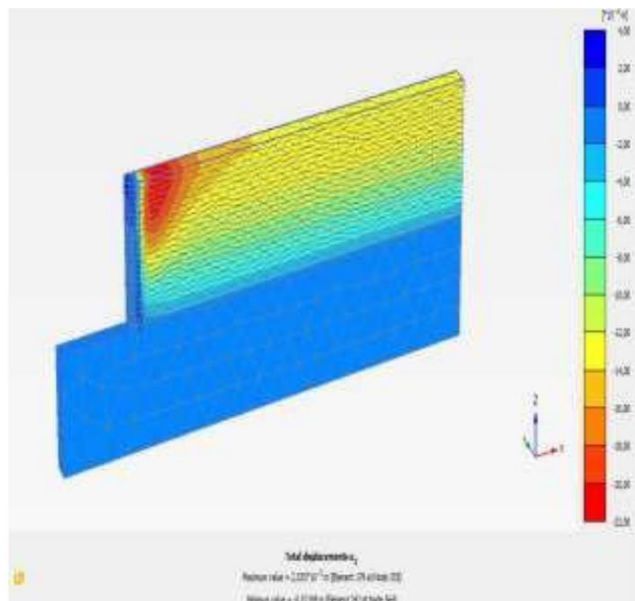
Modèle C2 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($L/H = 0.75$). $\phi = 35^\circ$.



a



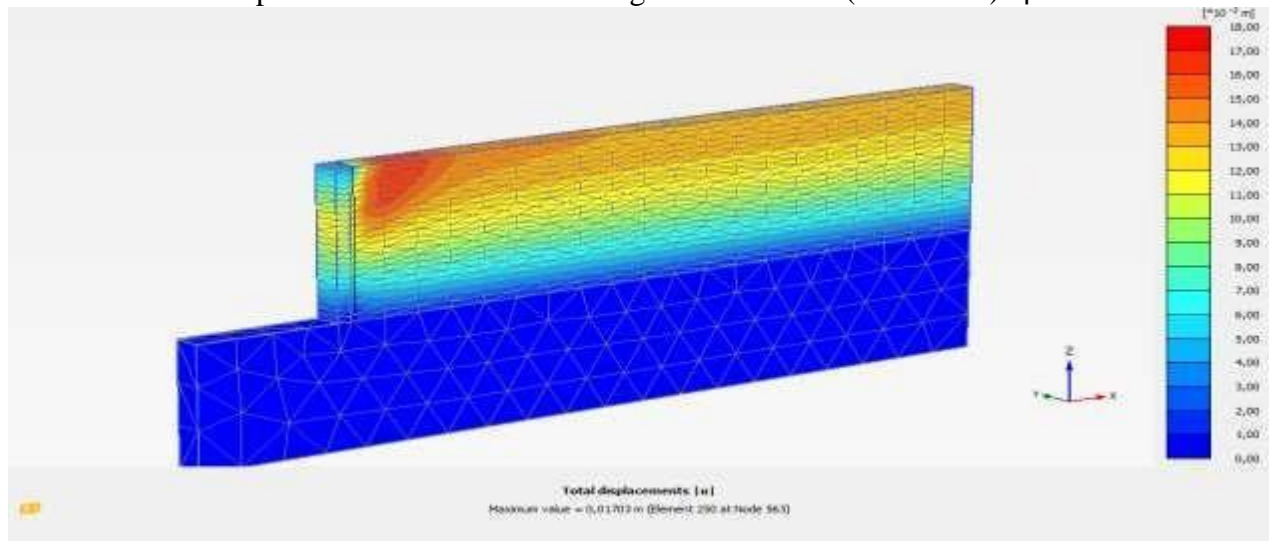
b



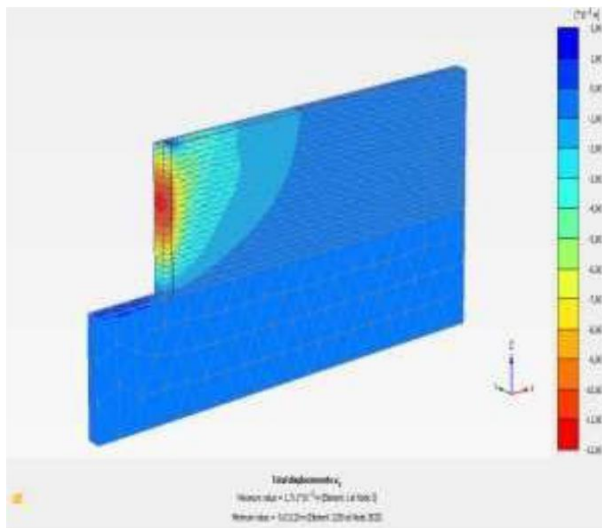
c

Figure IV.27: a-b-c Les Déplacements pour modele C2

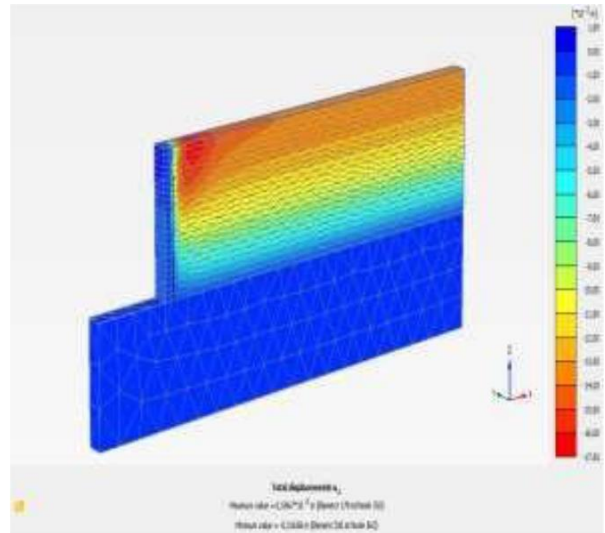
Modèle C3 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($L/H = 0.75$). $\phi = 40^\circ$.



a



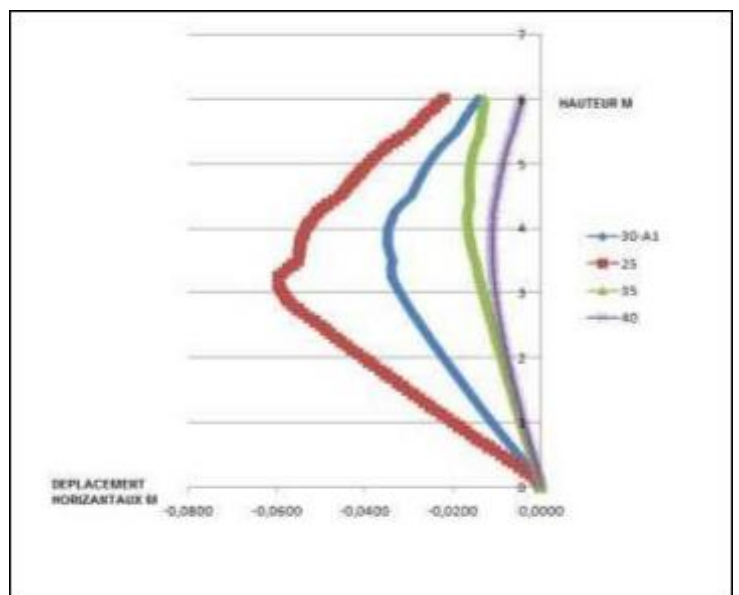
b



c

Figure IV.28: a-b-c Les Déplacements pour modèle C3

Figure IV.29. Déplacement horizontal des parements

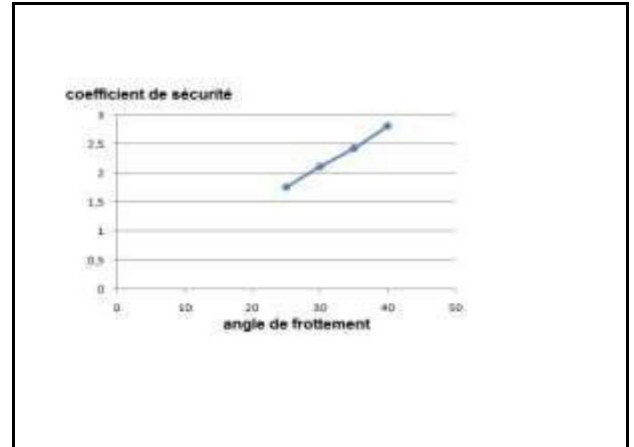


- Discussions des résultats Modèle C

D’après le Tableau IV.7et les Figure IV.29et Figure IV.30 on remarque que le déplacement horizontal diminue lorsque l’angle de frottement du remblai augmente. De même, d'après Tableau IV.7et les Figure IV.29et Figure IV.30. on peut constater que le coefficient de sécurité augmente avec l'augmentation d’angle de frottement du remblai

Tableau IV.7. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis-c-

Les modèles	Espacements Sv(m)	Rapport L/H	Déplacement horizontaux U (mm)	Angle de frottement (degrés)	Coefficient de sécurité (F)
A1(Reference)	1	0.75	36.36	30	2.110
C1	1	0.75	59.82	25	1.756
C2			24.47	35	2.428
C3			17.03	40	2.815



a

b

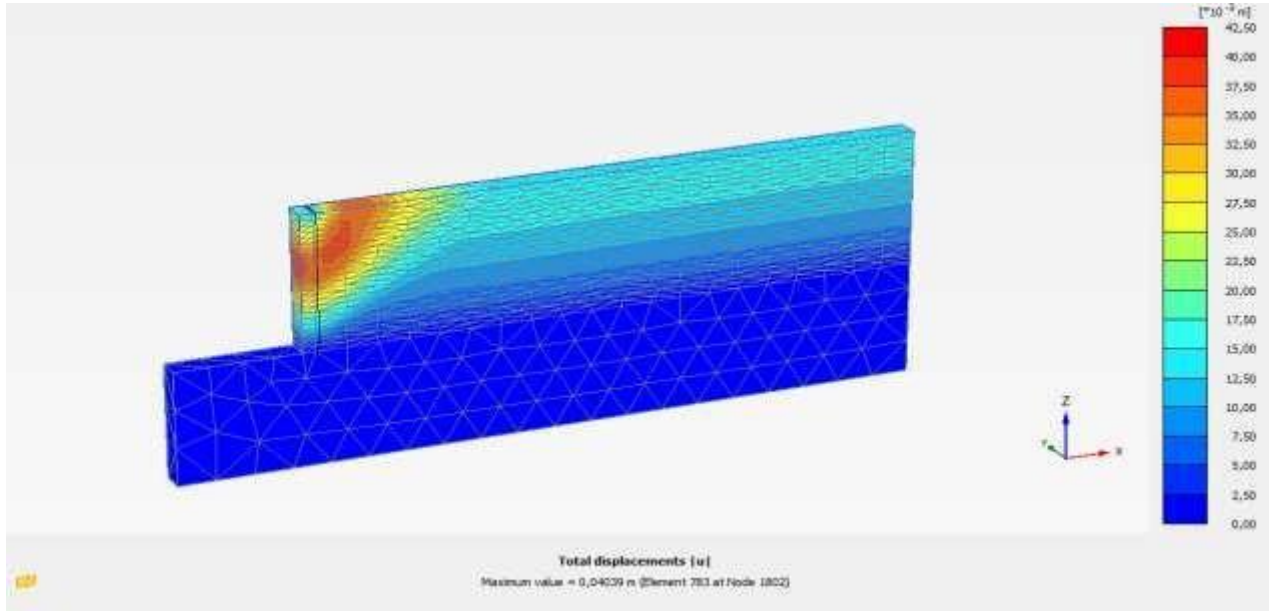
Figure IV.30: a-variation du déplacement maximal Ux(mm) en fonction d’angle de frottement.

b-variation de coefficient de sécurité en fonction l’angle de frottement.

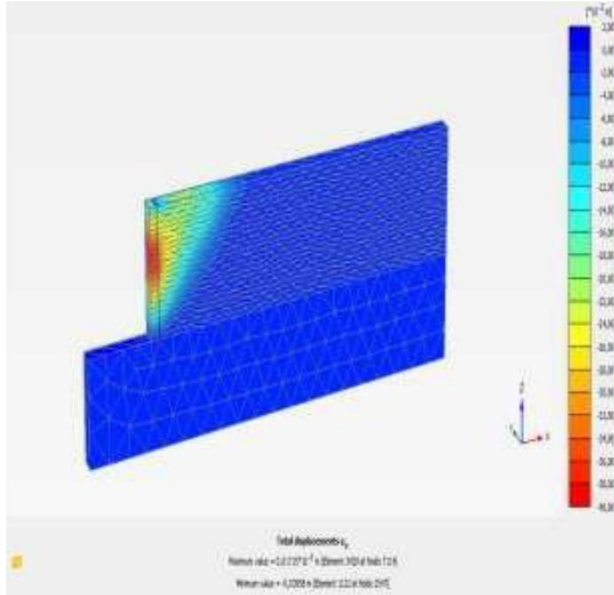
IV-6-4.Effet de facteur de Cohésion :

Afin de comprendre l'effet facteur de Cohésion sur la mur renforcée , nous avons étudié les modèles D1, D2 et D3 avec un changement facteur de Cohésion, 0.5. 10 .20 respectivement (facteur de Cohésion est de 1 modèleA1), les autres propriétés du modèle de référence restes fixés (Sv= 1 m et la longueur de geogrille L = 4.5 m)

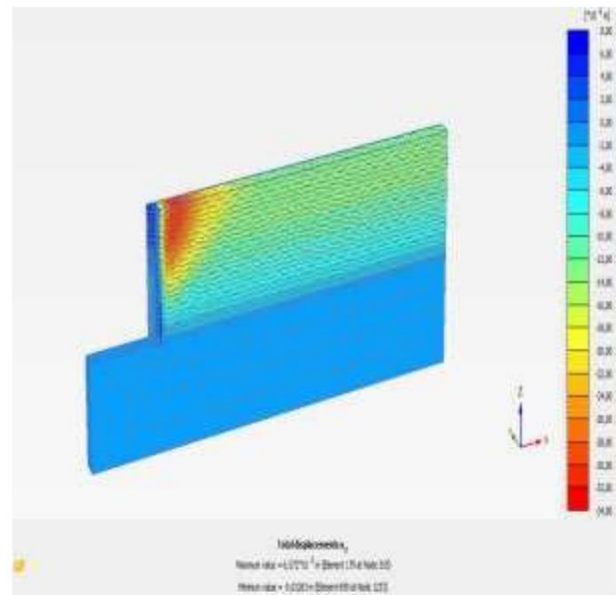
Modèle D1 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($L/H = 0.75$). $C = 0.5$.



a



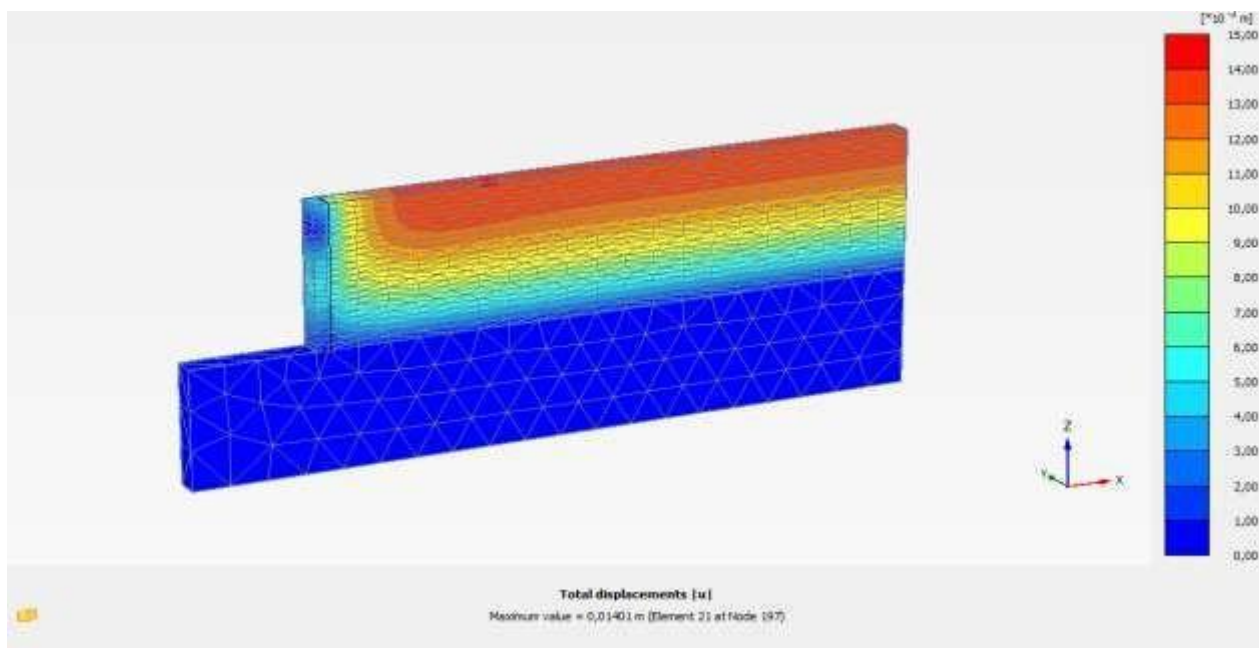
b



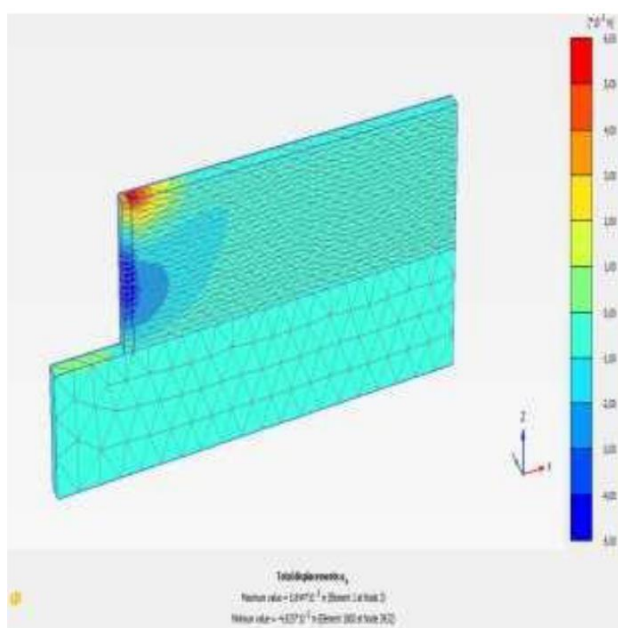
c

Figure IV.31: a-b-c Les Déplacements pour modele D1

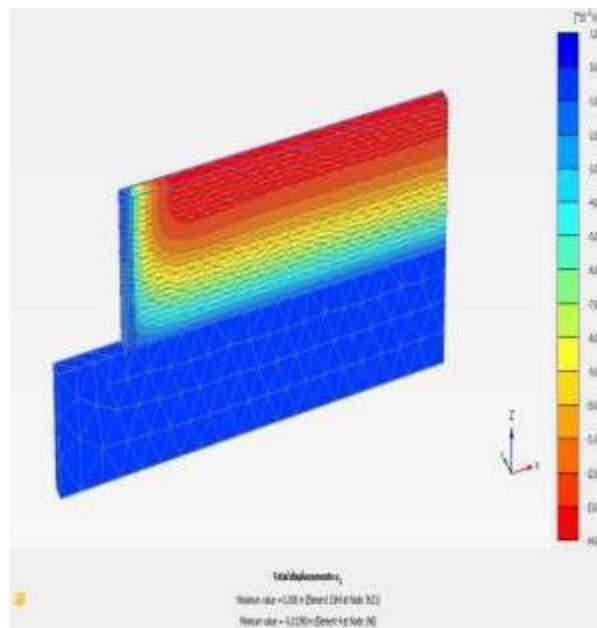
Modèle D2 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($L/H = 0.75$). $C = 10$



a



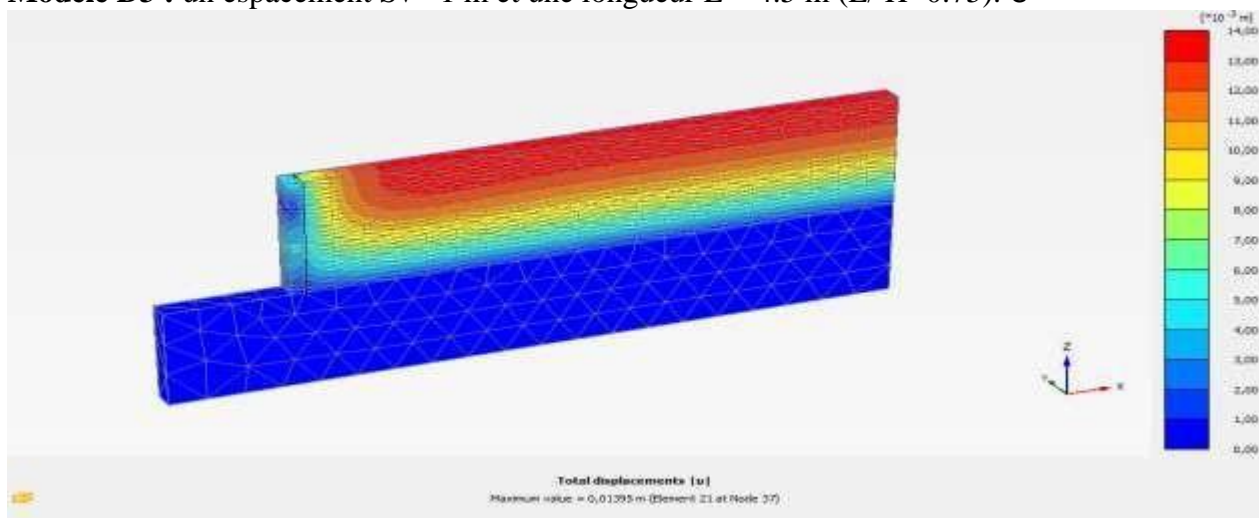
b



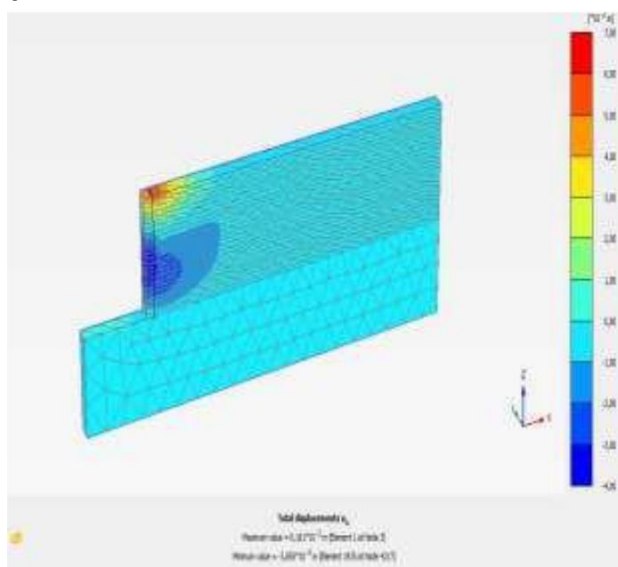
c

Figure IV.32: a-b-c Les Déplacements pour modele D2

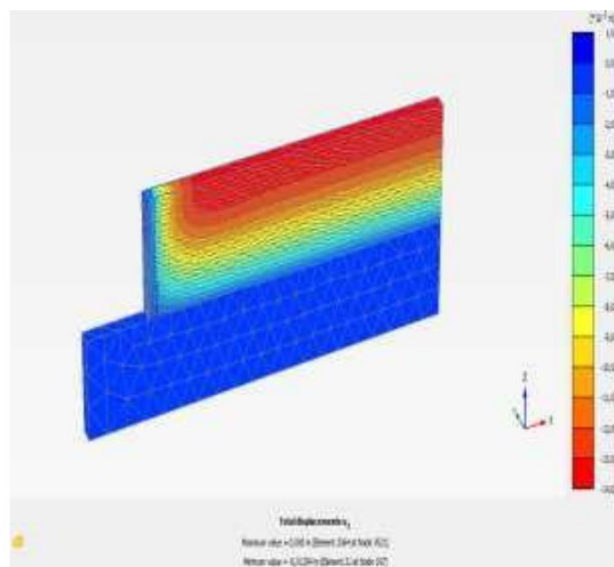
Modèle D3 : un espacement $S_v = 1$ m et une longueur $L = 4.5$ m ($L/H = 0.75$). $C =$



a



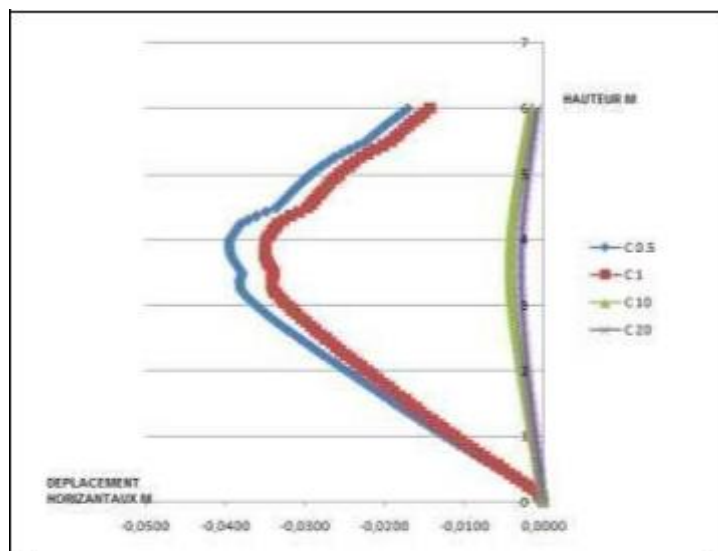
b



c

Figure IV.33: a-b-c Les Déplacements pour modèle D3

Figure IV.34. Déplacement horizontal des parements

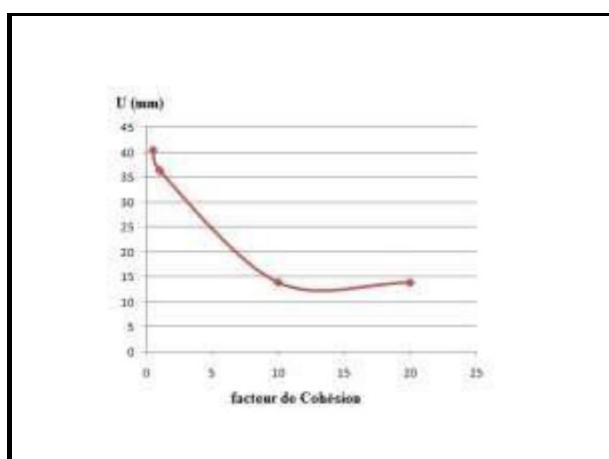


- Discussions des résultats Modèle D

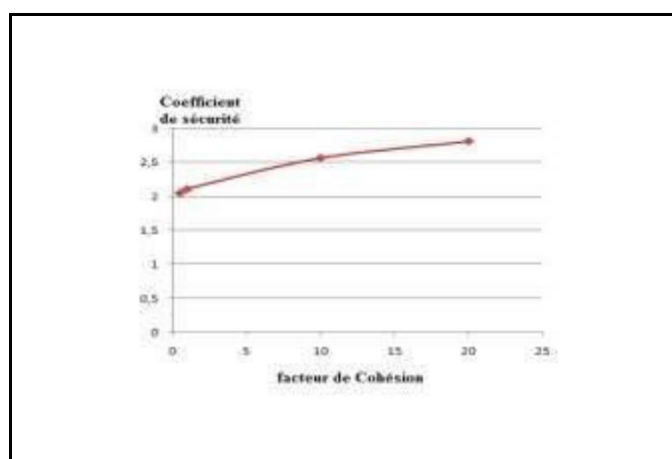
D’après le Tableau IV.8et les Figures IV.35 a on remarque que le déplacement horizontal diminue lorsque le facteur de Cohésion du remblai augmente. De même, d'après le Tableau IV.8et Figure IV.34, on peut constater que le coefficient de sécurité augmente avec l'augmentation d’angle de frottement du remblai On constate également que la valeur du coefficient de Cohésion 10 est suffisante pour la stabilité du mur, car les valeurs supérieures à cette valeur donnent des résultats similaires

Tableau IV.8. Résumé les résultats de l'analyse par éléments finis

Les modèles	Espacements Sv(m)	Rapport L/H	Déplacement horizontaux U (mm)	Cohésion	Coefficient de sécurité (F)
A1(Reference)	1	0.75	36.36	1	2.110
D1	1	0.75	40.39	0.5	2.049
D2			14.01	10	2.566
D3			13.96	20	2.812



a



b

Figure IV.35: a-variation du déplacement maximal Ux(mm) en fonction de facteur de Cohésion

b-variation de coefficient de sécurité en fonction de facteur de Cohésion

Les résultats de l'étude paramétrique effectuée dans ce travail sont résumés dans le Tableau IV.9

Tableau IV.9. Récapitulatif des résultats d'analyse par éléments finis

Modèle	Variante	Espacements Sv(m)	Rapport (L/H)	Rigidite de goegrille	Cohésion	Angle de frottement (degrés)	Les déplacements Ux (mm)	Coefficient de sécurité F
A1	Longueur de géogrille	1	0.75	1000	1	30	36.36	2.110
A2			0.5				41.96	1.737
A3			1				35.77	2.446
A4			2				34.63	3.241
B1	Rigidite de goegrille	1	0.75	500	1	30	69.74	1.909
B2				2000			22.75	2.139
B3				2500			20.05	2.153
C1	Angle de frottement	1	0.75	1000	1	25	59.82	1.756
C2						35	24.47	2.428
C3						40	17.03	2.815
D1	Cohésion	1	0.75	1000	0.5	30	40.39	2.049
D2					10		14.01	2.566
D3					20		13.96	2.812

IV-7.Conclusion :

En terme déplacement La rigidité de géogrille représente l'un des facteurs les plus importants qui affecte le déplacement horizontal et le coefficient de sécurité, les résultats numériques montrent que lorsque la Rigidité augmente, le déplacement horizontal diminue alors que le facteur de sécurité augmente. Dans le même temps, nous avons remarqué que la valeur de la rigidité 2000 kN / m est suffisante pour la stabilité de le mur dans notre cas.

Concernant la cohésion du sol les mêmes observations sur l'angle de frottement ont été remarqué, la valeur de 10Kpa de ce paramètre semble suffisante pour la stabilité du modèle dans notre cas.

Conclusions générales

Cette étude a permis dans une première étape d'exposer les différentes techniques de renforcement de sol et les différents types de géosynthétique. Dans une seconde étape, cette étude a permis d'étudier et modéliser numériquement le comportement des ouvrages de soutènement en sol renforcés par des nappes géosynthétiques. Pour cela nous avons utilisé le logiciel PLAXIS 3D basé sur la méthode des éléments finis afin de comprendre et d'analyser l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement des murs en sol renforcé notamment les déplacements horizontaux du mur et le coefficient de sécurité.

Les principales conclusions déduites de cette étude numérique sont :

Les résultats et les calculs obtenus par Plaxis3D, montre que Plaxis3D est un logiciel puissant et contenant les éléments nécessaires à la modélisation des différentes phases et différents chargements des sols renforcés.

La longueur des géogrilles c'est un paramètre important pour la stabilité des murs en sol renforcé. Les résultats numériques montrent que le déplacement horizontal diminue et le facteur de sécurité augmente avec une augmentation de la longueur de la géogrille. Ces résultats indiquent aussi que l'effet de la longueur sur le déplacement est négligeable pour une longueur est supérieur ou égal à la valeur de $L/H = 0.75$ en terme de déplacement.

L'angle de frottement du remblai, la cohésion du sol et la valeur de la rigidité des armatures sont les facteurs les très importants qui affectent le déplacement horizontal et le facteur de sécurité, et les résultats numériques montrent que plus les valeurs de ces facteurs est grand, le déplacement horizontal diminue tandis que le facteur de sécurité augmente.

Ces résultats indiquent que le choix du type de remblai est très important pour les murs de sol renforcés par des nappes synthétiques. Les sols grossiers améliorent grandement la stabilité de ces structures.

Nous pouvons souligner l'importance de l'étude numérique à travers le programme PLAXIS 3D pour obtenir le choix adéquat de paramètres de différents éléments constructifs d'un mur en sol renforcé et assurer leur stabilité avec un coût de réalisation minimisé.

Références :

[1] H. HOUDA, “ ETUDE NUMERIQUE D’UN MUR DE SOUTÈNEMENT EN SOL STABILISÈ ET RENFORCÈ AVEC FIBRES ET GEOGRILLES,”

Mémoire de Magister, Département de génie civil, Option Géotechnique,
.Université badji mokhtar-annaba, 2010

[2] définition en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques /cahier élaboré par le comité français des géosynthétiques – CFG -Techniques de l’Ingénieur. 10 AVRIL 2015/N 5811.

[3] ENTREPRISE GÈNÈRALE DE TRAVAUX /

[france.com/expertise-techniques/colonnes-ballastees BARRETTES](http://france.com/expertise-techniques/colonnes-ballastees-BARRETTES) .

[4] FARIK Ali, “ ANALYSE NUMERIQUE DES DEFORMATIONS DES

CULEES DE PONT EN SOL RENFORCÈ “ Mémoire de

Magister, Département de génie civil Université de Biskra, 2013

[5] BAAZIZ Salah Eddine, “ MODELISATION NUMERIQUE DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT EN SOL RENFORCÈ “ Mémoire de

Magister, Département de génie civil Université de Biskra, 02/05/2012.

[6] Guide de STABILITE DES SOLS .FONDATION /ref.internet:42219.4 édition

“Techniques de l’Ingénieur “

[7] boulfoul.khalifa,“ ETUDE NUMERIQUE SUR L’EFFET DE L’

ESPACEMENT DES GEOGRILLES SUR DES MECANISMES DES RUPTURE

DES MURS EN SOL RENFORCÈ ”Mémoire de Magister, Département de génie

civil, Université hadj lakhder-batna, 2012

- [8] François SCHLOSSER, “MUR DE SOUTÈNEMENT,”
Techniques de l’Ingénieur. Paris, C244.
- [9] WWW.TERRASSIER.NET/ TECHNIQUE –DE-RENFORCE MENT-DU-SOL
- [10] WWW.GEOSYNTHETIQUE
COSSCIETY.org/content/plngins/resources /documents/french.pdf