Table des Matières

Dédicaces I
Dédicace II
Remerciment III
Résumé IV
ABSTRACT V
ملخـــــــص VI
Liste des figures VII
Liste des tableaux IX
Table des Matières X
Introduction générale et présentation du sujet du projet de fin d'études 1
Chapitre1 NOTIONS SUR LES GEOSYNTHETIQUES 13
1.1 Introduction 14
1.2 Historique 14
1.3 Présentation des géosynthétiques 15
1.3. 1 Les produits perméables 16
1.3. 2 Les produits imperméables 20
1.3. 3 Géocomposites 22
1.4 Principales caractéristiques des géosynthétiques 24
1.5 Fonction et applications 25
1.6 Principaux domaines d'application 29
1.7 Point de vue environnemental 33
1.8 Conclusion 35
Chapitre2 RENFORCEMENT DES SOLS PAR LES GEOSYNTHETIQUES 13
2.1 Introduction 36
2.2 Géosynthétiques adaptés au renforcement 36
2.2.1 Géogrilles 36
2.2.2 Géotextiles 37
2.3 Principe des sols renforcés 37
2.4 Mécanismes de renforcement des sols 38
2.4.1 L'objectif de renforcement 40
2.4.2 Différents types de renforcement 40
2.4.3 Les différentes applications de renforcement par géosynthétiques 40

2.4.4 Avantages et inconvénients des techniques de renforcement par géosynthétiques 41
2.4.5 Choix des éléments de renforcement géosynthétiques 42
2.5 Stabilité des murs en terre renforcée mécaniquement 43
2.5.1 Une stabilité interne 43
2.5.2 Une stabilité externe 44
2.6 Les ouvrages en remblais renforcés 46
2.7 Murs géosynthétiques types 46
2.7.1 Murs renforcés par géosynthétiques 46
2.7.2 Murs types Atalus 47
2.8 Ouvrages hydrauliques et talus renforcés par les géosynthétiques 48
2.9 Renforcement mixte par pieux et géosynthétiques 49
2.10 Renforcement des chaussées à l'aide des géosynthétiques 50
2.10.1 Typologies des chaussées 50
2.10.2 Pathologies des chaussées 51
2.10.3 Choix des géosynthétiques 52
2.10.4 Classification par propriété 52
2.11 Renforcement sur cavité 52
2.12 Conclusion 54
Chapitre3 Renforcement des murs en terre 55
3.1 Introduction 56
3.2 Géosynthétiques de renforcement 56
3.2.1 Fluage 56
3.2.2 Vieillissement 57
3.2.3 L'endommagement 57
3.2.4 Le colmatage 57
3.3 Conception des murs en remblai renforcé par géosynthétiques 58
3.4 Les parements 59
3.5 Principe de dimensionnement des murs en remblai renforcé 65
3.5.1 La stabilité interne 68
3.5.2 La stabilité externe 73
3.5.3 Stabilité globale 75
3.6 Conclusion 76
Chapitre4 ETUDE DE CAS « POSTE BENI-SAF2 » 77

4.1 Introduction 78
4.2 Présentation du cas (poste Beni-saf2 wilaya de Ain-Temouchent) 78
4.3 Choix de la solution 80
4.4 Reconnaissance du sol 80
4.5 Prédimensionnement du massif 81
4.6 Calcul statique 85
4.6.1 Stabilité interne 85
4.6.2 Stabilité externe 90
4.6.3 Stabilité globale 94
4.7 Interprétation des résultats 98
4.8 Mise en œuvre 99
Mise en place des couches 100
4.9 Comparaison des devis quantitatifs et estimatifs 106
4.10 Interprétation des devis quantitatifs et estimatifs 107
4.11 Conclusion 108
Conclusion générale 109
Les références bibliographiques XII
Les sites bibliographiques XIV

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Liste des symboles :

Fs Coefficient de sécurité.

ELU Etat limite ultime.

ELS Etat limite deservice.

Faγ La force de poussée(KN/m)

Kar Le coefficient de poussée des terres

ɤ Pois volumique du sol (KN/m3)

T_{max} L'effort de traction maximum(KN/m)

σv La contrainte verticale(KN/m²)

Pr La résistance à l'arrachement du renforcement(KN/m)

Sv L'espacement vertical entre les lits de renforcement (m)

Tal la résistance à la traction du géosynthétique à long terme (KN/m)

Tult la force ultime de tension d'un géosynthétique.(KN/m)

R_{Fid} Le coefficient de réduction des agressions

R_{Fcr} Le coefficient de réduction lié au fluage.

R_{Fd} Le facteur de réduction de la durabilité

W la largeur du matériau de renforcement

σ'_z La contrainte effective verticale (KN/m²)

q_s La surcharge(KN/m²)

Φi l'angle de frottement décrivant le pic de résistance au cisaillement

T la force de tension à la profondeur

σ'_v *La* contrainte effective verticale(KN/m²)

L_r La longueur de renforcement à l'intérieur de la zone active(m)

Le La longueur de renforcement à l'intérieur de la zone passive (m)

Tp Efforts au point d'attache au parement

e l'excentricité du chargement

C La cohésion des sols (Kpa)

N Le nombre de couche

σH La contrainte horizontale KN/m2

Fa La force de poussées

Introduction générale et présentation du sujet du projet de fin d'études

Les nouveaux défis de constructions réclament avec force une réelle prise en charge des différents aspects liés au dimensionnement et la sécurité des ouvrages. L'étude de la stabilité de ces ouvrages constitue une des problématiques majeures à laquelle l'ingénieur est souvent confronté.

Les méthodes de renforcement des sols se sont considérablement développées à travers le monde dans le domaine de la construction géotechnique. Ils se sont progressivement imposés comme des méthodes à la fois simples à la mise en œuvre et économiquement avantageuses par rapport à d'autres solutions plus traditionnelles (mur de souténement, clouage, traitement par colonnes, palplanche ...) qui permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des sols enfonctiondu type d'ouvrage que l'on cherche à réaliser.

Parmi les techniques de renforcement, les géosynthétiques semblentêtre les plus intéressants ; Ils existent depuis plusieurs siècles, et étaient connus sous forme de textile à base de plante, étant utilisées dans de multiples fonctions afin de résoudre des problèmes liés au domaine de la construction, car ces produitsoffrent au sol une résistance qui permet d'augmenter la stabilité d'un ouvrage.

Au fil des années, ces géosynthétiques se sont développés en plusieurs catégories de produits.

Il existe une variété de produits faites à base de polymère ; parmi elles on trouve les géotextiles, les géosynthétiques bentonitiques, les géomembranes, les géocomposites, ou encore les géogrilles.

Ces produits assurent de multiples fonctions telles que : les fonctions de filtrations, drainage, séparation, renforcement, mais aussi la fonction d'étanchéité ; Ils permettent ainsi d'améliorer les différents paramètres tels que l'amélioration de la capacité portante d'un sol, par exemple augmenter la durée de vie des autoroutes oul'amélioration des caractéristiques mécaniques d'un remblai par rapport à la stabilité.

Ces procédés sont devenus populaires dans le monde entier grâce à leur performance,leur cout,leur esthétique et leur contribution à la protection de l'environnement, ce qui n'est pas le cas des méthodes traditionnelles qui restent largement utilisées dans notre pays.

Un peu d'histoire

Le principe de renforcement des sols par des matériaux naturels est une technique très ancienne dans le génie civil, qui existe depuis des milliers d'années, le renforcement s'effectuait à base de produits naturels existant dans les différentes régions, des sarments de vigne, des branches de bambou, des papyrus, des tamarix et autres fibres furent utilisées pour renforcer des briques argileuses et des sols granulaires.

Figure 0-1 Tamarix (marques.truffaut.com, s.d.)

Figure 0-2 Bambou (Wikipedia de.wikipedia.org, s.d.)

Figure 0-3 Papyrus (gammvert.fr, s.d.)

Au temps des pharaons cette méthode a été adapter pour la stabilisation des chaussées ou des remblais d'argile par renforcement en papyrus ou lors de la construction de la grande muraille de chine où on avait recours à cette méthode par un mélange d'argile et de tamarix. (Riaz, 2011)

Dûr-Kurigalzu était une ville de la Mésopotamie antique, dont les ruines se trouvent sur le site actuel d''Aqar Qūf, localisé à 30 km à l'ouest de Bagdad, fondée par un roi de la dynastie kassite de Babylone nommé Kurigalzu, vers 1400 av. J.-C. (www.wikipedia.com, s.d.)

Figure 0-4 Iraq - Aqar Quf (Ancient : Dur Kurigalzu) (cemml.colostate.edu, s.d.)

Renforcement en papyrus

Papyrus

Figure 0-5 Remblai en argile Dur-Kurigalzu (Wikipediaen.wikipedia.org , s.d.)

Rapport-Gratuit.com

Renforcement à l'aide d'un mélange d'argile et de tamarix

Figure 0-6 La Grande Muraille de Chine (futura-sciences.com, s.d.)tamarix

Au fil des siècles, ces fibres naturelles se sont développée en textile grâce a la recherche et la technologie, ceux qui ont donné naissance à des produits appelés géosynthétiques, ces derniers se sont diversifié ont plusieurs catégories de géosynthétiques issus de polymères, de plus ils font partie des matériaux de modification des sols les plus polyvalents et les plus économiques.

Problématique

Les problèmes de stabilitédes solssont très complexes lors de l'élaboration d'un projet, la majorité de ces problèmes sont : soit naturels ou anthropiques influencés par de multiples risques.

Les géosynthétiques sont des méthodes de renforcement qui se développent dans le monde qui sont peu utilisés, mais très efficace et économique, qui permette de répondre à des problèmes récurrents en ce qui concerne la stabilité des sols (le renforcement de l'entrée d'une chaussée route, autoroute, voies ferrées, infrastructures, ouvrages hydrauliques, batiments…etc).

Les problèmes géotechniques sont divers et nécessitent une prise en charge rapide, efficace et surtout à moindres couts. Les problèmes financiers

de notre pays se font sentir avec la baisse des entrées par les éxportations. Un certain nombre de cas d'instabilité géotechnique ont été recensés dans la région, d'où l'utilisation des géosynthétiques serait plus favorable.

1.1. Exemple de chaussées

Route dégradée entre Remchi et Zenata,à cause d'une instabilité de talus (Photos prises le 06/03/2019).

Route dégradée et fissurée completement de safsaf en allant vers Chetouane de la wilaya de Tlemcen, Photos prises le 01/06/2019.

1.2. Exemple de talus routier

Voici un exemple d'un glissement de terrainprovoqué certainement par quatre pylônes. La solution préconisée était la stabilisation par un mur de

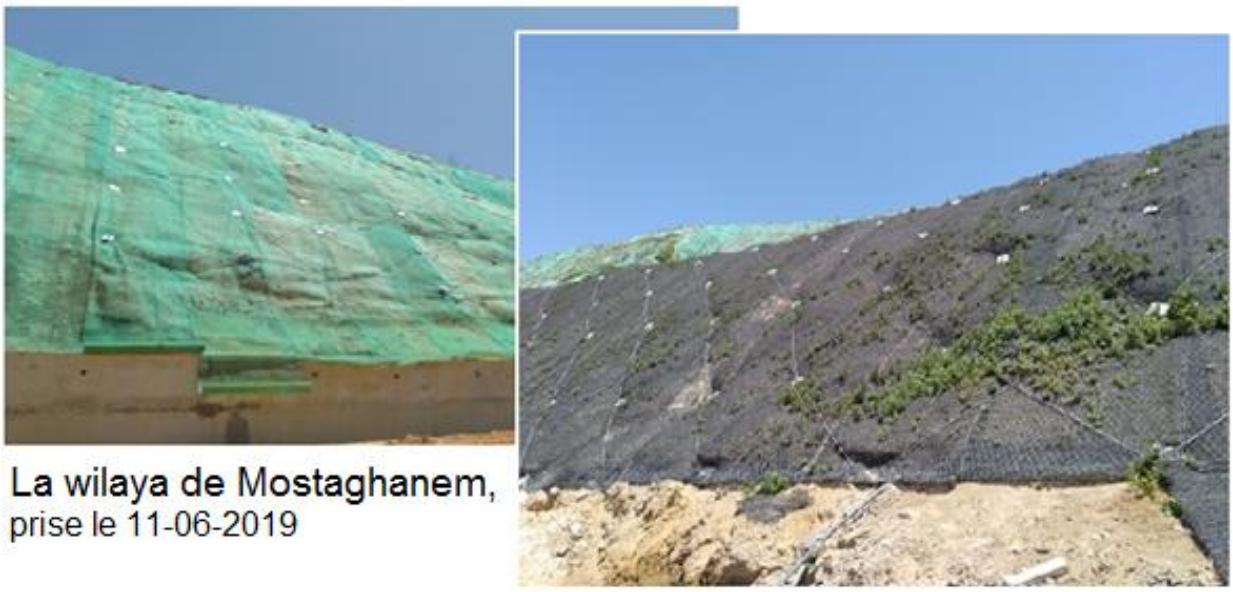
Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

soutènement en béton armé. L'utilisation des géosynthétiqes pourrait être une bonne alternative, surtout par rapport aux aspects financiers. Les photos ci-dessous ont été Prises le 06/03/2019.

A l'entrée au poste de Beni-Saf 2, sur la côte de la wilaya d'Ain-Temouchent, Prises le 06/03/2019

1.3. Exemple d'un écran en remblai renforcé par des bandes de géogrilles

Il s'agit d'un mur en remblai renforcé par des bandes de geogrilles et géocomposites de la wilaya de Mostaghanem et ce à l'entrée du port. Photo prise le 11-06-2019



La wilaya de Mostaghanem, prise le 11-06-2019

Motivation de la thématique

Dans ce mémoire, nous allons exposer une étude qui concerne les géosynthétiques afin de mieux appréhender ces produits qui restent mal connus et peu utilisés dans notre pays et montrer les avantages qu'offrent ces produits en matière d'économie, de temps et ses actions positives sur l'environnement tout en présentant les méthodes d'application et les techniques de dimensionnement de la stabilité d'une pente.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, dans l'objectif estde traiter, la stabilisation et le renforcement d'une pente qui se situe à l'entrée du poste Béni-Saf 2 de la voix RN 22 Tlemcen en allant vers Oran de la wilaya de Ain-Temouchent.

On a proposé une solution économique et simple à la mise œuvre qui consiste à substituer le mur de soutènement et le remplacer par des massifs en remblais renforcés par des géosynthétiques avec un retour au parement pour la partie extérieure du mur.

Objectifs

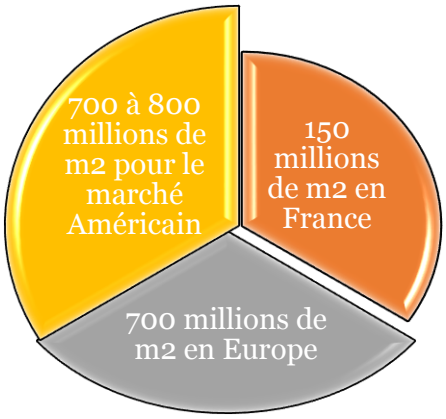
Le marché des géosynthétiques est fort et rapide en croissance qui ne cesse de ceux développés dans le monde, en raison de l'utilisation continue des géosynthétiques, afin de remplir des fonctions de renforcement ou de stabilités, appliquées dans de multiples types d'ouvrages de génie civil, tels que les ouvrages de soutènement ou des bases de remblai ou la structure d'une chaussée.

La technique de renforcement des sols est une des méthodes de construction basée sur l'association d'un remblai compacté et d'armatures synthétiques liées à un parement. L'alternance de couches de remblais et de bandes d'armatures synthétiques bien réparties horizontalement conduit au développement d'efforts d'interaction et donne naissance à un matériau composite à part entière apte à résister à son propre poids et aux actions qui lui sont appliquées au long de la durée de service de l'ouvrage. Chacun des éléments d'une structure en terre armée à une influence directe sur sa stabilité et ses performances.

Marché mondial

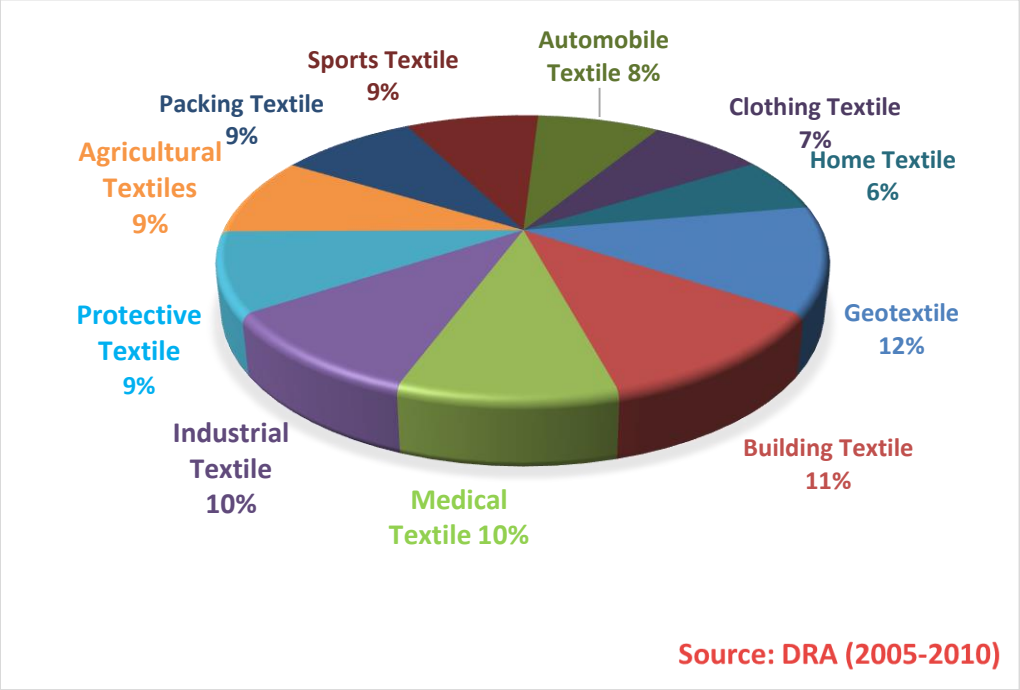
Le marché des géosynthétiques connaît une forte croissance en raison de l'utilisation continue des géosynthétiques et de la diversité de ses produits qu'elle propose pour tout type d'application dans le domaine de la construction ou autres et de sa rentabilité. (Zornberg, 2007).

Pour cela voici une petite comparaison de l'utilisation de ces produits dans le monde :



Le marché des géosynthétiques est cependant plus dynamique en Amérique du Nord où le marché progresse de 5 à 10% par an et dans certaines régions du monde comme en Inde où la croissance se situe entre 15 et 20%. (https://www.revue-ein.com/ CFG, s.d.)

Consommations des géotextiles dans le monde



Les géotextiles représentent 12% de parts de marché dans le domaine des textiles.

Concernent le continent Africain

Le Maroc est classé 3ème pays africain au niveau de la consommation et de l'utilisation des géosynthétiques, notamment dans les autoroutes, les chemins de fer et dans les stockages d'eau.

l'utilisation de ces géosynthétiques dans les autres pays du continent tel que l'Algérie reste très limitée. (https://www.faapa.info/, s.d.)

Avantages des géosynthétiques

Le Développement Durable repose sur trois piliers qui résident dans les aspects fondamentaux : **écologique (ou environnemental), économique et social.**

Les principaux avantages des matériaux géosynthétiques, en ce qui concerne le développement durable se résume dans la figure suivante :

Figure 0-7 Les principaux avantages des matériaux géosynthétiques

Méthodologie de travail

Le travail réalisé dans ce mémoire est composé de quatre chapitres répartis avec une introduction générale pour présenter le travail effectué, un résumé et une conclusion générale.

- Un premier chapitre présentant une étude bibliographique sur les différents types de géosynthétiques.
- Un second chapitre consacré sur le renforcement de sol dans les différents ouvrages.
- Un troisième chapitre se basant sur le comportement des ouvrages en terre armée (types de renforcement, types de parement, la mise en œuvre et les modes de rupture), suivant des méthodes de calcul selon la norme américaine L'AASHTO.
- Un quatrième chapitrecontenant une présentation du site étudier suivant d'une analyse manuel vis-à-vis de la stabilité interne, externe et une application numérique du code GEOSTUDIO par la méthode de BISHOP simplifiée pour la vérification de la stabilité globale, ainsi qu'une estimation des couts et la mise en œuvre.

Plan de travail

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
1. Choix du thème										
2. Validation du choix										
3. Recherche bibliographique, documentaire										
4. Approfondir les recherches										
5. Réalisation d'une fiche de lecture										
6. Définition de la problématique et détailler les objectifs										
7. Elaboration du plan de travail										
8. Validation par le tuteur										
9. Collète de données										
10. Analyse des données										
11. interprétation des résultats										
12. Validation par le tuteur										
13. Rédaction										
14. Relire par moi										
15. Relire par un proche										
16. Faire des corrections										
17. Relire par le tuteur										
18. Validation par le tuteur										
19. Dépôt du mémoire										
20. Préparation de la soutenance orale										

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre1 NOTIONS SUR LES GEOSYNTHETIQUES

Rapport-Gratuit.com

1.1 Introduction

Les sols sont considérés comme instables à cause de leurs propriétés géotechniques, créant ainsi de multiples problèmes techniques et économiques. Pour y remédier à ces problèmes d'instabilité, la solution est d'augmenter leur performance tout en améliorant la stabilité mécanique.

Ces produits sont employés dans les ouvrages géotechniques depuis plusieurs années, leurs domaines d'application sont très vastes, car ils peuvent être installés dans des ouvrages en terre pour construire des talus renforcés ou des ouvrages de soutènement ou à la base d'un remblai, et aussi sur des talus d'ouvrages hydrauliques ou d'installations de stockage de déchets.

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.

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. (Laurent BRIANÇON, 2017).

Avant toute chose, nous allons commencer ce premier chapitre par une présentation globale sur les géosynthétiques et leurs fonctions dans l'amélioration des sols.

1.2 Historique

La première application d'un géosynthétique fut en 1926, en Caroline du sud, ou les premiers tronçons de route utilisés des tissus de coton, le résultat fut considéré convaincant dès les première utilisations, ainsi, cela a donné naissance à un marché pour les produits synthétiques.

Puis, une deuxième avancée dans ce domaine fut lors de la tempête de 1952-53 en Hollande, il a fallu, développer d'autres techniques d'ingénierie pour la reconstruction des digues endommagées par les inondations qui ont détruit une bonne partie des Pays-Bas, c'est là ou sont nés les géotextiles ou textiles tissés, misent au point pour le remplacement des filtres granulaires.

Par la suite, la fonction de filtration est née et a permis aux géosynthétiques de prendre de l'essor vers un développement de nouvelles gammes de produits, spécifiquement orientés vers une utilisation en génie civil. (MAMERI KAHINA, 2015).

La troisième avancée fut vers les années 1960, avec l'apparition des géomembranes. C'est une innovation pour la construction hydraulique, car ce sont des produits imperméables. Aujourd'hui, les géomembranes sont considérées dans le domaine d'étanchéité comme incontestable dans la construction des barrages et réservoirs, tout ce qui est hydraulique remplaçant petit à petit les matériaux d'étanchéité traditionnels (béton, argile, ciment), et vers les années 1980, ce fut l'arrivée des géocomposites puis le développement des produits apparentés (tels que les géogrilles de renforcement, les géosynthétiques bentonitiques…etc). (TOUZE-FOLTZ, 2016).

A ce jour, l'emploi de ses produits dans le génie civil ne cesse d'augmenter et s'étendre dans divers secteurs (l'agriculture, l'industrie, l'environnement). En Algérie, ses produits ne cessent de croitre et deviennent de plus en plus présents dans la plupart des ouvrages géotechniques.

1.3 Présentation des géosynthétiques

Un géosynthétique est défini comme étant un produit plan fabriqué à partir d'un matériau polymère, utilisé avec le sol, la roche, la terre ou tout autre matériau lié à la géotechnique faisant partie intégrante d'un projet, d'une structure ou d'un système de génie civil. (ASTM, 1997).

Les principaux polymères utilisés pour la fabrication de géosynthétiques sont :

- Le polyéthylène (PE) ;
- Le polyamide (PA) ;
- Le polyester (PET) ;
- Le polypropylène (PP) ;
- le polyéthylène haute densité (PEHD).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Ces polymères ont des propriétés différentes et le choix d'un géosynthétique peut être motivé dans certains cas par le type du polymère. (Laurent BRIANÇON, 2017)

Il existe un certain nombre de géosynthétiques, pour des raisons pratiques, on est amené à regrouper ces géosynthétiques en deux grandes familles et ce en se basant sur leur mode de fabrication et leur rôle dans un ouvrage. Ainsi, onretrouve :

- Les produits perméables

Les produits perméables ont pour caractéristique commune d'être perméables aux fluides ou dont l'étanchéité n'est pas la fonction principale telle que les géotextiles et les produits apparentés aux géotextiles qui sont principalement : les géogrilles, les géonets, les géofilets, les géoconteneurs.

- Les produits imperméables

Les produits imperméables dont la fonction principale est l'étanchéité aux fluides. On distingue dans cette catégorie, les géomembranes et les produits apparentés aux géomembranes (les géosynthétiques bentonitiques). (BORDES, 1995)

L'association de ces deux familles de produits forme les géocomposites.

1.3. 1 Les produits perméables

Dans cette catégorie de produits perméables, on va citer quelques définitions :

a. Géotextiles

Les géotextiles sont des produits très largement utilisés,définis par l'ASTM comme étant des géosynthétiques perméables illustrés dans la **Figure1-1**et constitués de nappes continues de fibres ou filaments tissés, non-tissés, tricotés ou thermo-soudés.

Figure1-1 Les géotextiles

Géotextile non tissé (GTX-N)

Les géotextiles non tissés sont faits de fibres, de filaments ou d'autres éléments orientés directionnellement ou de façon aléatoire. Ils sont liés de façon mécanique, thermiqueou chimique. Ils existent sous deux formes : thermocollé et aiguilleté, comme le montre la**Figure1-2**.(10318-1:(fr), 2015)

Figure1-2 Géotextiles non-tissés (aiguilletés, thermocollés). (Laurent BRIANÇON, 2017)

Géotextile tissé (GTX-W)

Les géotextiles tisséssont des produits confectionnés par entrelacement, habituellement à angle droit. Ils sont constitués de deux ou de plusieurs faisceaux de fils, de filaments, de bandelettes ou d'autres éléments, comme illustrés dans la **Figure1-3.**(10318-1:(fr), 2015)

Figure1-3Géotextiles non-tissé (Monofilament, bandelette, multifilaments (Laurent BRIANÇON, 2017)

Géotextile tricoté (GTX-K)

Les géotextiles tricotés sont des produits par entrelacement d'un ou de plusieurs fils, de filaments ou d'autres éléments, voir la**Figure1-4**. (10318-1:(fr), 2015).

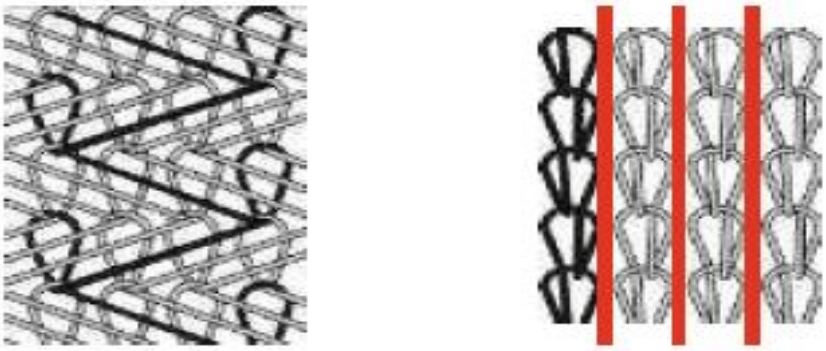


Figure1-4 Géotextiles tricotés (Laurent BRIANÇON, 2017)

b. Produits apparentés aux géotextiles

Un certain nombre d'autres géosynthétiques sont disponibles, regroupés sous l'appellation de « produits apparentes aux géotextiles ». Ils représentent tous les produits perméables qui ne sont pas des géotextiles

On distingue dans cette catégorie de produits apparentés aux géotextiles :

Géogrilles

Les géogrilles sont dotées d'une structure plane à base de polymère, constituée par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistant à la traction et pouvant être assemblées par extrusion, par collage ou par entrelacement, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants.Les géogrilles sont le plus souvent utilisées pour le renforcement de sol. (10318-1:(fr), 2015)

Une géogrille peut-être mono-axiale, bi-axiale, ou tri-axiale, illustrée dans la **Figure1-5**ci-dessous :

- **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, (Samir, 2012)
- Tria-xiale.

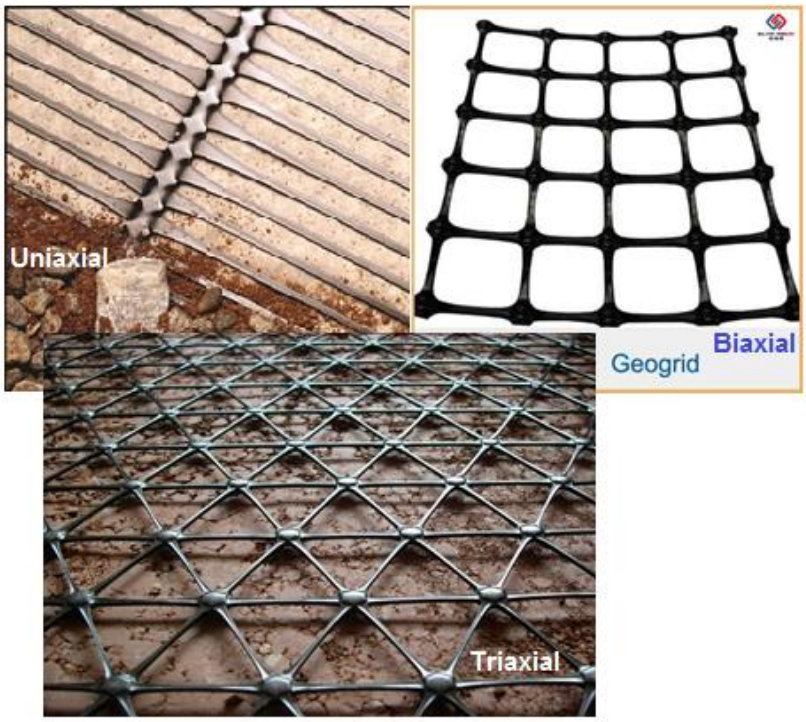


Figure1-5 Géogrilles Tensar (geoturf.com, s.d.)

Géoespaceurs (genets)

Le géospaceur est un géosynthétique de structure polymère tridimensionnelle utilisée dans lesapplications de la géotechnique et du génie

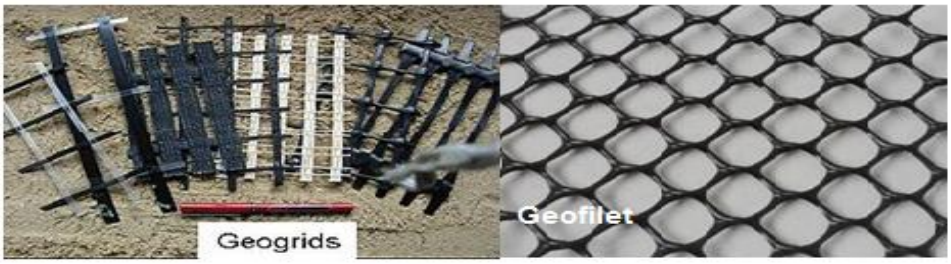
civil permettant de maintenir l'espace entre deux matériaux, notamment en vue d'un drainage.(10318-1:(fr), 2015)

Géofilets

Le géofilet est un géosynthétique constitué d'ensemble de tiges parallèles et superposées entièrement reliées à d'autres ensembles similaires selon des angles variables. (10318-1:(fr), 2015)

Géoconteneurs

Il s'agit d'un géosynthétique de structure tridimensionnelle permettant le confinement, la stabilité et le renforcement d'un matériau de remplissage (remplis de sol ou d'un autre matériau). (10318-1:(fr), 2015), la **figure 1-6** représente les différents types de produits apparentés.



(a) Biplanar geonets

(b) Triplanar geonets

(c) Other geonets (boxshaped channels and protruding columns)

Figure1-6 Les produits apparentés aux géotextiles(dzly-buildingmaterials.fr, s.d.)

1.3. 2 Les produits imperméables

Les produits imperméables sont regroupés dans cette catégorie suivant la fonction principale qui est l'étanchéité aux fluides tels que les géomembranes ou les géocomposites bentonitiques.

a. Géomembranes

Une géomembrane est un géosynthétique à très faible perméabilité est bien adaptée au génie civil. Son utilisation est très simple, et la matière utilisée dans la géomembrane est mince et souple, et très étanche qui est utilisée comme barrières contre les fluides. Une géomembrane qui est illustrée dans la**Figure1-7**est étanche au liquide même sous des déformations de service, principalement en traction.

Figure1-7 Les géomembranes (sealeco.com, s.d.)

On distingue deux types de géomembranes :

Géomembrane bitumineuse

Une géomembrane bitumineuse est un produit de structure assemblée en usine constituée de géosynthétiques. Se présentant sous la forme d'une feuille et dans laquelle la fonction d'écran est essentiellement assurée par du bitume, comme le montre la **Figure1-8**ci-après. (10318-1:(fr), 2015)

Figure1-8 Une géomembrane bitumineuse (coletanche.com, s.d.)

Géomembrane de synthèse

Une géomembrane de synthèse est un géosynthétique permettant d'assurer la fonctiond'étanchéité. Elle est constitutée de polymère, composé principalement d'élastomère et de thermoplastique. Les résines thermoplastiques les plus utilisées sont le polyéthylène haute densité (PEHD), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC). (Lambert, 1997)

b. Les produits apparentés aux géomembranes

Les produits apparentés aux géomembranessont les géosynthétiques bentonitiques.

Géosynthétique bentonitique

Les géosynthétiques bentonitiques sont des produits de structure assemblée en usine, formés de géosynthétiques, se présentant d'un matériau composite étanche sous la forme d'une feuille et dans laquelle la fonction d'écran est essentiellement assurée par de l'argile. (10318-1:(fr), 2015)

Il existe deux types de géosynthétiques bentonitiques illustrés dans la **Figure1-9** suivante :

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

Figure1-9 Produit apparentés aux géomembranes (benthoniques) (hxgeos.fr, s.d.)

1.3. 3 Géocomposites

Les géocomposites sont des produits composés de deux matériaux ou plus, dont au moins l'un des composants est à base de géosynthétique. Afin d'assurés plusieurs fonctions dans une structure, la plupart des géocomposites

sont utilisés dans les applications de drainage et de confinement des déchets. (ASTM, 1997). Voici quelque combinaison commune ; illustrée dans la**Figure1-10.**

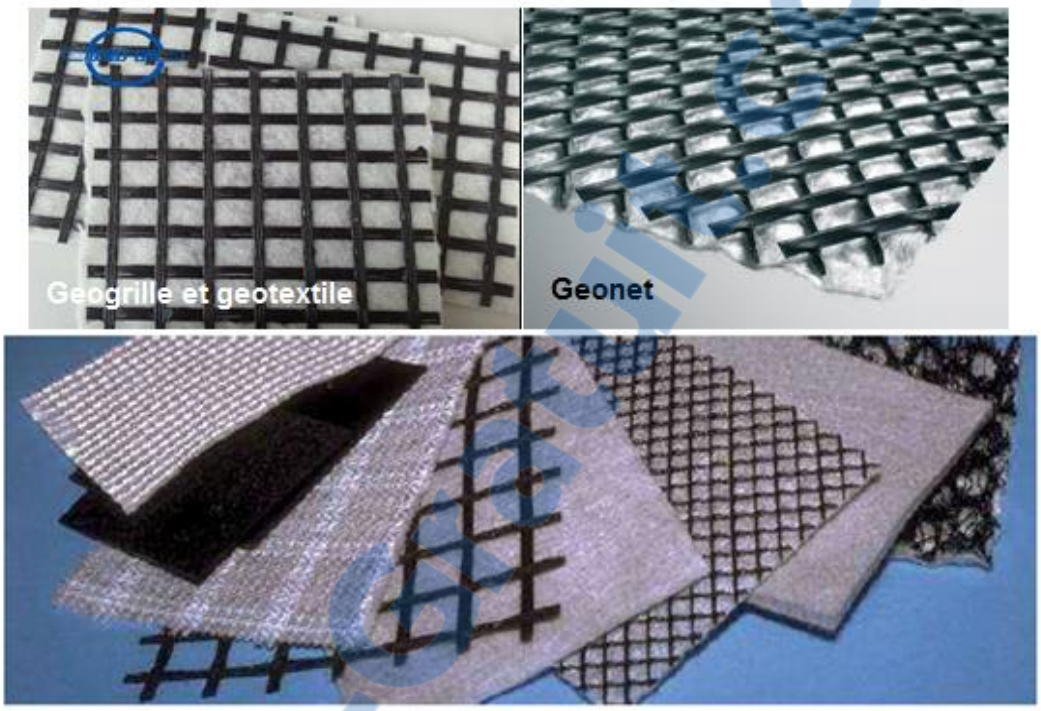


Figure1-10 Diffèrent types de géocomposites(fr.geogridchina-sp.net, s.d.) (archiexpo.fr, s.d.) (Laurent BRIANÇON, 2017)

Les principaux types de géosynthétique sont résumés et présentés dans la **Figure1-11**suivante :

Rapport-Gratuit.com

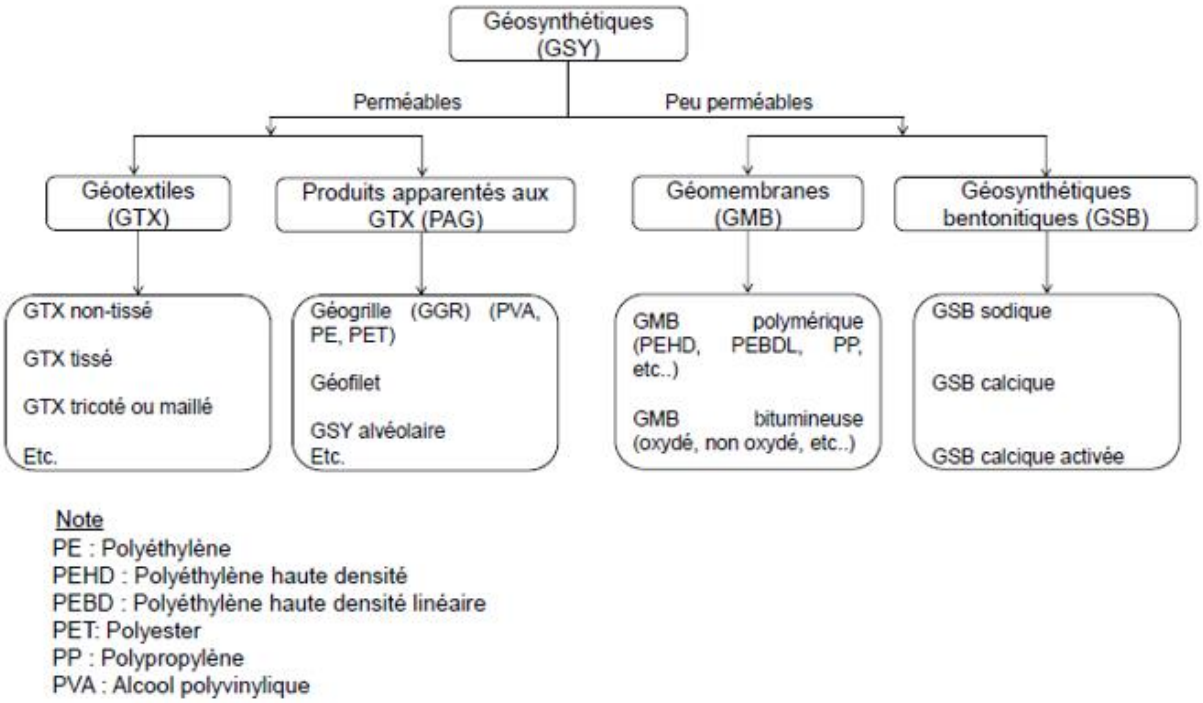


Figure1-11 Les principaux types de géosynthétiques (adapté de la norme NF EN ISO Afnor 2015) (10318-1(Fr), 2015)

1.4 Principales caractéristiques des géosynthétiques

Ces produits synthétiques sont définis par leurs caractéristiques mécaniques, physiques, hydrauliques,obtenus à partir des essais normalisés, identifiés par des normes internationnales dutype ISO ou européennes du type EN ou encore du type ASTM. ((CFG), 2015). Les principalescaractéristiquesdes gésosynthétiques sont récapitulées dans le**Tableau 1-1** suivant :

Caractéristiques physiques	Caractéristiques mécaniques	Caractéristiques hydrauliques
L'épaisseur La masse surfacique Le type de fabrication : tissé, non tissé, tricoté, aiguilleté… Le type de polymère polypropylène, polyéthylène, polyester… La densité	Résistance à la rupture L'allongement à la rupture Le poinçonnement statique Le fluage Résistance à la déchirure Résistance à la fissuration L'allongement au seuil d'écoulement	Perméabilité normale au plan. Capacité de débit dans leur plan. L'ouverture de filtration. Résistance à la pénétration de l'eau La souplesse

Tableau 1-1 Propriétés principales des géosynthétiques.(TABTI, 2016)

1.5 Fonction et applications

Les géosynthétiques comprennent une variété de matériaux en polymères synthétiques spécialement fabriqués pour une utilisation dans les domaines du génie civil, la protection de l'environnement, les ouvrages hydrauliques et de transport.

Pour un géosynthétique, on distingue six fonctions principales suivantes : Drainage, Filtration, Séparation, Renforcement, Protection, Contrôle de l'érosion, Etanchéité.

Drainage

Le géosynthétique agit comme un drain pour conduire les écoulements d'eaux pluviales, souterraines ou de fluides dans les sols moins perméables. (MAMERI KAHINA, 2015), la fonction de drainage peut remplir de multiples rôles tels que :

- Rabattre les nappes ;
- Contrôler les écoulements intermittents ;

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Diminuer et maitriser les pressions d'eau ;
- Accélérer les phénomènes de consolidation ;
- Evacuer les eaux de ruissellement.

La fonction de drainage est toujours associée à celle de filtration, afin d'assurer l'efficacité des systèmes de drainage qui a pour rôle de recueillir et d'évacuer les débits collectés. (Laurent BRIANÇON, 2017).

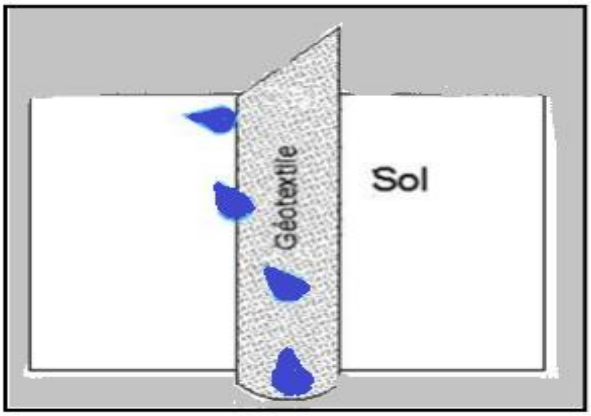


Figure1-12 Fonction de drainage (MAMERI KAHINA, 2015)

Filtration

Le rôle de filtration du géosynthétique a pour objectif de retenir les éléments du sol tout en laissant passer l'eau. Cette fonction est souvent associée dans les systèmes de drainages ou le géosynthétique doit permettre le passage de l'eau de la zone à drainer vers le drain, tout en évitant la contamination du drain par des particules fines du sol environnant, ainsi que l'érosion régressive du terrain à l'amont du drain cela permet de créer un auto-filtre dans le sol en amont. ((CFG), 2015).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

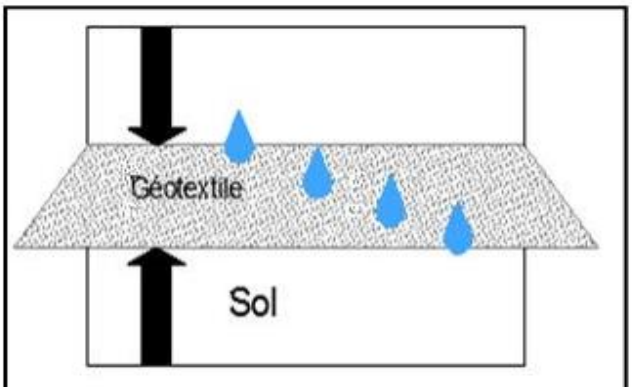


Figure1-13 Fonction de filtration (MAMERI KAHINA, 2015)

Séparation

Le géosynthétique séparent deux couches de sol de granulométrie différentes, par exemple des géotextiles sont utilisés pour empécher les matériaux d'une couche argileuse de pénétrer dans les sols mous de la couche de fondation d'une route. (Laurent BRIANÇON, 2017).

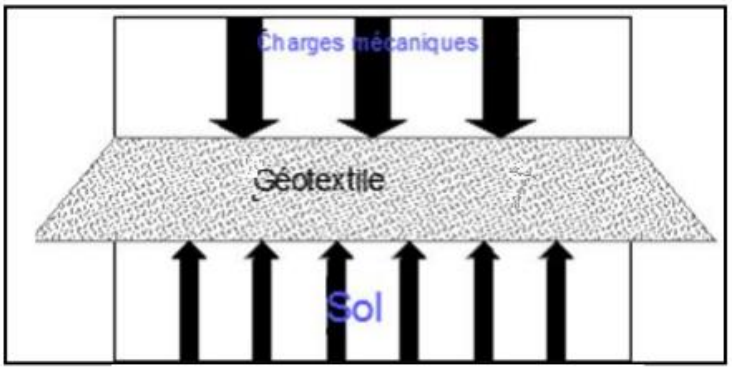


Figure1-14 Fonction de séparation (MAMERI KAHINA, 2015)

Protection

Le géosynthétique de protection a pour fonction d'empêcher ou limiter les endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné, en utilisant un géotextile ou un produit apparenté. ((CFG), 2015)

Par exemple les géosynthétiques sont utilisés pour le renforcement des couches de béton bitumineux et comme couches de protection, pour éviter le poinçonnement des géosynthétiques par les pierres du sol adjacent, ou par les déchets ou les granulats drainants durant l'installation ou en service.(MAMERI KAHINA, 2015)

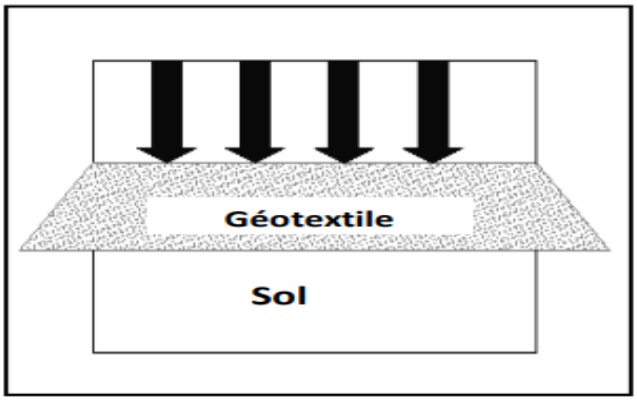


Figure1-15 Fonction de protection(MAMERI KAHINA, 2015)

Renforcement

Le géosynthétique de renforcement intervient comme élément de renfort au sein d'une masse de sol ou en combinaison avec le sol pour produire un composite ayant des propriétés en déformation et une résistance améliorées par apport à un sol non renforcé (MAMERI KAHINA, 2015). Par exemple, les géotextiles et les géogrilles sont utilisés pour augmenter la résistance à la traction d'une masse de sol afin de créer des pentes verticales ou subverticales telsque les murs en sol renforcé. ((CFG), 2015)

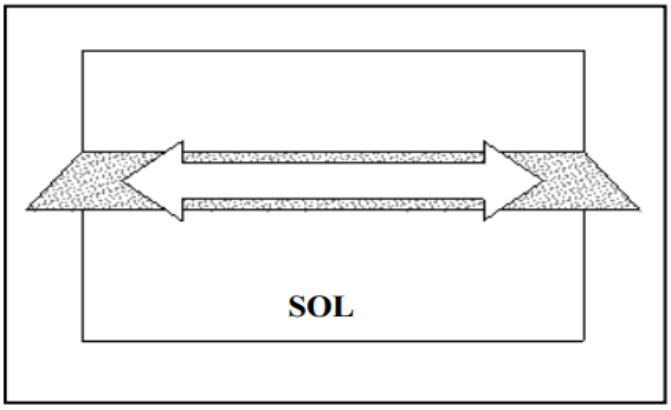


Figure1-16 Fonction de renforcement (MAMERI KAHINA, 2015)

Contrôle anti-érosion

Le géosynthétique a pour but de réduire l'érosion des sols, et d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface, causée par l'impact des pluies et les eaux de ruissellement, une méthode simple pour diminuer cette érosion est de végétaliser la pente.

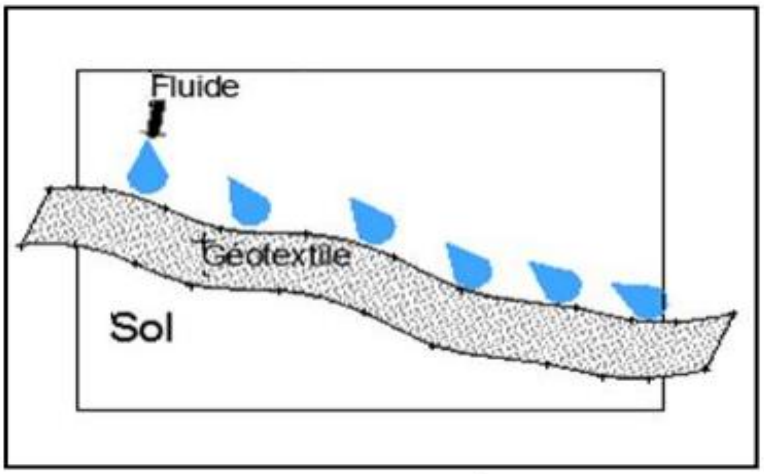


Figure1-17 Fonction anti-érosion (MAMERI KAHINA, 2015)

Le **Tableau 1-2**ci-dessousrésume les différentes fonctions (fonction de drainage, de protection, de renforcement, de séparation, d'étanchéité, et résistance à l'érosion) assurées par les principaux géosynthétiques

	Géotextile	Géoespaceur	Géogrille	Géoconteneur	Géomembrane	Géosynthétique bentonitique
Étanchéité					x	x
Protection	x			x		
Drainage	x	x				
Filtration	x		x	x		
Séparation	x					
Renforcement	x		x	x		
Résistance à l'érosion	x	x		x		

Tableau 1-2 Fonctions principales assurées par les géosynthétiques élémentaires. ((CFG), 2015)

1.6 Principaux domaines d'application

Les domaines d'application des géosynthétiques sont très variés dans le domaine du génie civil, parmi ses applications, en retrouvent principalement les ouvrages hydrauliques, des routes et infrastructures linéaires, des bâtiments, des tunnels et ouvrages souterrains et enfin des ouvrages pour la

protection de l'environnement. (AFNOR, 2015)

Ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques comprennent essentiellement les réservoirs de stockage d'eau et barrages, des retenues d'altitude, des canaux et des couvertures flottantes de stockage d'eau potable dans lesquels les géosynthétiques sont surtout utilisés pour leur fonction d'étanchéité. D'autres types de fonctions de géosynthétiques comme la filtration, le drainage et le renforcement peuvent être également utilisés notamment dans les barrages en terre. Ou également l'utilisation des géosynthétiques pour la protection des berges de cours d'eau et des digues côtières contre l'érosion

Routes et infrastructures linéaires

Ces ouvrages regroupent l'ensemble des infrastructures de transports terrestres ou souterrains. Il s'agit principalement des voies ferrées, des chaussées de routes, des pistes d'aéroport et des tunnels et ouvrages souterrains. L'ensemble des fonctions des géosynthétiques est utilisé dans ces ouvrages. A titre d'exemple, les géosynthétiques de renforcement et de relaxation de contraintes sont souvent utilisés dans les chaussées pour la limitation de l'orniérage et le retard des remontées de fissures.

On peut également citer le géotextile de séparation (anti-contaminant) qui permet de préserver les performances des couches de forme en limitant la quantité de fines qui s'introduit dans ces couches de forme.

Bâtiments

La fonction de géosynthétique dans les bâtiments est principalement, la fonction de drainage qui est surtout utilisée pour drainer les flux de gaz ou d'eau. On peut citer par exemple le drainage horizontal des flux d'eau (remontées de nappes phréatiques par exemple) sous les dalles de béton. Par ailleurs, dans le cas de la construction de bâtiments sur des sites pollués, la fonction drainage (d'éventuels flux de gaz) peut être associée à la fonction étanchéité pour le confinement du sol chargé de matières polluantes.

Ouvrages pour la protection de l'environnement

Le géosynthétique a pour objectif principal d'éviter la contamination des sols,qu'il s'agisse de déchets solides ou liquides stockés dans des casiers.

Les géosynthétiques d'étanchéité, en l'occurrence les géomembranes et les géosynthétiques bentonitiques, sont ainsi utilisés pour jouer ce rôle de barrière aux pollutions, souvent en complément d'une étanchéité naturelle (argile existante, etc.). Dans ces ouvrages, les géotextiles de protection ou les géocomposites de protection-drainage sont souvent mis en œuvre sur la géomembrane pour la protéger du poinçonnementde granulats, et pour le drainage des lixiviats en fond et sur les flancs de casiers vers l'extérieur.

Le**Tableau 1-3**ci-après regroupe les rôles et application principaux des géosynthétiques :

Rôle du géosynthétique	Description	Ouvrage / application
Séparation	Eviter le mélange de deux sols ou matériaux de nature différente	Routes, autoroutes, voies ferrées,Pistes forestières…
Filtration	Maintien des particules de sol tout en autorisant la circulation de fluides	Routes, voies ferrées, barrages, Tranchées drainantes, protection deBerges / rivages …
Drainage	Collecte et transport des eaux ou d'autres fluides	Drainage sous dallage, structure BA, Remblai ou Installation de Stockage De Déchets (ISD) …
Etanchéité	Prévenir ou limiter la migration des fluides par une géomembrane	Bassins, ouvrages souterrains, Installations de Stockage de Déchets(ISD)…
Renforcement	Améliorer les propriétés mécaniques d'un sol (ou d'autres matériaux) en utilisant les propriétés de résistance/déformation d'un géosynthétique	Remblais (ferroviaires, routiers…) surSols compressibles, cavités où Inclusions rigides ; murs de Soutènement ; …
Protection	Limitation de l'endommagement localisé d'un élément ou matériau	Protection des géomembranes
Lutte contre L'érosion de surface	Eviter les mouvements du sol et autres particules de surface	Talus de déblai, pentes naturelles,Berges…
Anti-fissuration	Retarder les remontées de fissure en surface dans les structures de chaussées	Aéroports, chaussées…

Tableau 1-3Rôle et application des géosynthétiques (Huckert, 2014)

1.7 Point de vue environnemental

Le développement durable repose sur trois piliers ou aspect fondamentalécologique (ou environnemental), économique et social.Les géosynthétiques représentent des produits respectant l'environnement que ça soit d'un aspect économique ou écologique. Selon leur domaine d'application ces produits géosynthétiques permettent de répondre aux principesdu développement durable qui se repose sur trois piliers fondamentaux l'écologie (environnemental), social, l'économie, ces trois piliers sont illustrés dans la**Figure1-18.**

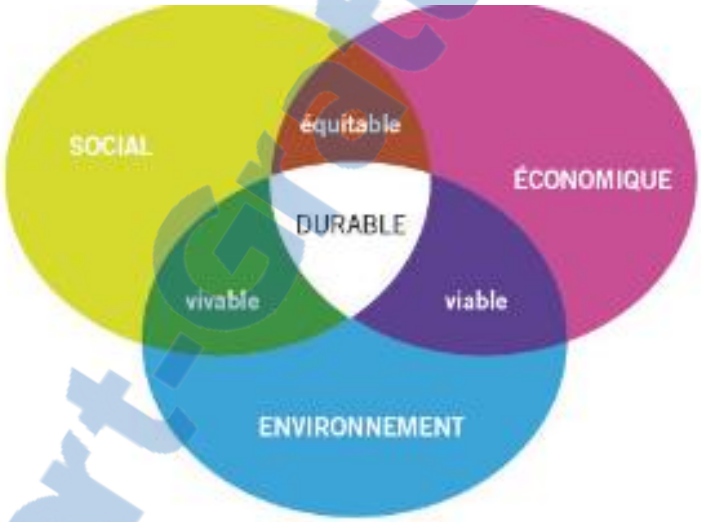


Figure1-18 Trois piliers du développement durable (https://www.mtaterre.fr, s.d.)

Les produits géosynthétiques et le développement durable

Selon leurs domaines d'application, les géosynthétiques permettent de répondre au principe de développement durable. Parmi les principaux avantages des produits géosynthétiques, on peut citer :

La préservation des ressources naturelles

Les géosynthétiques permettent de réduire les quantités de matériaux prélevés dans le milieu naturel (granulats, sable, argile).De ce fait, ils permettent de supprimer la couche sacrifiée à la base des pistes de chantier, des routes non revêtues...etc.

Par exemple grâce à l'utilisation d'un géotextile de séparation, ou grâce à la fonction de filtration du géotextile cela permet de remplacer le filtre granulaire dans les systèmes de drainage.

L'avantage qu'offrent ces produits est de pouvoir utiliser les sols du site, en substitution de matériaux élaborés dans les massifs renforcés des ouvrages de soutènement, et de substituer la couche d'argile pour la réalisation d'une étanchéité par des géomembranes ou géosynthétiques bentonitiques.

La protection des ressources en eau

La limitation des transferts de pollution est assurée par l'utilisation de géosynthétiques d'étanchéité et de drainage, grâce à cette fonction la protection des ressources en eau est protégée.

La réduction du temps de réalisation et des coûts de chantier

De nombreuses applications par géosynthétiques dans les ouvrages de génie civil en montrer deux aspects essentiels par rapport aux autres matériaux utilisaient habituellement tel que les couts de chantier seraient moins couteux plus économique et le temps est plus réduit et rapide lors de la réalisation. Parmi les nombreux exemples, on pourra citer le drainage vertical par géosynthétiques qui permet d'accélérer la consolidation des sols mous.

L'allongement de la durée de vie des ouvrages

Les géosynthétiques retarde la fissuration des chaussées, limite l'orniérage des pistes de chantier , empêchent le colmatage des couches drainant, permettant de préserver l'intégrité du ballast dans les voies ferrées, protègent les talus, les berges et les côtes en limitant l'érosion, permettant de sécuriser les infrastructures situées en zones à risques (effondrements potentiels, inondations) ainsi que les ouvrages critiques tels que les barrages. (Delmas, 2011).

Les avantages principaux des géosynthétiques sont décrits dans la **Figure1-19**ci-dessous.

Figure1-19 Avantages des géosynthétiques dans le développement durable(Delmas, 2011)

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous venons de présenter les différentes familles de géosynthétiques et leur fonction (fonction séparation, fonction filtration, fonction drainage, fonction renforcement, fonction étanchéité, contrôle d'érosion), adapté à n'importe quelle application dans le génie civil (Route/infrastructure, bâtiment, ouvrage hydraulique...). En plus leur utilisation s'inscrit dans le développement durable et le respect de l'environnement.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre2 RENFORCEMENT DES SOLS PAR LES GEOSYNTHETIQUES

2.1 Introduction

Grâce à des techniques créatives, il est désormais possible de construire sur tous types de sols, le savoir-faire des ingénieurs est mobilisé pour analyser, étudier, renforcer et consolider les sols.

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 étendus ou plus résistants. Les techniques de renforcement des sols proprement dites font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol.

Les développements technologiques actuels en matière de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économiques et plus respectueuses de l'environnement, 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.

Une nouvelle technique de construction de murs de soutènement qui s'est par la suite diversifiée, sous la forme d'un renforcement par armatures synthétiques disposées horizontalement et à intervalles réguliers par nappes géosynthétiques. (VILLARD Pascal, 2018)

Ce chapitre est consacréà la présentation de renforcement de sol dans les différents ouvrages en génie civil.

2.2 Géosynthétiques adaptés au renforcement

Les géosynthétiques les plus répandus dans les massifs de renforcements sont :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.2.1 Géogrilles

Structure plane à base de polymère constituée par un réseau ouvert et régulier résistant à la traction relié entre eux selon un motif régulier. Les ouvertures étant de dimensions supérieures à celles des constituants, cette structure est utilisée en contact avec le sol ou d'autres matériaux pour renforcer les fondations.

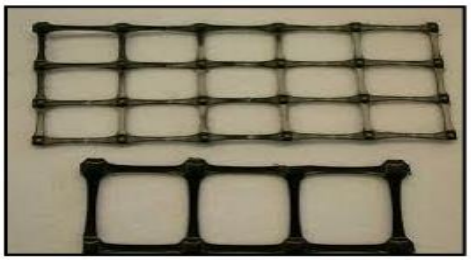


Figure 2-1 Les géogrilles (LCPC, 2003)

2.2.2 Géotextiles

Matière textile plane, perméable, et à base de polymère pouvant être tissé, non tissé ou tricoté, utilisée en contact avec le sol

Figure 2-2 Nappe de géotextile (LCPC, 2003)

2.3 Principe des sols renforcés

Le renforcement des sols est l'un des domaines récents et particulier de l'amélioration des sols, sont devenue l'une des techniques indispensable, dans les normes en ISO, la fonction de renforcement peut être définie comme étant "l'utilisation du comportement en résistance-déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction". (fiberetex, 2018)

Le géosynthétique agit comme élément de renfort au sein d'une masse de sol ou en combinaison avec le sol pour produire un composite ayant des propriétés en déformation et résistances par rapport à un sol non renforcé.

A titre d'exemple ; les géotextiles et les géogrilles sont utilisés pour augmenter la résistance à la traction et améliorer la stabilisation du sol et la capacité portante**Figure 2-3**d'une masse de sol afin de créer des pentes verticales ou subverticales (murs en sol renforcé). Le renforcement permet la

construction du remblai sur des sols mous.

C'est certainement, une solution rentable et sûre pour le renforcement des ouvrages de soutènement et des remblais sur sols compressibles.

Figure 2-3 Autoroute Est ouest tronçon Larbaatache –lakhadaria(TABTI, 2016)

2.4 Mécanismes de renforcement des sols

L'amélioration des sols ou leur renforcement s'effectue soit sur le sol en place, soit sur le sol rapporté, cas des remblais renforcés. Dans chacun des cas, on distingue l'utilisation ou non, d'inclusions sur la**Figure 2-4**d'après NF P 94210.

- Le renforcement par géosynthétique correspond à un renforcement par inclusion de sols rapportés.
- les géosynthétiques de renfort sont placés horizontalement entre deux couches de remblai.

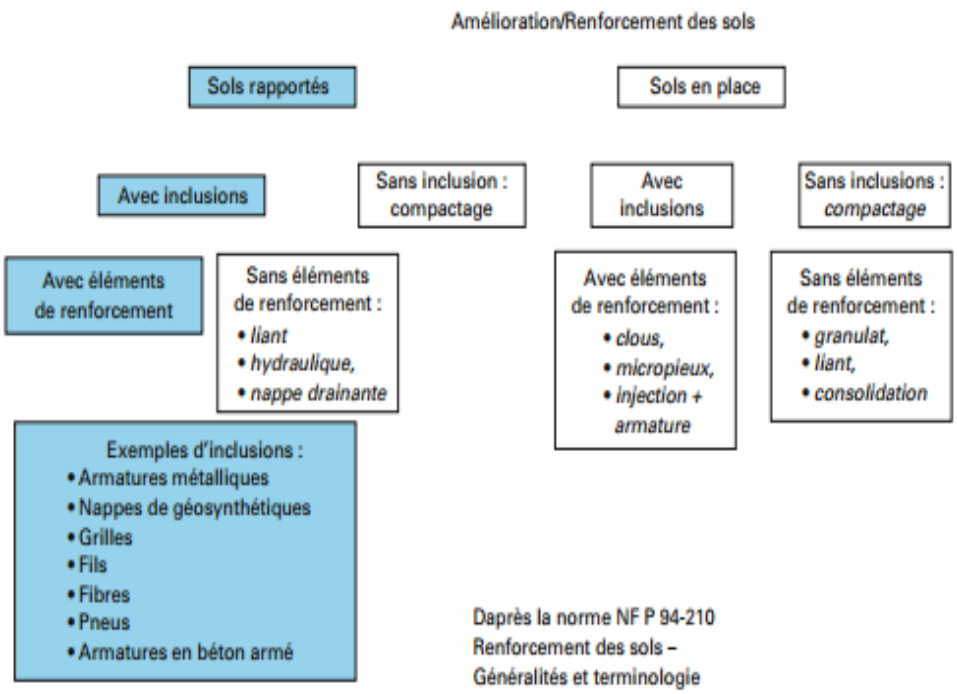


Figure 2-4 Renforcement et amélioration des sols d'après la norme NF P 94210

A titre d'exemple, lorsqu'un élément de remblai renforcé horizontalement est soumis à une charge verticale**Figure 2-5**, la reprise des efforts horizontaux du sol par le géosynthétique est équivalente à une pression latérale sur cet élément de sol qui peut être assimilé à un accroissement de cohésion du sol.

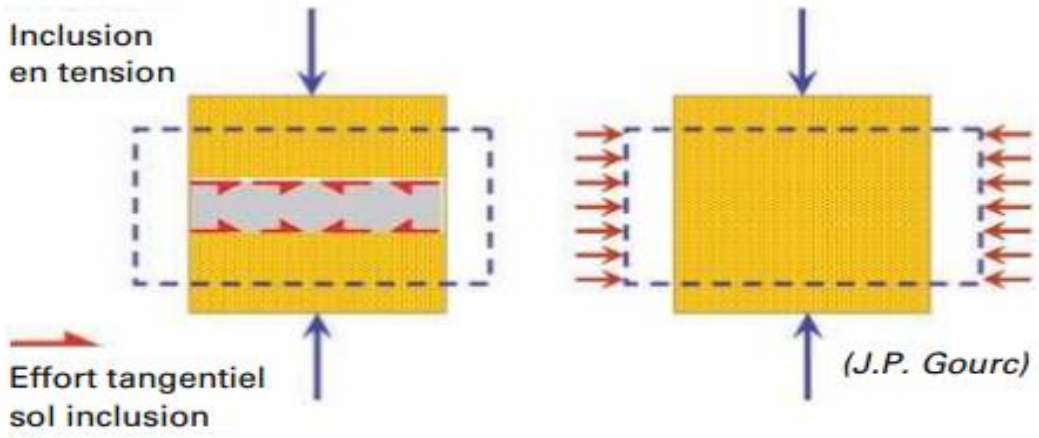


Figure 2-5 Illustration du principe de renforcement des sols d'après (NF P94210)

La reprise des efforts horizontaux du sol par le géosynthétique est équivalente à une pression latérale sur cet élément de sol. (Laurent BRIANÇON, 2017).

2.4.1 L'objectif de renforcement

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 ainsi un gain économique onéreux.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que :

Les considérations économiques ;

La nature du sol a traité ;

La durée de l'opération ;

La disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

2.4.2 Différents types de renforcement

Il est possible de renforcer une structure avec différents types de géosynthétiques, par exemple des renforcements de massif de soutènement chargés en tête et renforcés par des non tissés et géocomposites. Ils peuvent être :

- En métal (Ex : nappes de treillis soudé,…).
- Synthétiques (géosynthétiques, nappes géotextiles, géogrilles, …).

Ils sont disposés par lits horizontaux distants de 0,30 à 1,00 m environ. (Laurent BRIANÇON, 2017)

2.4.3 Les différentes applications de renforcement par géosynthétiques

Les géosynthétiques présente un large éventail d'application :

- Constructions des routes et structures.
- Voies ferrées.
- Terrassements, fondation.
- Réservoirs et barrages.

- Canaux.
- Enfouissement de déchets solides.
- Confinement de déchets liquides (fiberetex, 2018).

2.4.4 Avantages et inconvénients des techniques de renforcement par géosynthétiques

L'avantage des techniques de renforcement des sols dans un contexte d'ouvrages de protection contre les risques naturels réside essentiellement dans la réduction de l'emprise au sol des ouvrages et la possibilité d'utiliser les matériaux du site.

Les inconvénients et les lacunes relatives restent cependant la méconnaissance du comportement des sols (à forte granularité) et la modification et dégradation des caractéristiques d'interface inclusions géosynthétiques/sols grossiers.

Le tableau ci-dessous **Tableau2-1**propose une première analyse de l'adéquation des produits géosynthétiques ou grillage au contexte des sols à forte granularité. (GOTTLELAND, 2000)

Type	Avantages (+)	Inconvénients (-)
non-tissés aiguilletés	Souplesse, adaptation à une granulométrie grossière	peu adaptés au contexte de renforcement des sols (sensibilité au poinçonnement, fort allongement) durabilité ?
Géocomposites (Non-tissés + tissés)	Allongement plus faible Rôle de séparation joué par le géotextile non-tissé support	Endommagement (risque d'arrachement des fibres de renforts) Durabilité ?
tissés	+ ou - ? effet de la perforation sans perte de matière (répartition de part et d'autre des blocs mais réduction de la surface de contact fibres sols)	
	Forte résistance mécanique	Sensibilité à l'endommagement durabilité
géogrilles	Forte résistance mécanique Mobilisation de la pseudo-cohésion (imbrication grains/grille)	Rigidité Mécanismes et caractérisation de la mobilisation du frottement et/ou de la pseudo-cohésion mal connue

Tableau2-1 Adéquation des produits de renforcement à l'utilisation de sols à forte granularité (GOTTLELAND, 2000)

2.4.5 Choix des éléments de renforcement géosynthétiques

L'approche recommandée pour concevoir, choisir et indiquer le géosynthétique n'est pas différente de cequi est généralement pratiqué dans n'importe quelle conception géotechnique et d'ingénierie.

D'abord, la conception devrait être faite sans géosynthétiques pour voir s'ils sont vraiment nécessaires.Si les solutions conventionnelles sont impraticables ou peu économiques, concevoir alors les calculs employant des évaluations d'ingénierie des propriétés géosynthétiques requise.

Les géosynthétiques qui ont un rôle essentiel dans la stabilité des ouvrages, sont choisis en fonction de plusieurs critères :

- Leur résistance à la traction à long terme tenant compte des effets du fluage, du vieillissement et de l'endommagement.
- Le coefficient d'interaction par frottement a l'interface avec le matériau de remblai ou le sol.

- La nature du polymère dont ils sont constitués, qui doit être compatible en termes de vieillissement avec le matériau de remblai et le cas échéant avec le parement en pente.

2.5 Stabilité des murs en terre renforcée mécaniquement

Afin de s'assurer de la stabilité des murs en terre renforcée mécaniquement, une double vérification de la stabilité est nécessaire :

2.5.1 Une stabilité interne

La stabilité interne dépend de la résistance à la traction du matériau utilisé pour le renforcement et de la nature des liaisons à l'interface du matériau de renforcement et le sol.(La méthode de dimensionnement estprésentée au chapitre suivant).

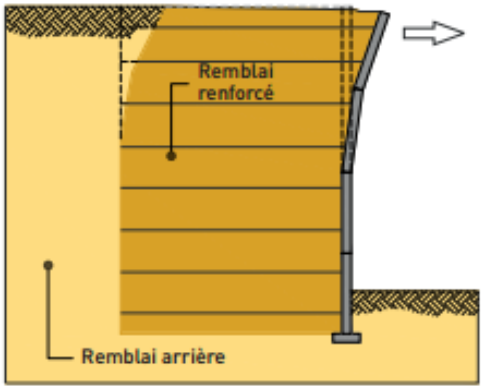


Figure 2-6 Vérification à l'arrachement

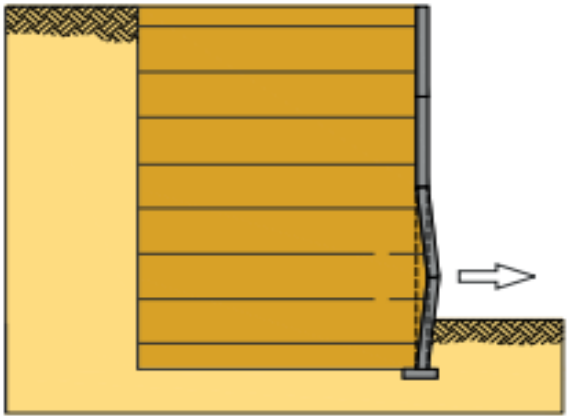


Figure 2-7 Vérification en traction

2.5.2 Une stabilité externe

La vérification de la stabilité externe est la solution idéale pour des travaux de qualité et d'une durée de vie optimale. Elle est déterminée par analogie à un mur-poids.

Figure 2-8 Instabilité externe

Le dimensionnement doit comprendre des vérifications, elles sont illustrées sur les**Figure 2-9**, **Figure 2-10**, **Figure 2-12**.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Vérification de la Stabilité d'ensemble

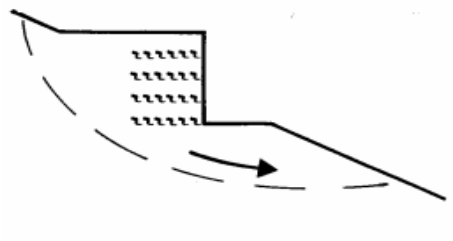


Figure 2-9 Stabilité d'ensemble(JOHAN) Fs=1.5

Vérification de la stabilité au glissement

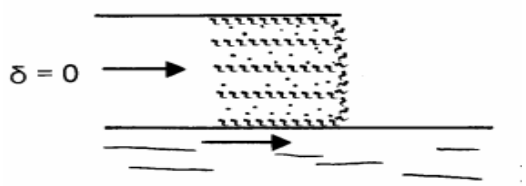


Figure 2-10 Stabilité au glissement(JOHAN) Fs=1.5

Figure 2-11 Traitement d'un glissement de terrain Bejaia (TABTI, 2016)

Vérification de la stabilité au poinçonnement

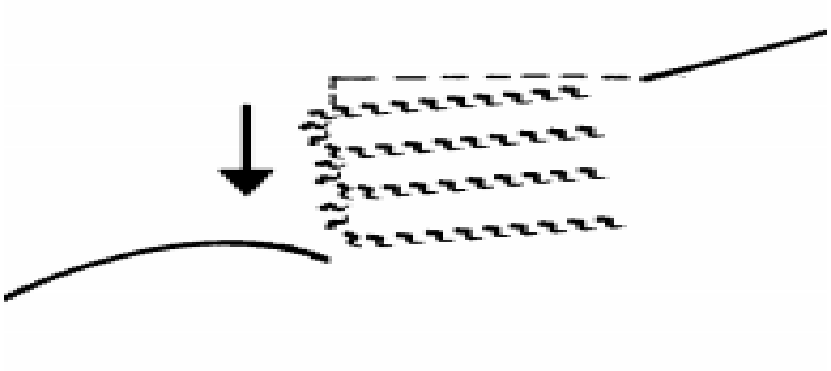


Figure 2-12 Stabilité au poinçonnement Fs= 2

Vérification de la stabilité au renversement

La vérification n'est justifiée que dans le cas des ouvrages de type soutènement verticaux étroits fondé sur un sol de fondation rigide. (geosynthetique, 1990)

2.6 Les ouvrages en remblais renforcés

Les ouvrages en remblais renforcés sont constitués d'un remblai mis en place par couches successives compactées, entre lesquelles sont disposés des lits de renforcement (armatures) à la fois souples et résistants, généralement reliées par un parement, de nombreuses études ont porté sur l'avantage économique des remblais renforcés par géosynthétiques.(Fiche technique Rock PEC).

2.7 Murs géosynthétiques types

Les techniques de géosynthétiques pour la construction d'ouvrages de soutènement sont très développées. Différentes techniques existent et se retrouvent complémantaire ou en concurrence sur le marché. On distingue particulièrement :

2.7.1 Murs renforcés par géosynthétiques

Les ouvrages de soutènement de remblai renforcé par inclusion

géosynthétiques sont constitués d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées entre lesquelles sont disposés des éléments de renforcement géosynthétiques : les nappes ou les bandes de géotextile(ou de géogrille).

Le parement aval du mur peut être :

-Vertical ou incliné et de nature très variée selon les procèdes de construction.

-Non liaisonné aux éléments de renforcement géosynthétique.

-Constitué d'écailles où sont fixés les éléments de renforcement (bandes géosynthétiques).

-Cellulaire, composé d'éléments empilés (généralement, des blocs préfabriqués).

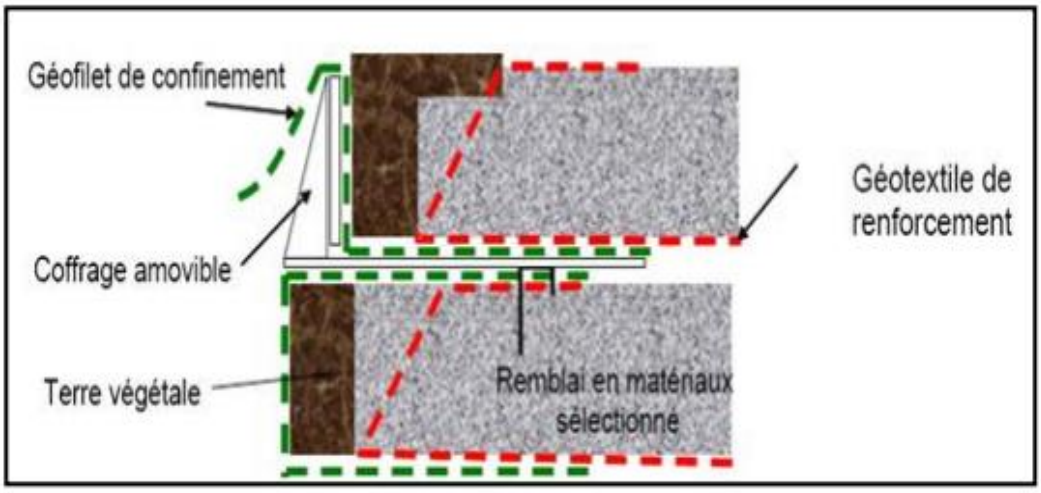


Figure 2-13Détail de construction du parement (Fiche technique Rock PEC)

2.7.2 Murs types Atalus

Ce type de mur est constitué d'éléments de forme arrondie, grace à leur forme ceci permet de mettre de la terre végétalisable avec un large choix de plantes et de fleurs.

Le procédé atalus permet aussi de réaliser des murs de grande hauteur avec des géosynthétiques de renforcement.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.8 Ouvrages hydrauliques et talus renforcés par les géosynthétiques

Les dispositifs géosynthétiques installés sur les pentes des ouvrages hydrauliques (retenue d'eau, canal) et sur les pentes des installations de stockage de déchets, Ont pour première fonction d'assurer l'étanchéité des ouvrages par l'insertion d'une géomembrane illustrée sur**Figure 2-14.**

Le géosynthétique de renforcement doit donc assurer la stabilité du dispositif géosynthétique sur la pente comme montré sur le **2-2** afin que la géomembrane ne soit pas sollicitée en traction.

La fonction d'étanchéité est assurée par la géomembrane qui est associée à d'autres géosynthétiques pour assurer les fonctions de drainage, de filtration, de protection et de renforcement.

Le complexe géosynthétique sur pente est, en général, couvert par une couche de sol peu épaisse (terre végétale) ou par des enrochements.

Le géosynthétique de renforcement doit donc assurer la stabilité du dispositif géosynthétique sur pente afin que la géomembrane ne soit pas sollicitée en traction (Laurent BRIANÇON, Philippe DELMAS, 2017).

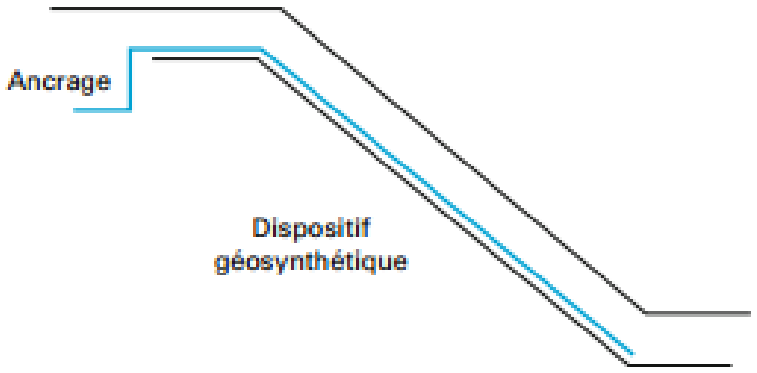


Figure 2-14 Exemple d'un dispositif géosynthétiques sur pente(Laurent BRIANÇON, Philippe DELMAS, 2017).

Mécanismes rattachés à un état limite d'instabilité STR ou GEO	ELUS types	Approches
Stabilité au cisaillement des matériaux de recouvrement	GEO/GEO	2
Stabilité de la couche de recouvrement sur le dispositif géosynthétique	STR/GEO	2
Résistance au cisaillement des interfaces internes des géocomposites en présence de sol	STR	2
Résistance à la traction du géosynthétique de renforcement	STR	2
Résistance d'interaction en ancrage	STR/GEO	2

Tableau2-2 Aproche à considérer pour les differentes justifications des dispositifs géosynthetiques sur pentes.(Laurent BRIANÇON, Philippe DELMAS, 2017)

2.9 Renforcement mixte par pieux et géosynthétiques

Le renforcement par inclusion rigide «pieux verticaux est un procédé traditionnel souvent utilisé afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols.

Une nouvelle approche de ce concept, mise en application notamment dans le sud-est asiatique, est d'ajouter une nappe géosynthétique directement à la base du remblai pour faciliter le transfert de la charge vers les pieux et limiter les tassements de surface à des valeurs admissibles compatibles avec les infrastructures concernées.

Les charges d'exploitation et celles dues au poids du remblai sont en partie transférées aux pieux**Figure 2-15**, directement par des mécanismes d'effets voute et de report de charge dans le remblai, ou indirectement par effet

membranes par l'intermédiaire du géosynthétique.

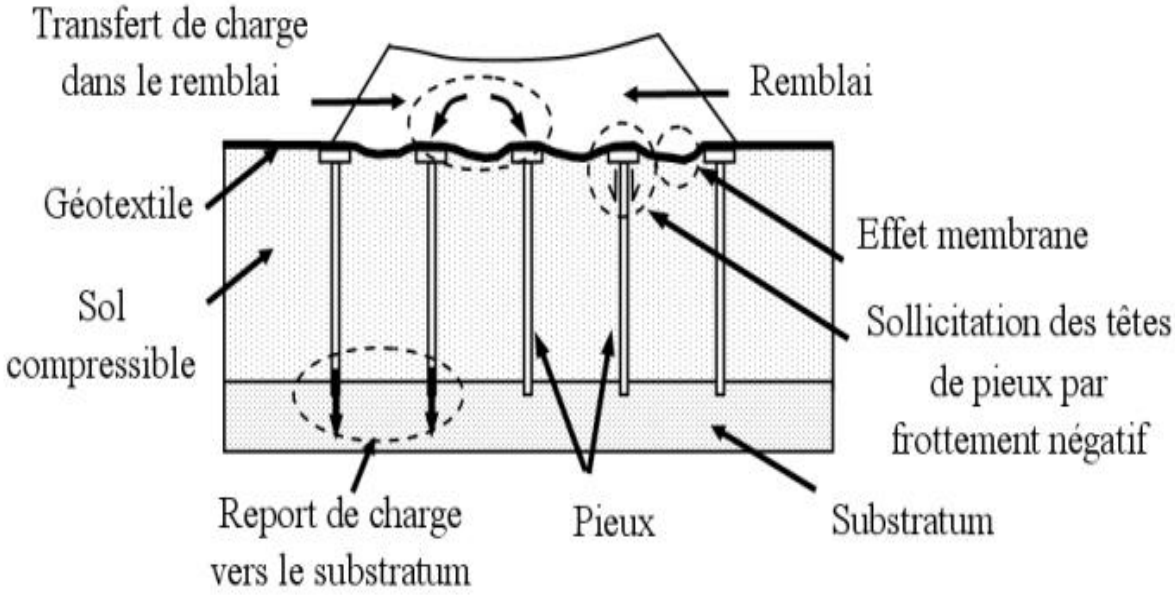


Figure 2-15 Remblai renforcé par pieux et géosynthétique

2.10 Renforcement des chaussées à l'aide des géosynthétiques

2.10.1 Typologies des chaussées

Une chaussée est composée principalement de quatre couches :

- La couche de sol support
- La couche de forme
- La couche d'assise (couche de fondation et couche de base)
- La couche de surface (la couche de liaison et la couche de roulement)

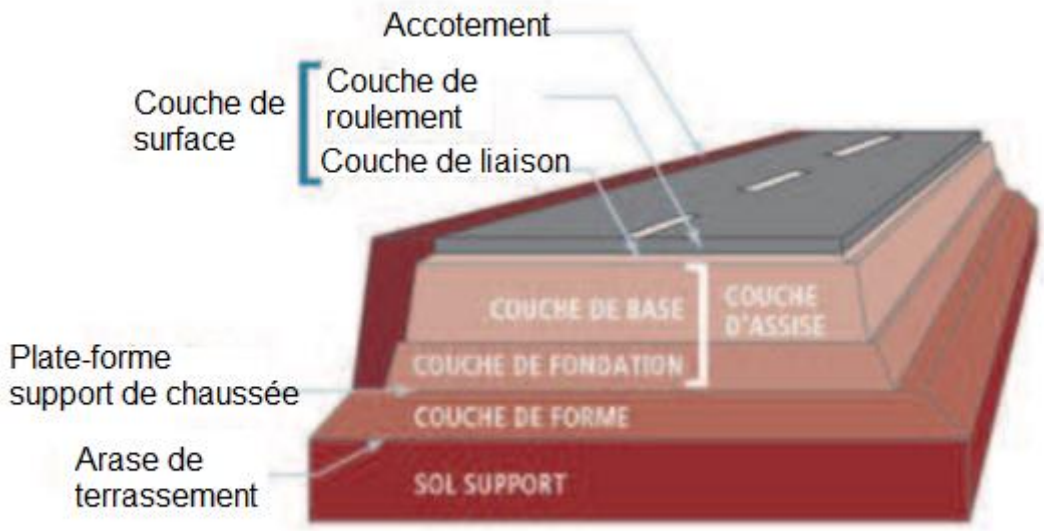


Figure 2-16 Typologie des chaussées(Guilbaud, 2011)

Les méthodes de renforcement à l'aide des géosynthétiques ont beaucoup été utilisées dans le domaine du renforcement de la couche de sol et ce dans le but de procurer une fondation stable pour la construction d'une surface de roulement permanente ou temporaire lorsque le sol support n'offre pas la portance voulue.

2.10.2 Pathologies des chaussées

Un problème de structure nécessite un renouvellement complètement d'une chaussée tandis qu'une défaillance fonctionnelle peut être réparée et suivie par la maintenance de l'ouvrage.

La chaussée fragilisée ne supporte plus de fortes contraintes comme le passage de véhicule a fort tonnage. Leur passage provoquerait des dégradations à long, jusqu'à la destruction totale de la chaussée.Afin de limiter les propagations des fissures on utilise les géosynthétiques.Le renforcement d'une chaussée se traduit par l'ajout d'un géosynthétique dans l'une des couches de la chaussée.

Le géosynthétique de renforcement (géogrilles ou géotextiles) est généralement placé entre la couche de base et la couche de fondation, entre la couche de fondation est la couche de forme ou encore dans la couche de base elle-même. (Guilbaud, 2011)

2.10.3 Choix des géosynthétiques

Le choix du géosynthétiques se fait en fonction de différents critères :

- Propriété mécanique minimale requise.
- Types de chaussée (chaussée non revêtue ou flexible).
- La résistance du sol support.
- Position du renforcement au sein de la chaussée (ligne d'infrastruction ou fondation).

2.10.4 Classification par propriété

Du point de vue mécanique, il convient également de considérer quatre critères lors de la sélection d'un géosynthétique :

- La résistance à la flexion ;
- La résistance à la traction ;
- La résistance à l'arrachement et au glissement.

2.11 Renforcement sur cavité

Les géosynthétiques renforce l'assise des structures et empêche la ruine des ouvrages en assurant la sécurité des usagers contre des risques d'effondrements ; Suivant l'épaisseur de la structure et la taille de la cavité et de l'évolution des désordres en profondeur, le renforcement permet de limiter et d'éviter les désordres en surface.

Avec les géosynthétiques, la quantité de matériaux granulaires est optimisée, ce qui permet une limitation des couts et une réduction de l'impact sur l'environnement.

Les géosynthétiques maintient la structure en place et reprend les charges au-dessus de la cavité.

Rapport-Gratuit.com

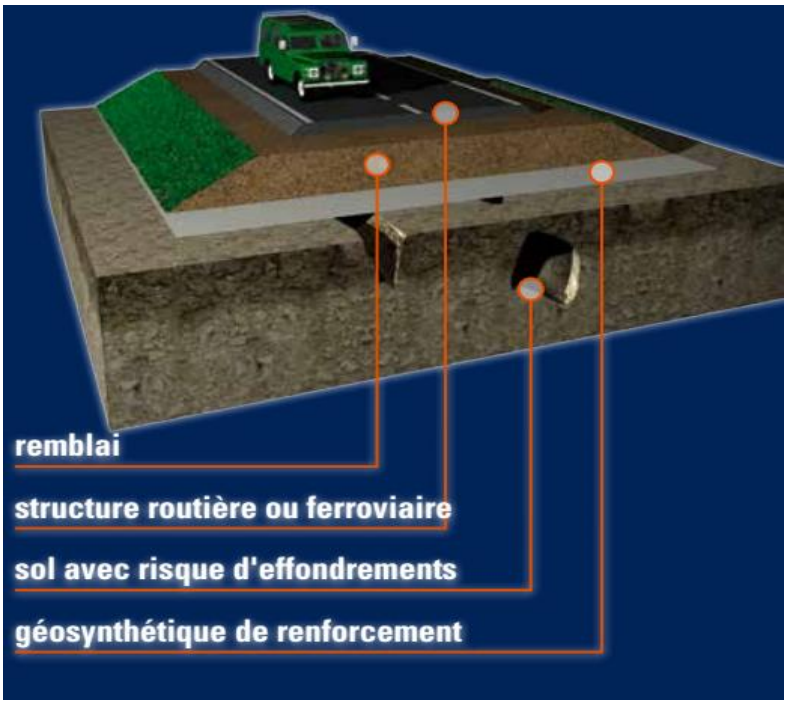


Figure 2-17 Sols avec risque d'effondrements (tencate, 2016)

Exemple d'application des géosynthétiques en mur de soutènement

Exemple d'application les geosynthetiques				
Ouvrage	Fonction de geotextile:	Caractéristiques fonctionnelle:	Caracteristique liées a la mise en œuvre	Caracteristique lié a la durabilité
Mur de soutenement	Renforcement	Résistance a la traction	Résistance à l'endommagement	Fluage en traction
		Raideur		Résistance au UV
		Frottement		

Tableau 2-3 Application des géosynthétiques à l'ouvrage des murs de soutènement

Figure 2-18 Mur de soutènement renforcé par géotextile(TABTI, 2016)

2.12 Conclusion

L'utilisation des géosynthétiques en Génie Civil a connu un développement considérable grâce aux méthodes d'emploi relativement faciles notamment un gain de temps et la durabilité des ouvrages. La gamme des géosynthétiques s'est nettement élargie, comme c'est décrit dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types et applications de renforcement des sols dans le cas des murs en terre ,les ouvrages en remblai, mur géosynthétique type, mur type atalus, ouvrage des pentes, renforcement mixte par pieux et géosynthétiques, renforcement des chaussées et renforcement sur cavité.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre3 Renforcement des murs en terre

3.1 Introduction

La stabilité des massifs en sol se fait couramment, soit par la construction d'un ouvrage de soutènement ou par l'ajout d'éléments de renforcement au sol en place, ce dernier procédé appartient au domaine de la géotechnique. Cependant, il existe des méthodes qui utilisent ces deux domaines simultanément, c'est le cas des massifs en sol renforcé.

Au fur et à mesure, la technique de renforcement d'un remblai s'est développée par l'ajout de renforcement sous forme d'armatures métalliques ou d'éléments géosynthétiques lui confère une cohésion additive, permettant ainsi d'obtenir un matériau composite ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et par conséquent une résistance au cisaillement améliorée. (BOUAFIIA, 2018)

Ce chapitre se base sur la conception du dimensionnement et la réalisation d'un mur en remblai renforcé par des éléments géosynthétiques, en analysant la stabilité globale, externe et interne.

3.2 Géosynthétiques de renforcement

Les géosynthétiques apparaissent de manière générale sous la forme de longues bandes ou nappes et sont des matériaux fabriqués à partir de polymères, parmi les géosynthétiques adaptés au renforcement des sols, on distingue les géotextiles, et les géogrilles.

Ces produits sont essentiels dans la stabilité des ouvrages, ils sont choisis en fonction de plusieurs critères : le coefficient d'interaction par frottement à l'interface avec le matériau de remblai et leur résistance à la traction à long terme en tenant compte des effets du :

3.2.1 Fluage

L'incidence du fluage en traction des géosynthétiques sur la résistance à la traction a été étudiée depuis longtemps et est intégrée dans les normes de dimensionnement des renforcements par géosynthétique sous la forme d'un coefficient réducteur (R_{Fcr}). (Laurent BRIANÇON, 2017)

Il s'agit d'un processus qui n'affecte que les nappes travaillant en traction, il se traduit par une augmentation continue de l'allongement des nappes, provoquant une réaction des sections, d'où une augmentation des contraintes.(MAMERI KAHINA, 2015)

3.2.2 Vieillissement

C'est un facteur de réduction (R_{FD}) de la durabilité ou du vieillissement du produit, concernent la dégradation chimique et biologique.La perte de résistance à la traction du produit dépend des types de dégradation subie comme l'oxydation qui est liée à l'environnement dans lequel il se trouve : rayons ultra-violets, PH acide ou alcalin, hydrocarbures…etc. (Laurent BRIANÇON, 2017).

3.2.3 L'endommagement

Il est intégré dans les normes de dimensionnement des renforcements sous forme d'un coefficient réducteur (R_{FID}) lié aux dégâts d'installation ou l'endommagement.

L'incidence de l'installation et du compactage sur la raideur des produits a été étudiée par de nombreux auteurs. En distinguent les endommagements externes qui correspondent à des coupures des barres de renfort (ou des câbles), et des endommagements internes pour lesquels l'intégrité des éléments de renfort est préservée. (Laurent BRIANÇON, 2017)

3.2.4 Le colmatage

Ce processus concerne les géotextiles qui ont un rôle de filtre ou de drain. Son importance dépend des caractéristiques de l'écoulement qui les traverse : présence, quantité, nature des fines en suspension, gradient hydraulique, mais également de phénomènes plus complexe, notamment biologique (bactéries) ou chimiques (concrétions calcaires…etc). (MAMERI KAHINA, 2015)

3.3 Conception des murs en remblai renforcé par géosynthétiques

Les ouvrages de soutènements en remblai renforcé par inclusiongéosynthétiques sont constitués d'un massif de remblai mis en place par couches successives compactées .(LCPC, 2003)

Un mur en remblai renforcé se comporte en général, comme un mur-poid et du point de vue rigidité en tant que mur souple. Le principe de fonctionnement du mur en remblai renforcé se base essentiellement sur le bon frottement entre le sol/renforcement. La contribution du renforcement par sa résistance à la traction offre au matériau pulvérulent du remblai une certaine cohésion, et augmente ainsi considérablement sa résistance au cisaillement (Schlosser, 1995), le principe d'un mur renforcé par géosynthétique est illustré dans la **Figure 3-1**.

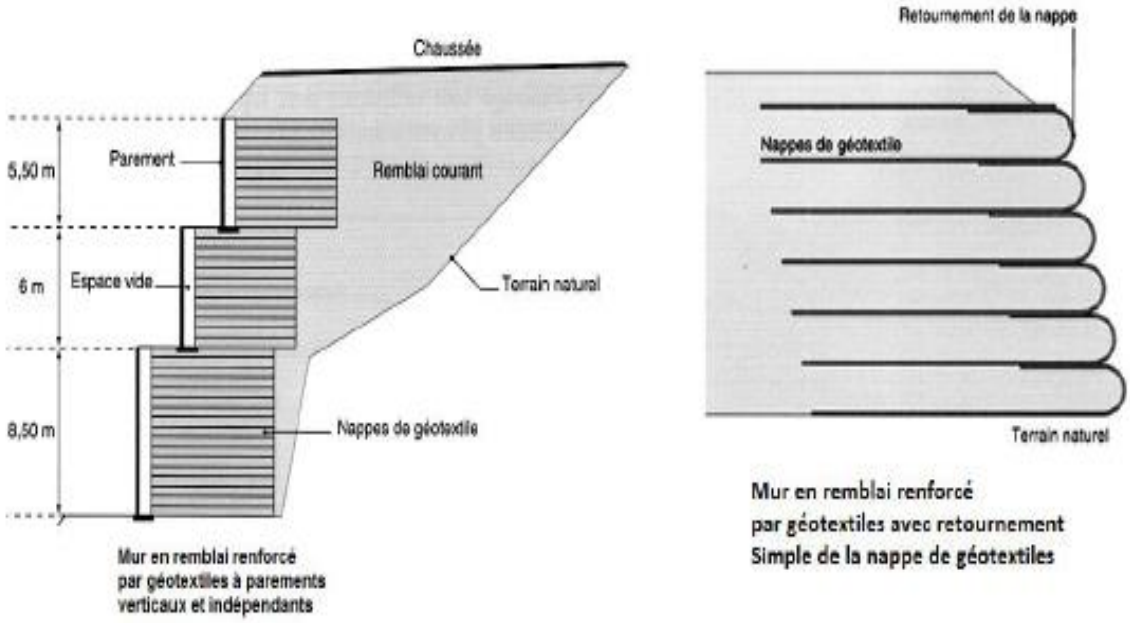


Figure 3-1 Principe d'un mur renforcé par géosynthétiques(BOUAFIIA, 2018)

En vue général d'un massif en sol renforcé, on voit trois éléments constitutifs :

- Le sol granulaire formant la masse
- Les géosynthétiques placé horizontalement et qui résistent à la traction.

- Le parement qui a le rôle de limiter le bloque armé dans l'espace et d'évité la rupture locale et l'érosion superficielle.

Les distinctions entre les différentes techniques se font en fonction de:

- La nature des nappes ou inclusion de renforcement des géosynthétiques.
- La nature des parements.

3.4 Les parements

Le parement représente la partie extérieure et visible de manière permanente du remblai renforcé. Ce sont des éléments faits de divers matériaux et configurations avec différents modes de liaison entre le parement lui-même et le géosynthétique de renforcement. (BACCON, 2017). Leur choix technique est principalement lié à leur inclinaison, qui est soit imposé par l'ouvrage ou définie par le concepteur, ses fonctions sont les suivantes :

- Protéger le massif de toute agression extérieur vis-à-vis de la lumière (ultra-violet) qui provoque leur vieillissement ainsi que vis-à-vis de l'endommagement (vandalisme, exposition au feu…etc) et en particulier de l'érosion superficielle.
- Résister aux efforts dus aux poussées des terres.
- Eviter la rupture locale ayant affecté le remblai.
- D'un côté esthétique, amélioré l'apparence extérieure de l'ouvrage (Mohamed, 2013).

D'après (Tatsuoka, 1993)les ouvrages de soutènement en sol se diffèrent selon la rigidité de leur parement, ainsi on peut distinguer :

a-Parement rigide *b-Semi-flexible* *c-Flexible*

Figure 3-2 Système de parement (Mohamed, 2013)

3.4.1 Parement flexible

La technologie consistait à empiler les nappes simplement retournées en bord de talus, avec un recouvrement de la nappe supérieure comme indiquée dans **la figure a**.Généralement constitués de treillis ou grillages en acier, ou de cages de gabions, ou par des terres végétalisables.

3.4.2 Parement semi flexible (semi rigide)

Ce type de parement est en panneaux ou des blocs modulaires préfabriqués, qui sont articulé entre eux, ce type est largement utilisé pour certaines raisons, ces éléments peuvent être coulés en plusieurs formes pour répondre aux exigences environnementales et esthétiques, par exemple la facilité de l'emplacement des blocs et la facilité de connecter les nappes de renforcement aux blocs modulaire, comme montrer sur la **figure b.**

3.4.3 Parement rigide

Ce type de parement est couramment utilisé avec des panneaux préfabriqués en béton, comme illustré dans **la figure c**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3-3 Les différents types de rigidité d'un parement (Rahmouni, 2017)

Ils existent différents types de parement sur le marché pouvant être composé d'éléments durs (en béton), d'éléments déformables (généralement constitués de treillis ou grillages en acier, ou de cages de gabions), ou encore d'éléments mous (notamment constitués de nappes ou de grilles en géosynthétique). (Mohamed, 2013). On peut citer à titre d'exemple :

Les panneaux de hauteur partielle

Les panneaux les plus utilisés sont les écailles cruciformes en béton, il existe d'autres types de panneaux comme les panneaux de pleine hauteur ou les panneaux inclinés.

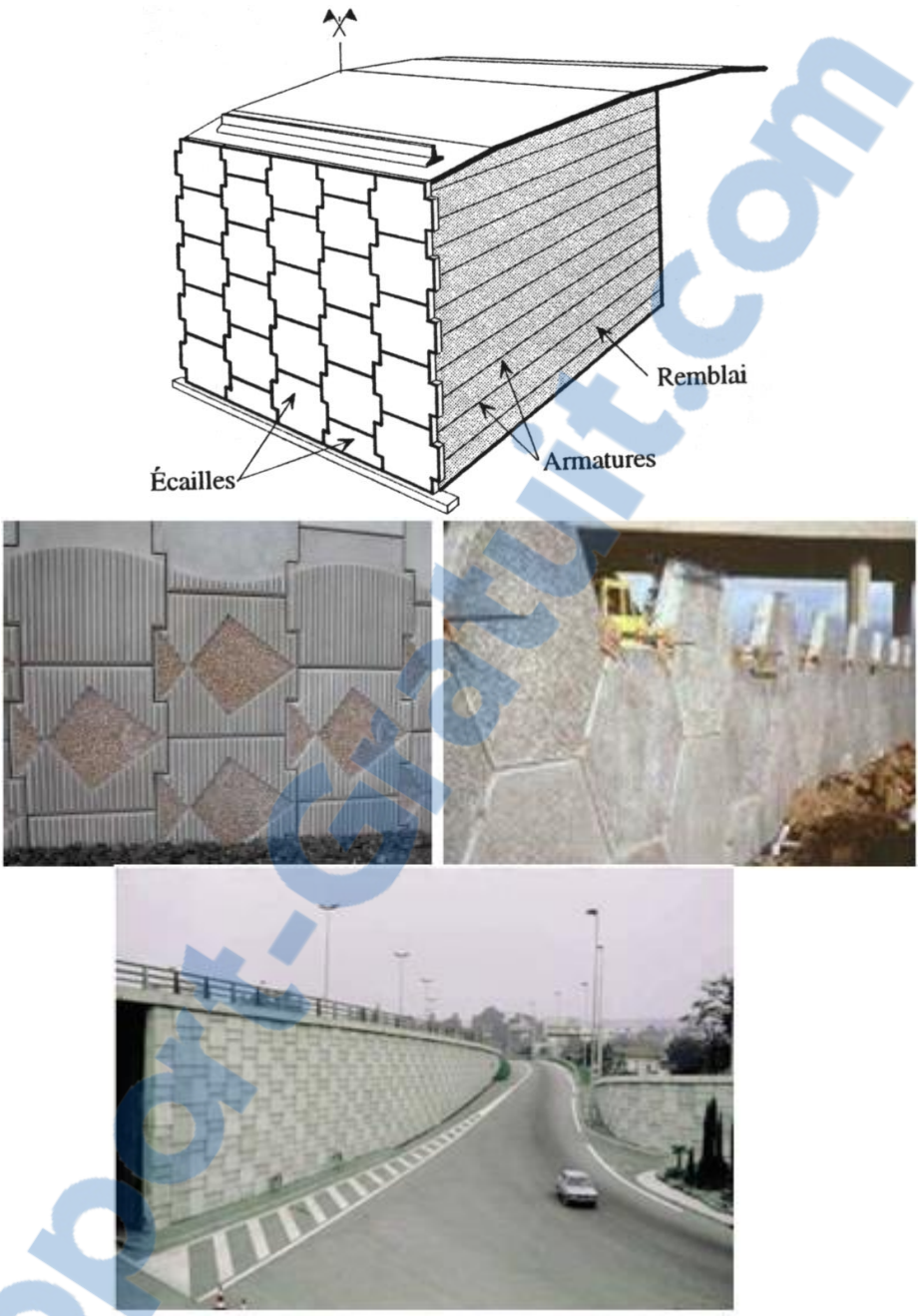


Figure 3-4 Panneaux de hauteur partielle (Ali, 2013)

Jardinières

Les jardinières sont des éléments préfabriqués en béton généralement constitués d'une dalle inclinée voir la**Figure 3-5.**

Rapport-Gratuit.com

Figure 3-5jardinières (Ali, 2013)

Parement cellulaire

Ils sont d'ordinaire désignés sous le nom de blocs modulaires ou cellulaires, ce sont des éléments de parement sous la forme de blocs préfabriqués ou mouillés à sec en béton non armé voir la**Figure 3-6**.

Figure 3-6 Parement cellulaire(Ali, 2013)

Parement de treillis soudé en acier

Les éléments de parement peuvent être constitués de panneaux de treillis soudé soit plats, soit pliés en usine à l'angle d'inclinaison voulue**Figure 3-7**.

Figure 3-7 Parement treillis soudé en acier (Ali, 2013)

Parement en forme de gabion

Le parement est formé par l'empilement de gabions les uns sur les autres en combinaison avec des bandes ou des nappes de géosynthétiques, permettant d'obtenir un massif renforcé voir la**Figure 3-8**.

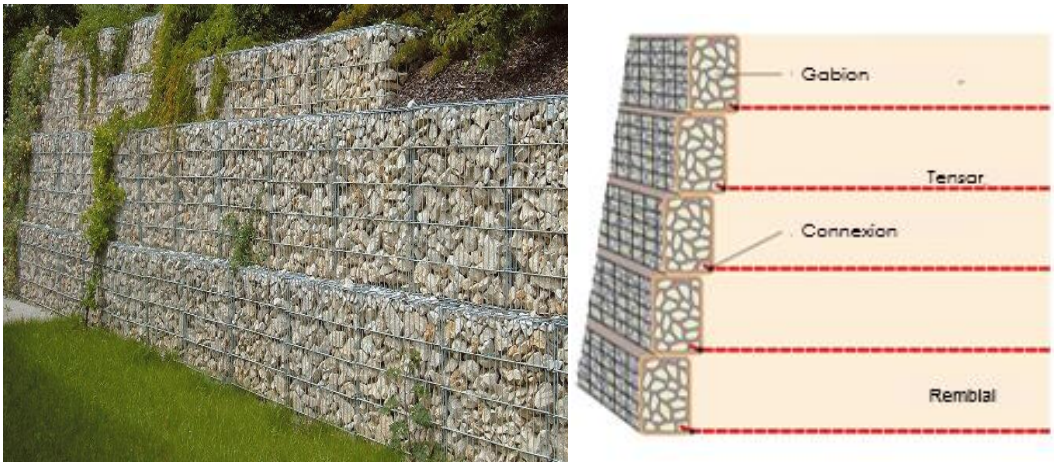


Figure 3-8 Parement en forme de gabion

Parement face enveloppée

Le remblai est renforcé par des nappes de géotextiles ou de géogrilles, formant également la face du mur. La protection des géosynthétiques contre les rayons U.V, de la face du mur est assurée par des couvertures spéciales, des parements construits devant la face enveloppée ou par des terres végétalisables, voir la **Figure 3-9**.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 3-9 Parement face enveloppée

3.5 Principe de dimensionnement des murs en remblai renforcé

Le dimensionnement des massifs de soutènement en sol renforcé, se base sur trois critères essentiels, pour assurer la stabilité d'un massif, il est nécessaire de vérifier :

- La stabilité interne
- La stabilité externe
- La stabilité globale

Etats limites pour les murs en remblai renforcé :

a. Etats limites ultimes

Le règlement(AASHTO, 2012) à définis six états limitent ultimes relatifs au comportement d'un mur en remblai renforcé :

- Rupture due à une instabilité d'ensemble en cas de séisme

- Rupture des éléments de structure
- Rupture par perte de capacité portante du sol
- Glissement latéral du mur
- Rupture par arrachement des éléments de renforcement du sol(armatures ou géosynthétiques)
- Perte de contact à la base suite à une charge excentrée.

b. Etats limites de service

Le règlement définit deux états limites de service pour les murs en remblai renforcé, en l'occurrence (AASHTO, 2012):

- 1. Déplacement excessif du mur (vertical et horizontal),
- 2. Instabilité d'ensemble en absence d'un séisme.

On constate que les principaux modes de rupture sont l'instabilité d'ensemble, le glissement à la base, la rupture des éléments de la structure du mur, la perte de capacité portante du sol et enfin la perte de contact du renforcement avec le parement.voir la **Figure 3-10**

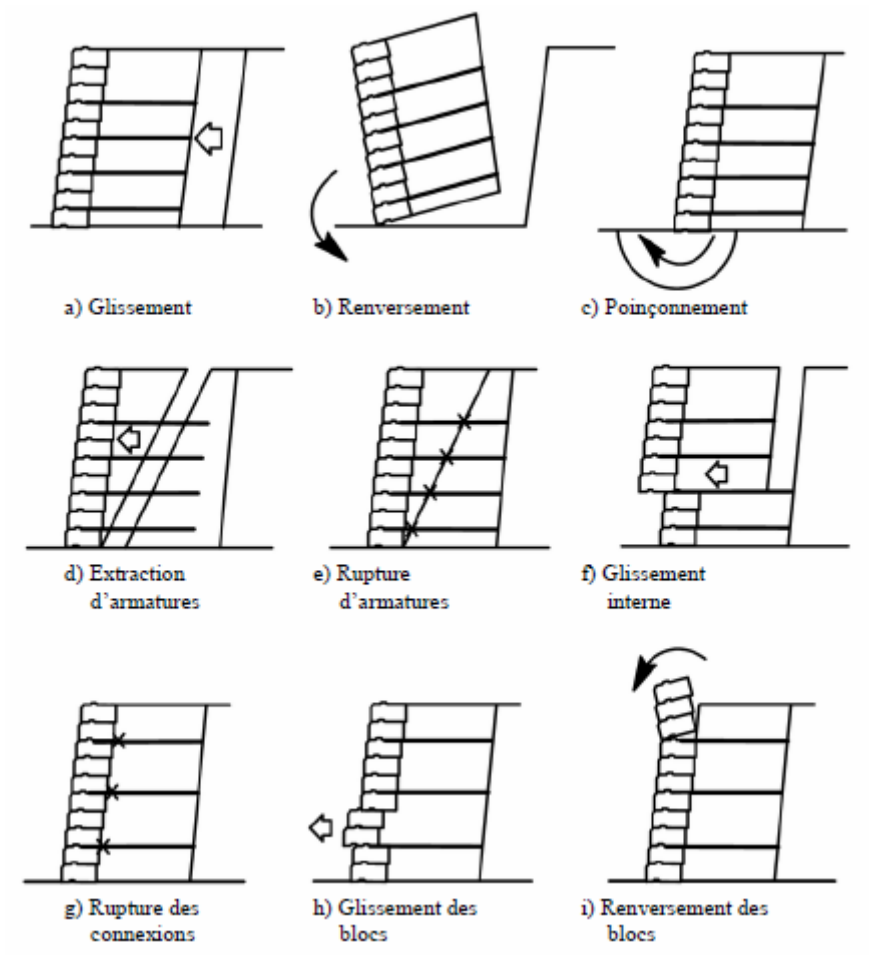


Figure 3-10 Différents modes de rupture (modes de rupture externe (a,b et c), modes de rupture interne (d,e et f), modes de rupture de parement (g,h et i).(Simac, 1994)

c. Pression des terres à l'état d'équilibre limite

L'analyse du comportement en service des massifs en sols renforcés provient d'études en modèles réduits, d'expérimentations d'ouvrages grandeur nature, d'essais de laboratoires (essai d'extraction, cisaillement direct) et de calculs numériques.

Ces études menées essentiellement sur des ouvrages renforcés par des armatures métalliques ou synthétiques ont permis de comprendre leur fonctionnement et de définir les méthodes de dimensionnement actuelles qui sont fondées sur la théorie de la poussée des terres et d'équilibre local.

La force de poussée Fay due au poids des terres agit à H/3 et doit être calculée par :

$$Fa\gamma = \frac{Kar}{2} \,.\gamma.H^2$$

H : est la hauteur du diagramme de pressions de poussée (m).

Kar : est le coefficient de poussée des terres, calculé à partir de l'équation relative à la théorie de Rankine. (AASHTO, 2012).

γ : pois volumique du sol (KN/m3)

$$Kar = tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2})$$

3.5.1 La stabilité interne

La stabilité interne d'un ouvrage de soutènement est assurée par les nappes ou bandes de renforcement qui résistent aux forces de traction qui se développent lors du chargement appliqué sur le remblai.

Les calculs de la stabilité interne de l'ouvrage de soutènement en sol renforcé sont effectués pour assurer la stabilité du sol renforcé, en considérant trois modes de ruptures : arrachement ou fracture des nappes de renforcement et rupture au niveau des connexions parement-renforcement.

La vérification de la stabilité se fait en analysant d'une part la résistance structurelle des renforcements, et d'autre part la résistance d'interaction sol renforcement (ou résistance à l'arrachement du renforcement).

L'analyse du comportement interne et de la répartition des efforts de traction, le long des armatures métalliques ou synthétiques dans un massif en sol renforcé, a montré qu'un effort de traction maximum T_{max} est mesuré sur un point de l'armature.

Ce point est éloigné du parement en haut du mur et proche du parement en profondeur. (AASHTO, 2012)

L'ensemble des points forment une courbe, appelée ligne des tractions maximales, séparant le massif en deux zones :

Une zone active

Située juste derrière le parement ; ce massif de sol est en état d'équilibre limite et pousse sur le parement, mettant ainsi les armatures en traction.

Une zone passive (résistante)

Située à l'arrière, qui est stable dans laquelle les armatures s'ancrent en travaillant à l'arrachement, de manière à absorber l'effort de traction auquel elles sont soumises voir la **Figure 3-11**(Mohamed, 2013).

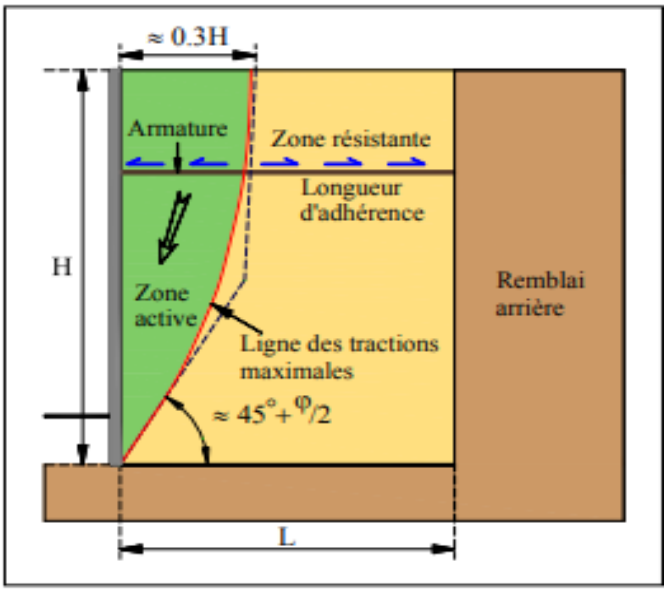


Figure 3-11 Stabilité interne(LCPC, 2003)

Une méthode simplifiée a été recommandée pour déterminer l'effort de traction maximum dans le renforcement, selon laquelle la contrainte horizontale pondérée σ_H à chaque lit de renforcement est calculée comme suit (AASHTO, 2012) :

Calcul de l'effort de traction maximum

$$\sigma H = Kar.(\sigma v + q)$$

Ou :

Kar : est un coefficient de pression des terres.

σv : est une contrainte verticale due au poids propre du sol soutenu et aux surcharges.

La valeur de calcul de l'effort de traction maximale Tmax est alors calculée comme suite :

$$Tmax = Sv.\boldsymbol{\sigma h} \leq \text{Tal}$$

Sv : est l'espacement vertical entre les lits de renforcement,calculée par l'équation suivante :

$$Sv = \frac{Tal}{Kar.(\sigma' + q).Fs}$$

D'ou :

Fs : est un coefficient de sécurité entre : 1,3 < Fs < 1,5

T_{al} : est la résistance à la traction du géosynthétique à long terme, qui ce calcul suivant la relation suivante :

$$Tal = \frac{Tult}{RFid.RFcr.RFd}$$

Avec ;

Tult : est la force ultime de tension d'un géosynthétique.

R_{Fid} : est un coefficient de réduction des agressions mécaniques et des dégâts d'installation ou d'endommagement subi par les renforcements lors de leur mise en place dans l'ouvrage.

R_{Fcr} : est un coefficient de réduction lié au fluage.

R_{Fd} : c'est un facteur de réduction de la durabilité ou le vieillissement qui concerne la dégradation chimique et biologique, dues à l'environnement dans lequel les renforcements se trouvent placés ;

La résistance à l'arrachement

La résistance à l'arrachement du renforcement est formulée comme suit:

$$Tmax \leq Pr = 2.w.Le.(\boldsymbol{\sigma' z} + \boldsymbol{qs}).\boldsymbol{tan\phi i}$$

Ou

W : est la largeur du matériau de renforcement

σ'_z : est une contrainte effective verticale,

q_s : est une surcharge,

Φi : l'angle de frottement décrivant le pic de résistance au cisaillement le long del'interface sol- géosynthétique, généralement pris égale à $\frac{2}{3}\boldsymbol{\phi}$.

Le : c'est une longueur effective dans la zone résistante.

La force de tension à la profondeur de z :

$$T = Kar.(\boldsymbol{\sigma' z} + \boldsymbol{qs}).\boldsymbol{Sz}.\boldsymbol{Sy}$$

Sz et Sy : sont des espacements dans les directions de z et y,

T : la force de tension à la profondeur z par unité de longueur du mur,

q_s *: la* surcharge,

σ'_z:contrainte effective verticale,

Pour les géotextiles ou géogrilles, vous devez prendre une unité de longueur du mur et une unité de largeur, ainsi *Sy* = 1 et *w* =1.

En posant *T*=*Pr*, on trouve la longueur effective dans la zone de résistance, nécessaire pour assurer un équilibre limite, ainsi on trouve :

$$Le = \frac{Kar.Sz.Sy.Fs}{2.w.\tan\phi i}$$

Pour trouver la longueur effective nécessaire, un coefficient de sécurité (F_S)est appliqué à la force de tension *T*, 1,3 < Fs < 1,5

Ou

W : est une largeur du matériau de renforcement

La longueur totale de renforcement est calculée par l'équation suivante :

$$L = Le + Lr$$

Ou,

$L_r$est la longueur de renforcement à l'intérieur de la zone active, pour déterminer cette longueur de renforcement, on suit l'équation suivante :

$$Lr = (Ho - Z).\tan(45 - \frac{\phi i}{2})$$

Détermination des efforts au parement

L'effort de traction dans chaque lit d'armatures au parement est calculé de la manière suivante :

$$Tp = K.\alpha i.\sigma v.Sv$$

αi : varie suivant la rigidité du parement ;

αi = 0.75 pour les systèmes de parement flexibles

αi = 0.85 pour les systèmes de parement semi-flexibles

αi = 1.00 pour les systèmes de parement rigides.

Rapport-Gratuit.com

3.5.2 La stabilité externe

Le fonctionnement externe des ouvrages en remblai renforcé ne diffère pas de celui des ouvrages de soutènement, il est considéré tel un mur-poid en maçonnerie ou en béton, il repose essentiellement sur la portance du sol de fondation et sur la résistance au glissement de l'ouvrage à son interface avec le sol de fondation.

Les actions externes appliquées (surcharges diverses, poussées des terres à l'arrière du massif provoquent une force résultante R au niveau de la base présentant une excentricité e par rapport à l'axe du remblai **Figure 3-12.** La justification consiste à vérifier la portance du sol de fondation et la résistance au glissement du mur à son interface avec le sol de fondation ainsi qu'au renversement du bloc. Il faut étudier également la stabilité d'ensemble.

S'agissant d'un ouvrage souple et de grande largeur à la base, le problème du renversement ne se pose généralement pas. (LCPC, 2003)

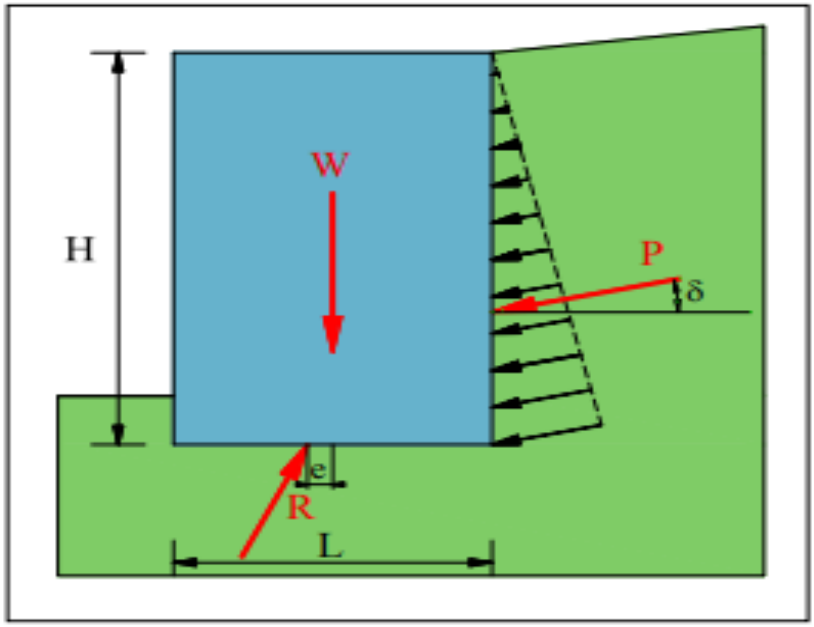


Figure 3-12 Stabilité externe (LCPC, 2003)

La vérification concerneles trois états critiques : le glissement, le renversement, et le poinçonnement.

Vérification de la capacité portante (poinçonnement)

Le massif de remblai renforcé est considéré comme un bloc

monolithique dont sa base est considérée comme une fondation continue, soumise à une force verticale Fv excentrée de e par rapport au milieu de la base, et ayant une largeur réduite égale à L-2e, L étant la longueur du renforcement. Lavérification de la capacité portante est relative au calcul des fondations superficielles.

Pour déterminer le lieu de passage de cette résultante, on doit calculer le moment total autour du point O :

$$\sum résul = \sum M(stabilisant) - \sum M(reversant) = M0$$

L'excentricité de la force par rapport au point O :

$$e0 = \frac{M0}{\sum Fv}$$

e : est l'excentricité du chargement par rapport au centre géométrique à la base du mur

$$e = \frac{B}{2} - e0$$

Pour une charge verticale excentrée : si$0 < e < \frac{B}{6}$donc, c'est une réparation trapézoïdale ;

Sinon, $e > \frac{B}{6}$alors, c'est une réparation triangulaire.

La condition est vérifiée si :

$$qréf \leq qadm$$

Pour le calcul de qadm

$$qadm = \frac{ql - \sum \gamma . D}{Fs} . \sum \gamma . D$$

Ou

Fs est un coefficient de sécurité pris en général égal à 3

ql est calculé selon une fondation superficielle soit (semelle filante, ou

Rapport gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

semelle isolée, ou radier).

Vérification au glissement à la base

Pour que la stabilité au glissement soit assurée, il faut que la somme des forces verticales (forces stabilisantes), soit supérieure à la somme des forces horizontales (forces motrices) avec un coefficient de sécurité égale à 1.5 en négligeant la force de butée.

$$Fs = \frac{Rv.tan\phi}{Rh} > 1{,}5$$

Ou

Rv = ∑Fv : sont les forces stabilisantes,

Rh = ∑Fh : sont Les forces motrices.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Vérification au renversement

Pour que la stabilité au renversement soit assurée. Il faut que le rapport entre les moments stabilisants et les moments renversants, doit être supérieur à 1,5.

$$Fs = \frac{Mstabi}{Mrenv} > 1{,}5$$

Avec la condition suivante :

Fs > 1.5 si on néglige la butée.

Fs > 2 si on tient compte de la butée.

Les moments renversants (Mr) sont les forces horizontales multipliées par leur bras de levier par rapport à O.

Les moments stabilisants (Ms) sont les forces verticales multipliées par leurs bras de levier par rapport à O.

3.5.3 Stabilité globale

La vérification de la stabilité au grand glissement de tels ouvrages se fait classiquement en utilisant la méthode des tranches (FELLENIUS et BISHOP). Une telle analyse est recommandée quand le mur en sol renforcé est situé sur une pente, ou quand les conditions de base sont faibles.

Les calculs automatiques par code Geostudio sont exposés dans le chapitre qui suit.

3.6 Conclusion

Les ouvrages de soutènement en sol renforcé sont largement utilisés depuis leur première apparition grâce aux plusieurs avantages tels que leur méthode de construction simple et rapide, leur aspect esthétique qui est assuré par les différents types de parement (parement en gabion, panneaux en béton…etc), et leur résistance au chargement statique et dynamique et surtout leur conception rentable.

Dans ce chapitre, nous venons de présenter les produits de renforcement et leur résistance à la traction à long termeen tenant compte des effets du fluage, de l'endommagement,du vieillissement, et du colmatage .

En se basant sur la conception du dimensionnement et la réalisation d'un mur en remblai renforcé par des éléments géosynthétiquesen analysant la stabilité globale, externe et interne suinvant la norme AASHTO.

Chapitre4 ETUDE DE CAS « POSTE BENI-SAF2 »

4.1 Introduction

C'est dans le dédoublement de la voie RN 22 poste Beni-Saf 2 de la wilaya d'Ain-Temouchent, qu'a été décidéde construire un ouvrage de soutènement de plus de 50 m de long et de 6m de hauteur dans des délais très courts pour permettre la stabilisation des pylônes ce qui rendait le coût du projet très onéreux.

Devant ces impératifs la solution proposée consiste à remplacer de mur de soutènement par des massifs en remblais renforcés avec du géogrilles avec retour au parement pour les parties visibles des murs.

Des études ont été élaborées pour vérifier le coefficient de sécurité FS en prenant en compte l'influence des espacements entre les bandes de géogrilles pour but d'optimiser l'aspect économique.

4.2 Présentation du cas (poste Beni-saf2 wilaya de Ain-Temouchent)

Un glissement de terrain a été déclenché sur la côte de la wilaya d'Ain-Temouchent, à l'entrée au poste de Beni-Saf 2 enface THT SONELGAZ.

Figure 4-1 Situation géographique du glissement

Quatre pylônes d'électricité représentent le majeur facteur provoquant ces glissements, d'autre part les intempéries qu'a connues la région de Beni-saf ont rendu la chaussée impraticable.

La direction générale« engineering DGE.KDM/L » de Ain-Temouchent a lancé un appel d'offre pour l'étude de confortement de ce glissement en 2012 et la réhabilitation de cet important axe routier qui a notamment servi de contournement et de déviation aux innombrables coupures lors de la pluie.

Figure 4-2 Mur de soutènement poste benisaf2 en cour de construction lors du (terrassement, ferraillage, drainage) prise le 06/03/2019

Figure 4-3 Mur de soutènement de poste Benisaf2 travaux achevés prise le 02/05/19

4.3 Choix de la solution

Une solution de renforcement par géosynthétiques de type géogrilleen polyéthylène haute densité (PEHD) Tensar, a été proposée du fait de leur grande adaptabilité et de la facilité et rapidité de leur mise en œuvre, et de leur bonne résistance par rapport à beaucoup d'autres solutions classiques. Les raisons essentielles de ce choix sont :

- Une emprise réduite avec un gain d'espace pour les servitudes ;
- Un impact positif sur l'environnement immédiat ;
- Le traitement du talus avec contrôle de ruissellement ;
- Les possibilités esthétiques : parement végétalisé et fleuri ;
- La rapidité d'exécution.

4.4 Reconnaissance du sol

Dans la phase d'étude, la classification du sol support est une étapeessentielle pour l'étude de la stabilité d'ouvrage, on doit donc caractériser le sol support pour but de comprendre son comportement lors du chargement, et estimer les déformations que peut générer la mise en place du remblai et les

possibilités de rupture.

Les propriétés du sol et leurs types, sont présentés dans le**7Tableau4-1** ci-dessous.

Couche de remblai	γ (kN/m3)	C (Kpa)	ϕ (°)	v
Sable	18	0	25	0,3

q(Kn/m²)	35
$\boldsymbol{\varphi i}$	16.66
Tan $\boldsymbol{\varphi i}$	0.2992
$\boldsymbol{\sigma z}$ (Kn/m²)	108
Kar	0.405
Fs	1.5
H (m)	6
Tan(45-$\frac{\boldsymbol{\varphi i}}{\mathbf{2}}$)	0.7445

Tableau 4-1les caracteristiques géotechnique du sol

4.5 Prédimensionnement du massif

la meilleure technique estimée pour stabiliser ce glissement est la mise en œuvre d'un remblai renforcé par des bandes de géogrilles, cette stabilité est influencée par les espacements horizontaux entre les couches de géogrilles. On a donc sélectionné deux produits de géogrilles, **géogrille uniaxial UX1600MSE** et **géogrille UX1500MSE** avec différents espacements (0.4m ; 0.5m ; 0.6m ; 0.8m ; 1m), afin de voir son influence et parvenir à une

solution optimale du côté économique.

- Premier produit géogrille uniaxial UX1600 Tensar

Ses caractéristiques sont représentées dans la fiche technique suivante :

Product Specification - Structural Geogrid UX1600MSE

Tensar International Corporation reserves the right to change its product specifications at any time. It is the responsibility of the specifier and purchaser to ensure that product specifications used for design and procurement purposes are current and consistent with the products used in each instance.

Product Type:	**Integrally Formed Structural Geogrid**
Polymer:	**High Density Polyethylene**
Load Transfer Mechanism:	**Positive Mechanical Interlock**
Recommended Applications:	**MESA System (Segmental Block Walls), ARES System (Panel Walls), SierraScape System (Welded Wire Walls)**

Product Properties

Index Properties	**Units**	**MD Values[1]**
• Tensile Strength @ 5% Strain[2]	kN/m (lb/ft)	58 (3,980)
• Ultimate Tensile Strength[2]	kN/m (lb/ft)	144 (9,870)
• Junction Strength[3]	kN/m (lb/ft)	135 (9,250)
• Maximum Allowable Strength for 120-year Design Life[7]	kN/m (lb/ft)	52.7 (3,620)
Recommended Allowable Strength Reduction Factors[7]		
• Minimum Reduction Factor for Installation Damage (RF_{ID})[8]		1.05
• Reduction Factor for Creep for 120-year Design Life (RF_{CR})[9]		2.60
• Minimum Reduction Factor for Durability (RF_D)		1.00

Figure 4-4 La fiche technique géogrille UX1600MSE(Tensar)

Sur cette fiche technique, on peut voir que la résistance à la traction du lit de renforcement est égal a Tal = 52,7 KN/m ; et la force de tension des géogrilles Tult = 144 KN/m ; avec des facteurs de réduction RFid= 1,05 ; RFcr= 2,60 ; RFd = 1. (voir le **Tableau 4-2** ci-dessous)

Rapport-Gratuit.com

Plusieurs espacements des lits de renforcement ont été considérées :

Sz (m)	0,4	0,5	0,6	0,8	1
Tall (KN/m))	52.7				
Tmax (KN/m)	23,16	28,95	34,74	46,33	57,91
Fs	2,27	1,82	1,52	1,14	0,91
Nombre de Couche	15	12	10	8	6

Tableau 4-2 Geogrille UX1600MSE (Tensar)

Ce tableau représente des résultats du coefficient de sécurité obtenus en fonction de l'effort de traction maximal et la résistance à la traction du lit de renforcement selon la variation des espacements verticaux et le nombre de couche de géogrille entrant dans la conception de remblai.

Remarque

le coefficient de sécurité Fs doit vérifier la condition suivante : Fs > 1,5 ce qui exclus 1m et 0,8m.

Selon cette condition, on obtient les trois espacements suivants : 0,4 ; 0,5 ; 0,6 m pour lesquelles il faudrait 15, 12 et 10 couches respectivement.

- Deuxième produitgéogrille uniaxial UX1500MSE Tensar

ses caractéristiques sont représentées dans la fiche technique suivante :

Tensar International Corporation reserves the right to change its product specifications at any time. It is the responsibility of the specifier and purchaser to ensure that product specifications used for design and procurement purposes are current and consistent with the products used in each instance.

Product Type: Integrally Formed Structural Geogrid
Polymer: High Density Polyethylene
Load Transfer Mechanism: Positive Mechanical Interlock
Recommended Applications: MESA System (Segmental Block Walls), ARES System (Panel Walls), SierraScape System (Welded Wire Walls)

Product Properties

Index Properties	Units	MD Values[1]
• Tensile Strength @ 5% Strain[2]	kN/m (lb/ft)	52 (3,560)
• Ultimate Tensile Strength[2]	kN/m (lb/ft)	114 (7,810)
• Junction Strength[3]	kN/m (lb/ft)	105 (7,200)
• Maximum Allowable Strength for 120-year Design Life[7]	kN/m (lb/ft)	41.8 (2,860)
Recommended Allowable Strength Reduction Factors[7]		
• Minimum Reduction Factor for Installation Damage (RF_{ID})[8]		1.05
• Reduction Factor for Creep for 120-year Design Life (RF_{CR})[9]		2.60
• Minimum Reduction Factor for Durability (RF_D)		1.00

Figure 4-5 La fiche technique géogrille UX1500MSE (Tensar)

Sur cette 2éme fiche technique, on peut voir que la résistance à la traction du lit de renforcementTal = 41,8 KN/m ; et la force de tension de la géogrille Tult = 114 KN/m ; avec des facteurs de réduction RF_{id}= 1,05 ; RF_{cr}= 2,60 ; RFd = 1 (voir le **9Tableau4-3**ci-dessous).

Sz (m)	0,4	0,5	0,6	0,8	1
Tall (KN/m)	41.8				
Tmax(KN/m)	23,16	28,95	34,74	46,33	57,91
Fs	1,80	1,44	1,20	0,90	0,72
Nombre de couches	15	12	10	8	6

Tableau 4-3Géogrille UX1500MSE (Tensar)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Remarque

la résistance à la traction est plus faible par rapport au produit précèdent et pour les mêmes valeurs d'espacements que le 1er tableau, on obtient différentes valeurs du coefficient de sécurité avec un même nombre de couches pour chaque espacement.

Le choix de la géogrille s'est porté sur un coefficient de sécurité qui vérifie la condition FS> 1,5 et qui nécessite le moins de couches possibles.

Le choix de la géogrille est donc de type **géogrille uniaxial UX1600MSE Tensar** avec un espacement Sv = 0,50m,un coefficient de sécurité Fs=1.82> 1,5 et une résistance à la traction Tal=52,7 KN/m et une traction maximal Tmax = 28,95 KN/m ; de plus, cet espacement est moins onéreux que l'espacement inférieurde 0.4m, il permet de diminuer le nombre de couches et donc de diminuer les couts.

4.6 Calcul statique

Le calcul statique du mur en sol renforcé consiste à vérifier la stabilité interne et externe du mur aux différents types d'instabilité.

4.6.1 Stabilité interne

La stabilité interne est justifiée lit par lit. Elle se fait en vérifiant au niveau de chaque lit d'armatures que la traction maximal et la traction au parement sont inférieures tout d'abord, à la résistance au frottement d'interface et ensuite à la résistance caractéristique à long terme.

Vérification de la résistance structurelle des renforcements :

$$\boldsymbol{Tmax = Sv.\sigma h} \leq \text{Tal}$$

Pour un espacement vertical entre les lits de renforcement :

Sv =0,50 m

Le nombre de couche se calcul par la relation

$$N = \frac{H}{Sv} = \frac{6}{0{,}50} = 12 \text{ couches}$$

Tal : dépend du choix du type de la géogrille (fiche technique), comme il peut se calculer avec la relation qui a été décrite dans le chapitre précédent.

Tal =52.7 KN/m

Calcul de l'effort de traction maximal des nappes de renforcement :

$$\boldsymbol{Tmax = Sv.\sigma h} \leq \text{Tal}$$

Calcul de la contrainte horizontale

$$\boldsymbol{\sigma H = 0,405 * (18 * 6 + 35)} = 57,915 \text{ KN/m2}$$

Calcul deTmax

Tmax = 0,50*57,915 =28,95 KN/m

Tmax= 28,95 ≤ Tal= 52,7 KN/m **C.V (condition vérifiée)**

Vérification de la résistance à l'arrachement du renforcement

$$\mathrm{Pr} = 2.\mathrm{w.Le.}(\sigma'\mathrm{z} + \mathrm{qs}).\tan\phi\mathrm{i}$$

Calcul de la longueur effective dans la zone résistante

$$Le = \frac{0,405*0,50*1,5}{2*\tan 16,66} = 0,5076 \text{ m}$$

$$\boldsymbol{Pr = 2 * 0,5076 * (1 * 6 + 35).tan\ 16,66}$$

Tmax = 28,95≤ Pr = 43,44 KN/m **C.V**

Calcul de la force de tension à laprofondeur dez

$$Ten = 0,405 * (18 * 6 + 35) * 0,50 = 28,95 \text{ KN/m}$$

Calcul de la longueur derenforcement Lr à l'intérieur de la zone active

$$\boldsymbol{Lr = (6 - 0,50).\tan(45 - \frac{16,66}{2})} = 4,09 \text{ m}$$

La longueur totale de renforcement

$\boldsymbol{Lmin = 0,507 + 4,09}$=4,60 m , $\boldsymbol{Lmax = 6,09 + 0}$= 6,09 m

Efforts au point d'attache au parement

$$\boldsymbol{Tp = K.\alpha i.\sigma v.Sv}$$

Choix du parement (par le système de Tensar)

Le choix du parement s'est fait en fonction de la pente et des avantages offerts par cette solution. Voir la **Figure 4-6** ci-dessous

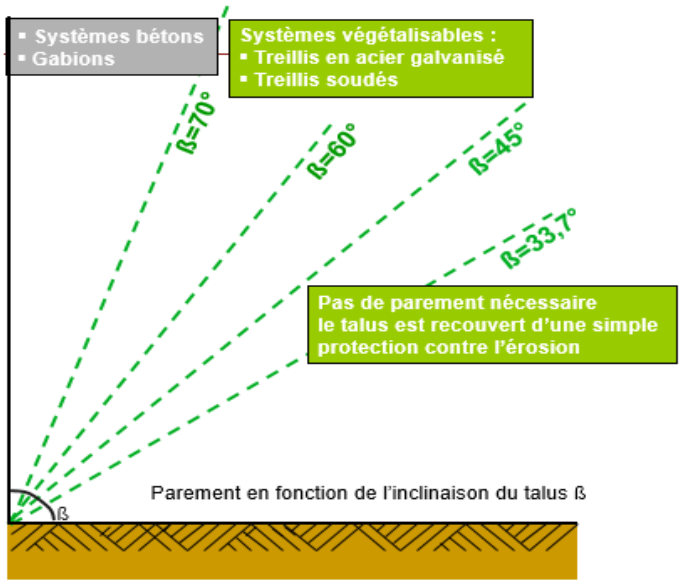


Figure 4-6 Parement en fonction de l'inclinaison du talus **β**

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Systèmes	- 45°	45°- 70°	70°- 90°
Tensar TV (Talus vert)	x		
Tensar EV (enveloppement vert)		x	x
Tensar TSV (Treillis soudés vert)		x	x
Tensar TVG (Treillis galvanisés vert)		x	
Tensar Gabions			x
Tensar Mur			x
Tensar Jardinières			x
Tensar RC (recyclé)			x
Tensar Panneaux béton			x

Tableau 4-4 Types de parment enfonction de la pente

Pour une pente **β** = 76°, on remarque a partir du**tableau4-4** et de la **figure4.6**quenotre pentese situeentre 90° >**β** = 76° > 70° (systèmes de parement bétons ou gabion).

Donc, nous avons sélectionné deux types de parements, le premier est de type tensar en gabions flexible et le deuxième est de type panneaux en éléments préfabriqués en béton (écaille cruciforme) rigide.Mais aussi pour les différents avantages proposés par ses deux produits de parements, comme illustré sur le **Tableau4-5** ci-dessous :

Avantage des parements en gabion	**Avantage des panneaux en béton**
Plus économique, contrairement aux solutions traditionnelles	Construction facile et rapide
Haute résistance et durabilité	Fléxibilité dans la conception
Construction facile et rapide	Utilisation même en cas de fortes charges

Ecologique	Stabilité durable
Possibilité d'aménagementdiversifiée	Construction économique
Le cas échéant, réutilisation du sol disponible sur site	Procédè de fabrication sans mortier ni coffrage

Tableau 4-5 Avantages des parements en gabion et en éléments préfabriqués en béton(TensarTech®, 2017)

L'effort de traction au point d'attache dans chaque lit d'armatures au parement Tp est calculé de la manière suivante :

- $\boldsymbol{Tp = K.\alpha i.\sigma v.Sv}$

Pour un parement de type gabion flexible:

- α = 0.75 pour les systèmes de parement flexibles
- Tp= 0.405 *0.75* (18*6+35)* 0.5 = 21,72 KN/m

Pour un parement de type panneaux en éléments préfabriqués en béton (écaille cruciforme) rigide :

- α = 1 pour les systèmes de parement rigides
- Tp= 0.405*1*(18*6+35)* 0.5 = 28,95 KN/m.

Voici le **12Tableau4-6** ci-dessous qui regroupe tous les résultats en fonction de la profondeur Z :

Sz (m)	Le (m)	L r (m)	Pr (KN/m)	Ten (KN/m)	L (m)
0,5	0,50760361	4,09475	43,43625	28,9575	4,60235361
1	1,01520722	3,7225	86,8725	57,915	4,73770722
1,5	1,52281083	3,35025	130,30875	86,8725	4,87306083
2	2,03041444	2,978	173,745	115,83	5,00841444

2,5	2,53801805	2,60575	217,18125	144,7875	5,14376805
3	3,04562166	2,2335	260,6175	173,745	5,27912166
3,5	3,55322527	1,86125	304,05375	202,7025	5,41447527
4	4,06082888	1,489	347,49	231,66	5,54982888
4,5	4,56843249	1,11675	390,92625	260,6175	5,68518249
5	5,0760361	0,7445	434,3625	289,575	5,8205361
5,5	5,58363971	0,37225	470,6416	318,5325	5,95588971
6	6,09124332	0	521,235	347,49	6,09124332
Tmax (KN/m)	28,9575				
Fs	1,82				

Tableau 4-6Résultats de la stabilité interne

4.6.2 Stabilité externe

Le fonctionnement externe des murs en remblai renforcé ne diffère pas de celui des ouvrages de soutènement les plus classiques, du type murs-poids ou murs en béton armé.

Les efforts qui s'exercent sur ce massif par unité de longueur sont :

- La poussée des terres F sur la face arrière, cette poussée étant inclinée selon un angle δ. Les différentes expérimentations ont montré que cette poussée correspond à la poussée active du fait de la déformabilité du massif.
- Le poids du massif W.

Le mur en sol renforcé transmet au sol de fondation des contraintes quasi linéaires dues à son propre poids (W) et aux effets des surcharges et des poussées latérales qui le sollicitent. (Mohamed, 2013) Comme illustré dans la **Figure 4-7** suivante

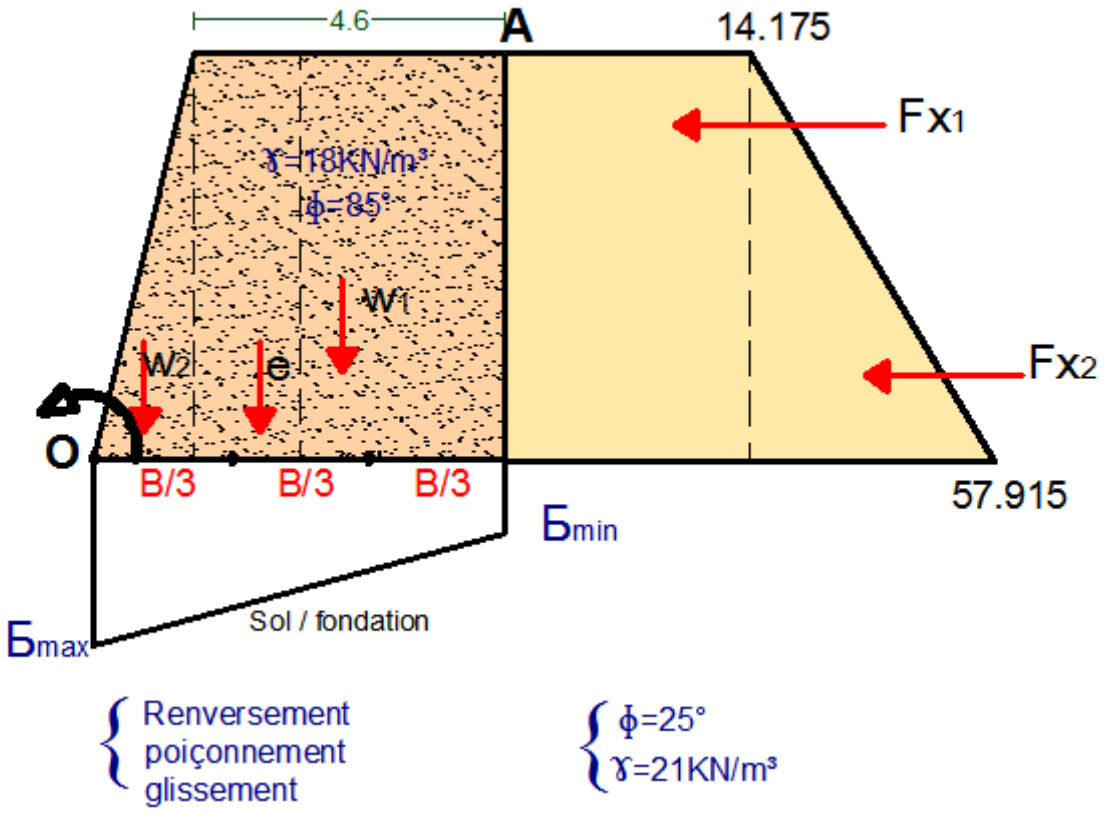


Figure 4-7 Fonctionnement externe d'un mur en remblai renforcé

Le calcul de la contrainte de la poussée des terres permet de déterminer les différentes forces de poussée appliquées dans le massif. (Voir le tableau ci-dessous)

Calcul dela contraintes σ

σh1 = q x Ka = 35 x 0,405 = 14,175 KPA

σh2 = 6h1 + (σv1 x Ka) = 14,75 + ((18x6) x 0,405) = 57,915 KPA

Calcul des forces de poussées:

Fa1 = σh1 x h = 14,175x 6 = 85,05 KN/m

Fa2 = $\frac{(\sigma h2 - \sigma h1)}{2}$x h = (57,915−14,175) /2 x 6 = 131,22 KN/m

	Fv (KN/m)	Fh (KN/m)	XFi/O (m)	Mstab/O (KN.m/m)	Mrenv/O (KN/m)
Fa1 h	/	77,0553	3	/	231,1659
Fa1 v	35,8911	/	6,09	218,576799	/
Fa2 h	/	118,88532	2	/	237,77064
Fa2 v	55,37484	/	6,09	337,232776	/
W1	496,8	/	3,8	1887,84	/
W2	80,46	/	0,75	60,345	/
Somme$\sum =$	$\sum \boldsymbol{Fv}$ =668,52594	$\sum \boldsymbol{Fh}$ =195,94062		$\sum \boldsymbol{Mstab}$ =2503,99457	$\sum \boldsymbol{Mren}$ =468,93654

Tableau 4-7 Résultats de la stabilité externe

La stabilité externe dépend de la capacité portante(le poinçonnement du sol de fondation), du renversement, et de la résistance au glissement.

Vérification de la capacité portante (poinçonnement)

$$\sum \boldsymbol{résul} = \sum \boldsymbol{M(stabilisant)} - \sum \boldsymbol{M(reversant)} = \boldsymbol{M0}$$

Calcul de M0

M0 = $\mathbf{2503,99457 - 468,93654 = 2035,05}$ KN.m/m

Calcul de e0 :

$$e0 = \frac{2035,05}{668,5259} = 3$$

Rapport-Gratuit.com

Calcul de e :

$$e = \frac{6,09}{2} - 3 = 0,045$$

Réparation trapézoïdal

$$0 < e < \frac{B}{6}$$

La condition à vérifier est :

$$qréf \leq qadm$$

Avec :

$$qréf = \frac{3.\sigma max + \sigma min}{4}$$

$$\sigma max = \frac{Fv}{B.L}.(1 + \frac{6.e}{B})$$

$$\sigma max = \frac{668,5259}{6,09*1}.(1+\frac{6*0,045}{6,09}) = 114,64 \text{ KN/m2}$$

$$\sigma min = \frac{Fv}{B.L}.(1 - \frac{6.e}{B})$$

$$\sigma min = \frac{668,5259}{6,09*1}.(1- \frac{6*0,045}{6,09}) = 104,90 \text{ KN/m2}$$

$$qréf = \frac{3*114,64+104,9}{4} = 112,205 \text{ KN/m2}$$

Calcul de q_{adm} :

Cas d'une semelle filante excentrée :

$$\boldsymbol{ql = \frac{1}{2}.\gamma.B'.N\gamma + q.Nq + C.Nc}$$

Avec : B'= B - 2.e

B'=6 m,

C=0 (sol sableux), Nɤ, Nq, Nc sont des facteurs de portance qui dépendent de **ϕ**.

Pour **ϕ**= 25° : Nɤ = 10,88 Nq = 10,66 Nc = 20,72 (selon le tableau des recommandations de l'Eurocode7. (R frank, 1997)

$$ql = \frac{1}{2} * 21*6*10,88 + (18*6)*10,66 = 1830,24 \text{ KN/m}^2$$

$$qadm = \frac{1830,24 - 18*6}{3} + (18*6) = 682,08 \text{ KN/m}^2$$

qréf = 112,205 ≤ qadm = 682,08 KN/m² **C.V (condition vérifiée)**

Vérification auglissement

Les forces stabilisantes Rv = ∑Fv = 668,5259 KN/m

Les forces motrices : Rh = ∑Fh = 195,9406 KN/m

$$Fs = \frac{668,5259 * tan25}{195,9406} = 1,6 > 1,5$$ **C.V**

Vérification au renversement

Les moments renversant Mrenv/O = 468,9365

Les moments stabilisant Mstab/O = 2509,9945

$$Fs = \frac{2509,9945}{468,9365} = 5,35 > 1,5$$ **C.V**

4.6.3 Stabilité globale

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer la surface critique d'une pente et le facteur de sécurité qui lui est associé. Toutes ces méthodes dites d'équilibre limite ont en commun la même difficulté qui est de trouver à la fois :

- La surface critique.
- Les contraintes normales et tangentielles le long de cette surface.
- Le facteur de sécurité (sur le critère de rupture) en partant des équations d'équilibre.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

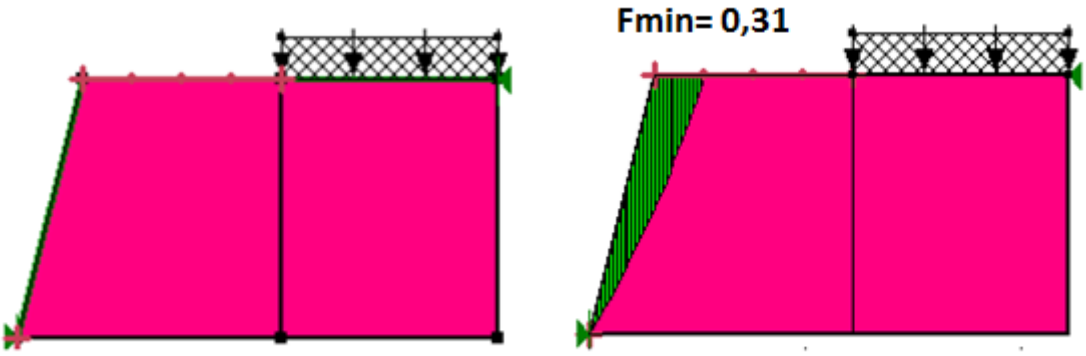
On fait la mise en équation du problème de l'équilibre d'une masse de sol par la décomposition du talus en tranches dont on étudie d'abord l'équilibre individuel, avant de globaliser le résultat en faisant intervenir certaines hypothèses simplificatrices. C'est la méthode des tranches (méthode de Bishop).(MAMERI KAHINA, 2015)

Modélisation par le programme GEOSTUDIO

Pour mieux étudier le comportement de notre remblai vis-à-vis du risque de l'instabilité, des analyses statiques ont été élaborées pour examiner le coefficient de sécurité. En prenant en compte l'influence du renforcement par bandes de géogrilles sur la stabilité de l'ensemble et l'influence des espacements entre les bandes de géogrilles sur le coefficient de sécurité.

Premier cas avant renforcement (casstatique)

La première analyse a été faite sur notre modèle sans renforcement par bande de géogrille, l'analyse se fait par la méthode des tranches Bishop par le modèle des cercles de glissement par rapport au pied de talus, en fonction d'une charge uniformément répartie q= 35KN/m^2 et les résultats obtenus sont illustrés sur les figures qui suivent :



On remarque que le coefficient de sécurité est très faible et inférieur à1,5.

Donc, la condition de Fs= 0,31<1,5 n'est pas vérifiée d'où la stabilité du remblai n'est pas assurée.

Après renforcement avec les géogrilles

Un espacement vertical Sv = 0,5m entre les lits de renforcement par l'inclusion de bandes en géogrilles, avec un nombre de couches de bandes égal à 12.

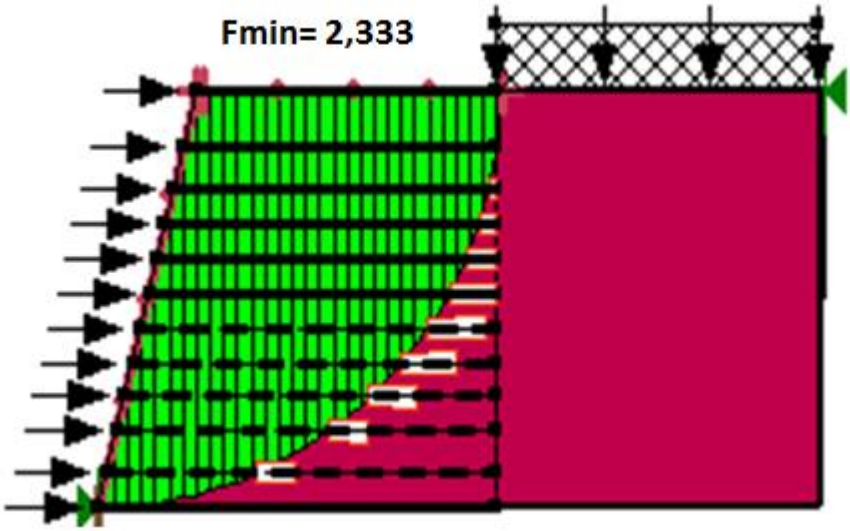
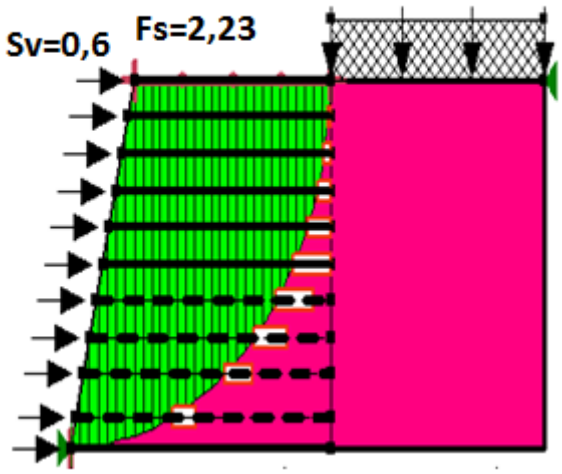


Figure 4-8 Stabilité globale après l'ajout des géogrilles par GEOSTUDIO

On remarque que le coefficient de sécurité vérifie la condition de Fs = 2,333 >1,5 ce qui implique que la stabilité au grand glissement est assurée.

Deuxième cas variation des espacements

nous avons fait varier les espacements verticaux (0,5m et 0,6m), sous une charge uniformément répartie q=35KN/m^2.



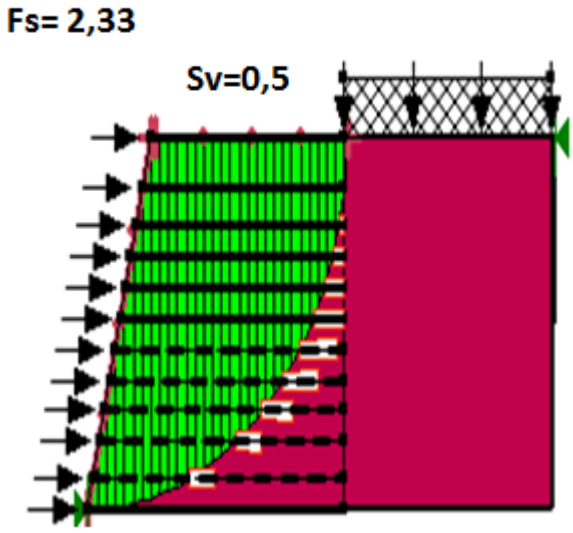


Figure 4-9 Espacement vertical Sv= 0,5m ; Sv= 0,6m

Pour un espacement Sv = 0,5m avec 12 couches de nappes en géogrilles, nous avons un coefficient de sécurité Fs= 2,33.

Pour un espacement Sv = 0,6m avec 10 couches de nappes en géogrilles, nous avons un coefficient de sécurité Fs = 2,23.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.7 Interprétation des résultats

Concernant la stabilité interne, on observe que la traction maximale dépend de l'espacement vertical qui doit être inférieur à la résistance à la traction du géosynthétique.

Pour un coefficient de sécurité Fs=1,82 cela vérifie la condition de

Fs >1,5.

Plus les espacements verticaux diminue plus le coefficient de sécurité augmente.

La stabilité externe du mur en sol renforcé par géogrilles dépend essentiellement de la vérification du coefficient de sécurité vis-à-vis du glissement, du poinçonnement et du renversement, pour des coefficients de sécurité supérieurs à 1,5.

- Au glissement Fs = 1,6 > 1,5 ;
- Au reversement Fs = 5,35 > 1,5.

La stabilité globale a été examinée selon la méthode de Bishop en observant des cercles de glissement, les résultats obtenus montrent que plus l'espacement entre les bandes de géogrilles diminue, plus le coefficient de sécurité augmente.

Le renforcement par géogrilles à amélioré considérablement la stabilité du remblai avec un coefficient de sécurité Fs supérieure à 1,5.Cela signifie que l'espacement entre les bandes de géogrilles influesur le coefficient de sécurité.

Pour un espacement Sv= 0,5 m avec 12 couches de nappes en geogrilles, nous avons un coefficient de sécurité Fs= 2,33.

Pour un espacement Sv= 0,6 m avec 10 couches de nappes en geogrilles, nous avons un coefficient de sécurité Fs= 2,23.

On remarque que le coefficient de sécurité a baissé pour un nombre de couches inférieur.

Après les calculs on constate que les conditions de stabilité sont vérifiées pour l'interne, l'externe et le globale.

4.8 Mise en œuvre

Le choix de bonne qualité des géosynthétiques et un dimensionnement précis et une mise en œuvre soigneuse, ce sont des facteurs qu'on doit assurer pour l'efficacité d'un massif de soutènement renforcé par géosynthétiques.

La construction d'un ouvrage de soutènement en terre armé comporte les phases suivantes :

Terrassement

Tout d'abord, le terrassement s'effectue par une opération de déblaiement de talus jusqu'au bon sol, puis creuser une tranchée pour le drainage des eaux, ce drain est rempli par un ballast renfermé par le géosynthétique pour la fonction de filtration.

Dans notre cas, on fixe une pente du talus égale à 76° ; Ce rapport correspond à la tangente de l'angle formé par le talus avec l'horizontal.

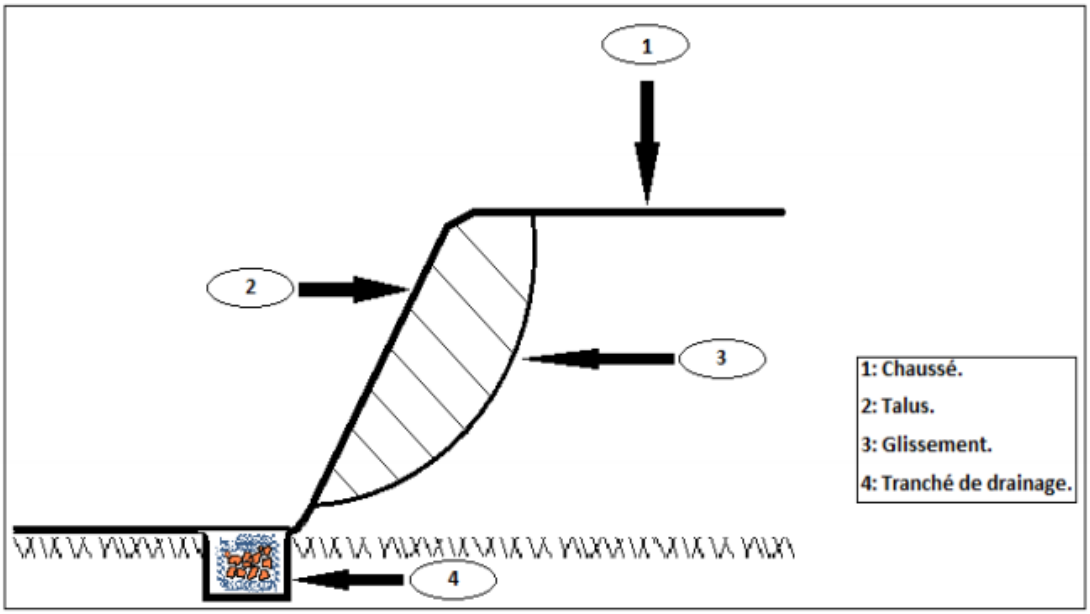


Figure 4-10 Terrassement

Mise en place des couches

La construction d'un remblai s'effectue de bas en haut par couches successives, la plateforme où se pose les bandesde géogrille doit être compactée et niveléepour lapréserver de tout endommagement.

La réalisation d'un massif en sol renforcé consiste à renforcer un sol au fur et à mesure de la mise en oeuvre des couches de remblais par des bandes de géogrilles, cette opération sera comme suit :

Mise en place du premier lit d'armature engéogrille sur toute la surface de la couche d'assise au moment de leur recouvrement par les matériaux de remblais, suivant des étapes de « réglage, arrosage et compactage »attaché aux parements.Les bandes de géogrilles sont liaisonnées au parement par un système de connexion.

Systéme de drainage

Il convient de prévoir un drainage efficace et pérenne de l'ouvrage, on particulier à l'amont de l'ouvrage à parement vertical ou situé sur la pente.Cette méthode consiste à protéger les bandes de géogrille liaisonnées au parement par une couche drainante de polyéthylène (géocomposites).

La première couche de remblais est mis en place au fur a mesure de la pose du parement voir **Figure 4-12**, par couche de 50 cm d'épaisseur, la mi-distance entre deux lits de renforcement compacté est de 50 cm,dont i Il faut éviter le passage direct des engins sur les bandes de géogrilles.

Le compactage de l'épaisseur de réglage est exigé à 95% de la densité maximum Proctor Normal. Pour garantir la compacité exigée, il faut prendre en compte le choix de l'enginde compactage, nature et de l'état du matériau utilisé.(CfG, 1990)

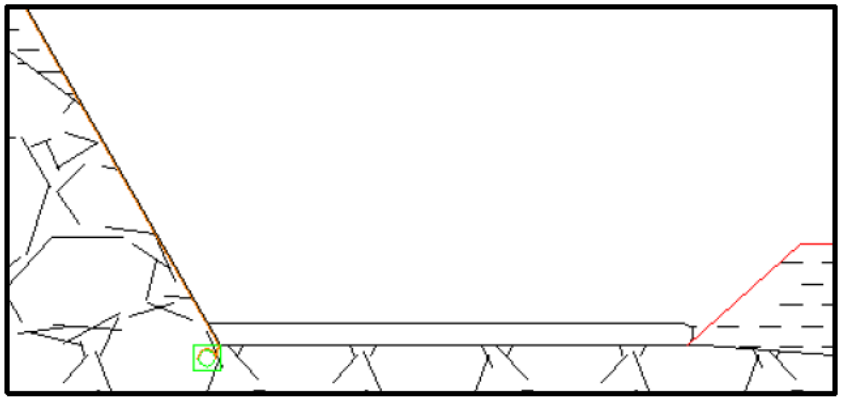


Figure 4-11 Mise en œuvre de la première couche

Mise en place et compactage de la deuxième couche de sol de même épaisseur que la première « Sv= 0.50 m ». Voir la **Figure 4-12**ci-dessous :

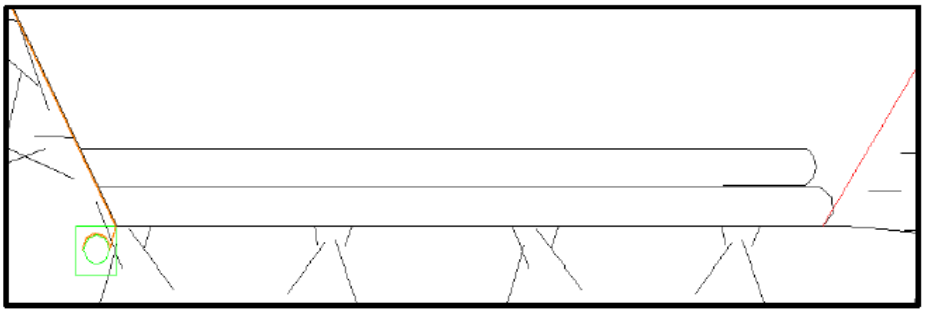


Figure 4-12 Mise en œuvre de la deuxième couche

Ces étapes sont répétés de manière répétitif (Sv= 0,5m) jusqu'à atteindre la hauteur de 6m.voir la**Figure 4-13** Mis en place par couche successives compactées

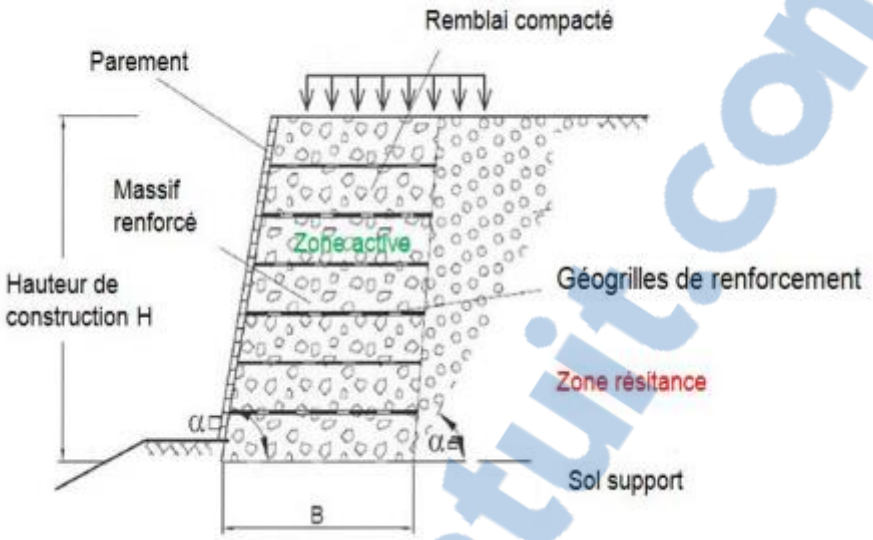


Figure 4-13 Mis en place par couche successives compactées(Laurent Sakou, 2017)

Mise en œuvre du parement type gabion

Le parement dans ce cas est formé par l'empilement de gabions les uns sur les autres en combinaison avec des bandes de géogrille, permettant d'obtenir un massif renforcé.

Ces cages, remplies de cailloux ou de pierres cassées, mesurent d'ordinaire de 0,5 m à 1,0 m de hauteur, 2 m à 3 m de longueur et 0,5 à 1,0 m de profondeur.Les gabions sont reliés aux bords inférieurs, côté remblai par des connecteurs à des œillets en acier avec les géogrilles. (Ali, 2013) (voir la**Figure 4-14**)

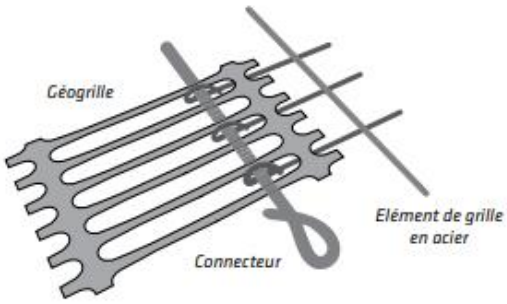


Figure 4-14 Elément de connexion

Rapport-Gratuit.com

Raccord aux éléments de gabions

La liaison des géogrilles avec des éléments de parement en gabions s'effectue en plaçant des tiges en acier galvanisé dans les ouvertures des géogrilles au niveau des nervures à travers les œillets, prévus à cet effet, des treillis métalliques ou des cages de gabions voir **Figure 4-15**.(TensarTech®, 2017)

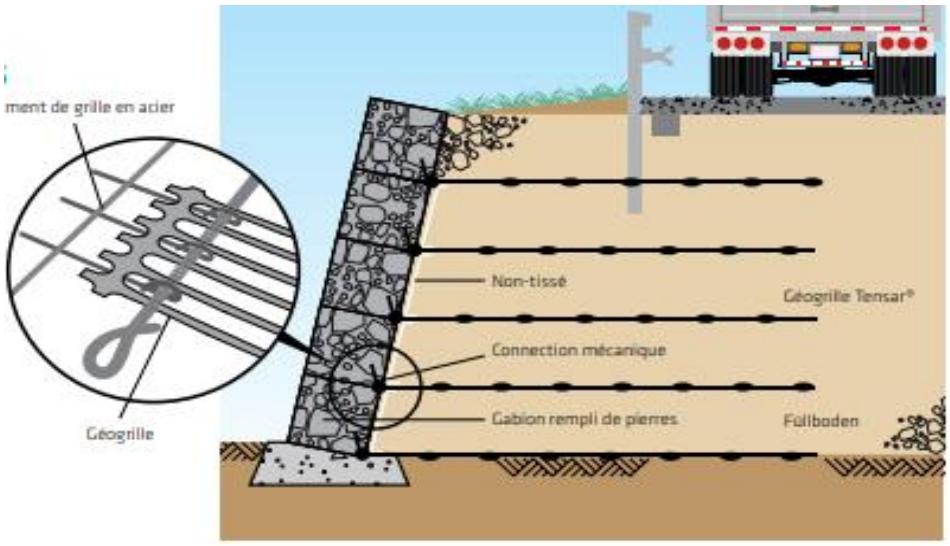


Figure 4-15 Raccord aux éléments de gabion (TensarTech®, 2017)

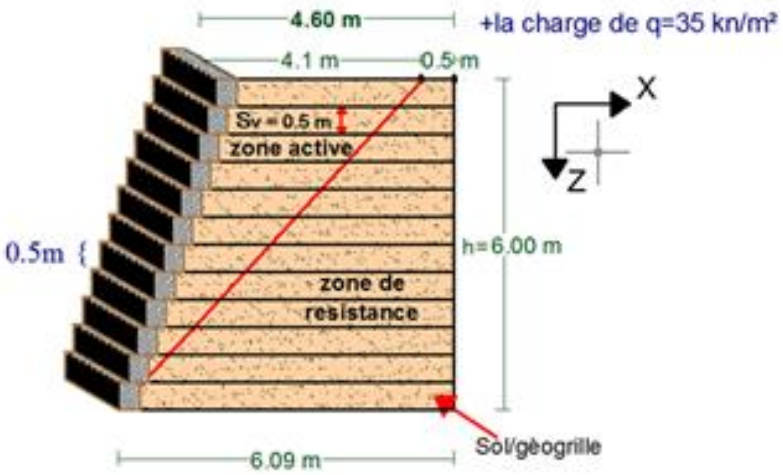


Figure 4-16 Parement en gabion achevé

Mise en œuvre des panneaux en béton type écaille cruciforme

Ce sont des plaques d'environ 850 kg et de 1,5m de largeur,leur hauteur est en général de 1 m à 2 m et leur épaisseur de 100 à 200 mm.Lors de leur mise en place, elles sont imbriquées les unes dans les autres. L'ensemble donne au parement une flexibilité verticale, les formes distinctives de ces panneaux sont liées à leurs modes d'assemblage et aux méthodes spécifiques de construction. (voir la**Figure 4-17**. (Ali,2013)

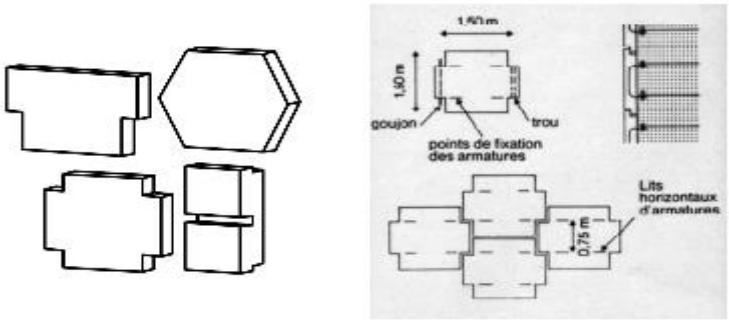


Figure 4-17 type d'écaille en cruciforme

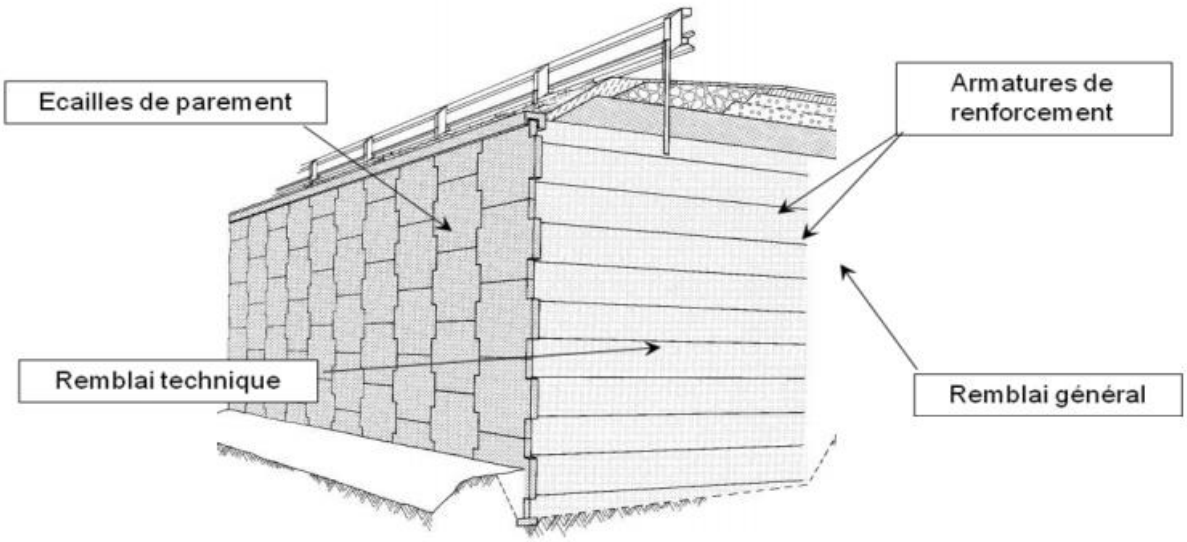


Figure 4-18 Parement en écaille

La sécurité du système est garantie par une connexion mécanique entre le bloc et la géogrille grâce à des éléments d'ancrage spécifiques comme

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

illustré sur la **Figure 4-19**ci-dessous.

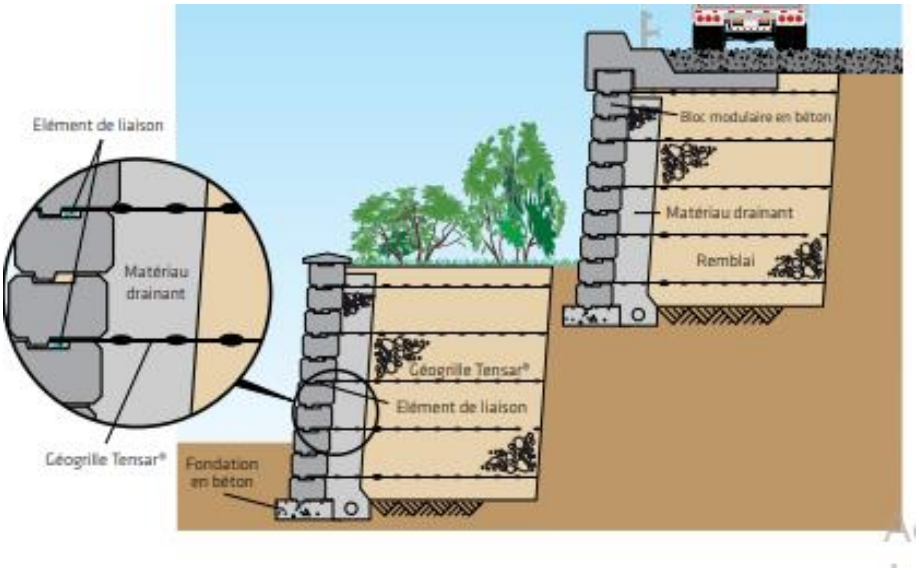


Figure 4-19 Parement en béton préfabriqué

Connexion aux éléments préfabriqués en béton

Lors de la fabrication d'éléments préfabriqués en béton, de petites longueurs de géogrille sont fixées à l'armature en acier et bétonnées.

Du fait de leur résistance élevée aux produits chimiques, les géogrilles peuvent être utilisées sans problème en milieu alcalin (TensarTech®, 2017).

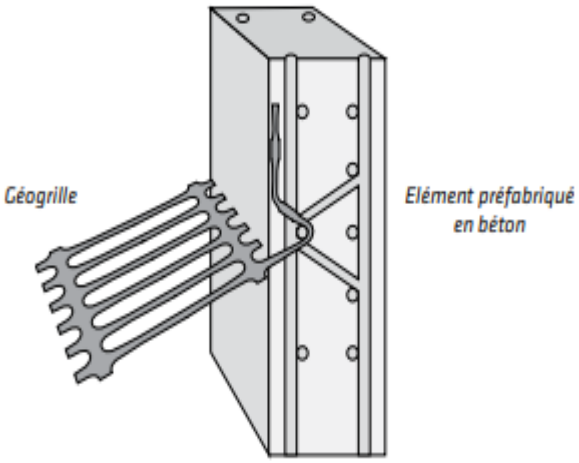


Figure 4-20 Connexion entre les éléments préfabriqués et géogrilles

4.9 Comparaison des devis quantitatifs et estimatifs

Devis quantitatif et estimatif de mur en remblai renforcé par géogrille avec retour au parement constitués de gabion, sur le tableau ci-dessous :

N	Désignation	U	Q	P.U « DA »	Montant« DA »
1	Etudes	F	1	37 200	37 200,00
2	Déblai en terrain sableux	M^3	1603,5	700	1122450,00
3	Réglage des fouilles	M²	305	540	164700,00
4	Mise en remblais	M^3	1827	650	1187550,00
5	Couche de géogrilles	M²	3 207	1 500	4810500,00
6	Filtre drainant géocomposites	M^3	6	1 000	6000,00
7	Parement en gabion	M²	310	6 000	1860000,00
				MONTANT EN HORS TAXES	9188400,00
				TVA 19%	1745796,00
				MONTANT EN TTC	10934196,00

Devis quantitatif et estimatif de mur en remblai renforcé par géogrille avec retour au parement constitués d'écailles en béton préfabriqué, sur le tableau ci-dessous :

N	Désignation	U	Q	PU « DA »	Montant « DA »
1	Etudes	F	1	62 000	62 000,00
2	Déblai en terrain sableux	M^3	1603,5	700	1122 450,00
3	Réglage des fouilles	M²	305	540	164 700,00
4	Mise en remblais	M^3	1 827	650	1187 550,00
5	Couche de géogrille	M²	3207	1500	4810 500,00
6	Filtre drainant	M^3	6	1000	6 000,00
7	Parement écaille	M²	310	10000	3100 000,00
				MONTANT EN HORS TAXES	10453 200,00
				TVA 19%	1986 108,00
				MONTANT EN TTC	12439 308,00

Devis quantitatif et estimatif de mur de soutènement à l'entrée de poste BENI-Saf 2 sur le tableau ci-dessous :

N	Désignation	U	Q	PU « DA »	Montant « DA »
1	Etude	F	01	394308	394308,00
2	Installation de chantier	F	01	985770	985770,00
3	Déblai en terrain meuble	M^3	320	800	256000,00
4	Réglage des failles	M²	250	650	162500,00
5	Mise en remblais	M^3	830	1000	830000,00
6	Béton de propreté	M^3	35	6850	239750,00
7	Béton coulé sur place dosé à 350 Kg/m3	M^3	195	14500	2827500,00
8	Coffrage	M²	640	15600	9984000,00
9	Aciers	Kg	33900	135	4576500,00
10	Barbacanes	Ml	55	450	24750,00
11	Peinture bitumineuse	M²	600	300	180000,00
12	Tuyau en PVC perforé	Ml	55	1200	66000,00
13	Filtre drainant	M^3	196	2900	568400,00
				MONTANT EN HORS TAXES	21095478,00
				TVA 19%	4008140,82
				MONTANT EN TTC	25103618,8

4.10 Interprétation des devis quantitatifs et estimatifs

Pour un devis quantitatif estimatifs de mur de soutènement qui se situe à l'entrée de poste Beni-saf 2, on relève que le montant global est beaucoup plus élevé par rapport au montant du mur en remblai renforcé par géogrille avec retour au parement.

D'autre part le mur en remblai renforcé par géogrille avec retour au parement constitué de gabion est plus économique que le retour au parement constitué d'écaille cruciforme, avec une différence d'un milliard de dinars du montant estimé. Or la solution du parement en écaille est recommandée d'un point de vue esthétique et durable à la fois et la solution du parement en gabion est recommandée d'un point de vue plus économique. Donc le choix du parement se fait selon le besoin du concepteur.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.11 Conclusion

La technique de la réalisation de mur de soutènement renforcé par géogrilles associée à un parement, est une solution exécutée à l'entière satisfaction des intervenants dans le respect des objectifs initiaux, qui sont :

- Assure la stabilité.
- Pour stopper les désordres.
- La réduction des coûts du projet,
- L'exécution dans des délais très réduits,
- Le perfectionnement de l'environnement immédiat

Pour une bonne étude de comportement du remblai, des analyses ont été élaborées pour vérifier le coefficient de sécurité Fs afin d'éliminer le risque de glissement.

En prenant en compte l'influence des espacements entre les bandes de géogrilles pour but d'optimiser l'aspect économique.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse était de développer la compréhension du comportement des ouvrages en terre armée renforcés par des bandes de renforcement géosynthétiques. Ce travail a permis d'améliorer la connaissance de l'interaction sol/renforcement.

Dans ce mémoire, nous avons commencéen premier lieu par décrire des notions générales sur les géosynthétiques concernent leur fonction et application dans les ouvrages, et les différentes méthodes de renforcement des sols.

En second lieu nous avons présenté notre cas d'étude qui est le projet d'un glissement de terrain situé sur la côte de la wilaya d'Ain-Temouchent, à l'entrée au poste de Beni-Saf 2.

Notre choix d'étude,vise à remplacer la solution qui a été proposé lors de l'élaboration de ce projet qui consiste à changerla méthode traditionnelle d'un mur de soutènementpar la méthode d'inclusion de bandes en géogrilles pour but d'optimiser l'aspect économique.

La troisième partie a été dédier au dimensionnementet la justification de la stabilité interne, externe et globaleen vérifiant le coefficient de sécurité FS en prenant en compte l'influence des espacements entre les bandes des géogrilles .

La vérification statique par un calcul manuel a donné des coefficients de sécurité vérifiant la condition de la stabilité interne et externe, pour la stabilité globale du glissement, la vérification s'est faite par un calcul numérique à l'aide du programme GEOSTUDIO tout en varient les espacements verticaux.

Dans la dernière partie, une étude comparative a été faite entre les résultats obtenus des devis quantitatifs et estimatifs.

Au final ce projet qui constitue pour nous une première expérience, nous a été très bénéfique que ce soit dans l'aspect scientifique ou technique, et ça reste une étape très importante qui demande des connaissances de certaines notions de base des sciences de l'ingénieur.

Les références bibliographiques

- **(CFG) le Comité français des géosynthétiques** Définition, mise en œuvre et dimensionnement des géosynthétiques [Revue] // le moniteur des travaux publics et du batiment. - 2015. - pp. 1-40.
- **10318-1:(fr) ISO** Géosynthétiques — Partie 1: Termes et définitions [Livre]. - [s.l.] : ISO (Organisation internationale de normalisation), 2015.
- **AASHTO** LRFD bridge design specification [Livre]. - Washington, D.C, USA : American association of state hightway and transportation officials (AASHTO), 2012.
- **AFNOR norme NF EN ISO 10318-2** Géosynthétiques – Partie 2 : Symboles et pictogrammes [Livre]. - 2015.
- **Ali Farik** ANALYSE NUMÉRIQUE DES DÉFORMATIONS DES CULÉES DE PONT EN SOL RENFORCÉ [Livre]. - Biskra : Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- **ASTM** - American Society for Testing and Materials [Livre]. - Aooual Books of ASTM Standards West Conshohocken, Pennsylvania : Volume 4.09 (II), Soil and Rock; Geosynthetics, 1997.
- **BACCON Omar NACIR et Frédéric LE** REMBLAIS RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUES DANS DES OUVRAGES D'INFRASTRUCTURE: ILLUSTRATION DE LA VARIÉTÉ DE PAREMENT AU TRAVERS DE PROJETS RÉCENTS [Livre]. - Lille, France : Rencontres Géosynthétiques, 2017.
- **BORDES Jean-Louis** Géomembranes - Utilisation en génie civil [En ligne] // Techniques de l'Ingénieur. - 10 mai 1995. - Techniques de l'Ingénieur.
- **BOUAFIIA Allii** Murs en remblai renforcé [Livre]. - Département de Géniie Civil Uniiversiité Saâd Dahlleb de Blliida : OFFICE DES PUBLICATIONS UNIVERSITAIRES 1, Place centrale Ben-Aknoun (Alger) Tome 1 :: Fondations superficielles et proffondes, 2018.
- **Delmas Philippe** LES GEOSYNTHETIQUES AU SERVICE DU DEVELOPPEMENT DURABLE, [Rapport]. - [s.l.] : comité Français des Géosynthétiques, 2011.
- **fiberetex** Géotextiles Non-Tissés Fibertex Guide de dimensionnement, d'utilisation et de mise en œuvre [Rapport]. - FRANCE : Fibertex Nonwovens, 2018. - p. 50.
- Fiche technique Rock PEC [Représentation].
- **geosynthetique Comité français des** Recommandations des l'emplois des geotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre [Livre]. - france : [s.n.], 1990.
- **GOTTLELAND Jean-marc TACNET-Philippe** Ouvrage de protection contre les risques naturels et ouvrages en sites instables [Rapport]. - 2000. - p. 24.

- **Guilbaud Robin** l'utilisation des geosynthetique dans les chaussé [Rapport]. - 2011. - p. 33.

- **Huckert Audrey** Approches expérimentale et numérique du dimensionnement de renforcements géosynthétiques sur cavités et inclusions rigides [En ligne] // HAL archies- ouvertes.fr . - 26 mai 2014. - https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01296474 NNT : 2014GRENI030ff. fftel-01296474f.

- **JOHAN BRUHIER** Ouvrage de soutenement en sol renforce par geogrille // retour d'experience marocaine. - p. 16.

- **Lambert S.** Les géomembranes [Livre]. - [s.l.] : Ingénieries - E A T, IRSTEA édition p. 27 - p. 40. ffhal00461031, 1997.

- **Laurent BRIANÇON Philippe DELMAS** Les géosynthétiques de renforcement [Article] // techniques de l'ingénieur. - 10 avril 2017. - pp. 1-39.

- **Laurent BRIANÇON, Philippe DELMAS** Les géosynthétiques de renforcement [Article]. - 10 avril 2017. - p. 305.

- **Laurent Sakou Romain Durand ,Michel Mbessa, Giuseppe Ballestra** Rencontre geosynthetiques [Représentation]. - lile : [s.n.], 7 mars 2017.

- **LCPC** recommandations par l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des murs en remblai renforcé par éléments géosynthétiques [Livre]. - paris : laboratoire central des ponts et chaussées, 2003.

- **MAMERI KAHINA MANI SAMIR** Etude de stabilité et confortement d'un glissement de terrain RN 24 au PK 235+500 [Livre]. - Bejaïa : Université Abderrahmane. MIRA, , 2015.

- **Mohamed DJABRI** Etude de la sensibilité de la réponse sismique à la disposition du renforcement des remblais d'accès de pont [Livre]. - Biskra : Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

- **NF94-270 Norme** Calcul géotechnique ouvrages de soutènement, Remblais renforcés et. - Juillet 2009.

- **R frank C Bauduin,R Driscoll,M Kavvadas, N Krebs Ovesen, T orr and B Schuppeneur** Eurocode7 Getechnical design-general rules. - 1997.

- **Rahmouni Ouassim** contribution à l'étude numérique des ouvrages de soutènement renforcés par géogrille [Livre]. - BISKRA : université de Biskra, 2017.

- **TABTI Messaoud ZERMANI et Said** LES GÉOSYNTHÉTIQUES // FONCTIONS ET APPLICATIONS ET RETOUR D'EXPÉRIENCE EN ALGÉRIE. - ourgla : [s.n.], 10 mars 2016.

- **Tatsuoka** . - 1993 .

- **tencate** les solution tencate pour le renforcement des base de remblais [Représentation]. - france : [s.n.], 2016.

- **Tensar** fiche technique [Représentation].
- **TensarTech®** TensarTech-Systemes-en-sols-renforces-FR [En ligne] // pentes abruptes, murs de soutènement. - 2017. - www.tensar.fr.
- **TOUZE-FOLTZ Nathalie** Les géosynthétiques,itinéraire d'une recherche partagée [Article] // Sciences Eaux & Territoires. - 2016. - p. n°18.
- **VILLARD Pascal BRIANÇON Laurent** Le renforcement des sols : des techniques devenues indispensables [Revue]. - 30 10 2018.
- **Zornberg J.G., and Christopher, B.R.** Chapter 37: Geosynthetics." In: The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd Edition, [Livre]. - Boca Raton, Florida. : Jacques W Delleur (Editor-in-Chief), CRC Press, Taylor & Francis Group,, 2007.

Les sites bibliographiques

- [En ligne] // geoturf.com. - geoturf.com.
- [En ligne] // dzly-buildingmaterials.fr. - dzly-buildingmaterials.fr.
- [En ligne] // sealeco.com. - sealeco.com.
- [En ligne] // hxgeos.fr. - hxgeos.fr.
- [En ligne] // fr.geogridchina-sp.net. - fr.geogridchina-sp.net.
- [En ligne] // archiexpo.fr. - archiexpo.fr.
- https://www.faapa.info/ [En ligne]. - https://www.faapa.info/.
- https://www.mtaterre.fr [En ligne]. - https://www.mtaterre.fr.
- https://www.revue-ein.com/ CFG [En ligne]. - https://www.revue-ein.com/ CFG.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES