REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : géotechnique

Thème : Valorisation d'un sable de dune pour la conception de corps de chaussé par l'introduction d'un matériau géotextile

---

Présenté par :

Messahel Mohamed

Ben aichouba Ibrahim

Proposé et Dirigé par :

Dr. Laazazi menaa

Promotion Juin 2019/2020

REMERCIMENTS

Nous remercions dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté afin de poursuivre nos études Nous voulons remercier Dr.LAAZAZI MENAA nos encadreur non pas par simple courtoise mais pour ses précieux conseils et son orientation qui a permis de mener à bien ce travail

Nous adressons nos vifs remerciements à messieurs les membres de jurys

A. Qui voulut accepter de participer au jury de notre thèse.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil qui nous ont offert tout ce savoir.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous les dits merci de tout notre cœur.

DEDICASES

❖ Je dédie ce travail aux personnes les plus chères au monde après mon Dieu :

A mes chers parents qui m'ont toujours entouré de leur affection, et mes sœurs que dieu les gardes et préserve.

A mon directeur de thèse LAAZAZI MENAA pour se encouragements. J'apprécié grandement ce méthode de travail et la liberté qu'il m'a accordé au cours de la préparation et L'organisation de ce travail de recherche.

Et enfin à tous ceux qui m'ont accompagné dans mes études et à tous mes chers amis sans exception.

❖ Je dédie ce travail aux personnes les plus chères au monde après mon Dieu :

A mes chers parents que dieu les gardes et préserve ;

A mes frères mes sœurs et toute la famille de ben aichouba ;

A toutes les chères personnes dans ma vie ;

À tous mes professeurs ;

A tous mes collègues ;

RESUME

ملخص:

تم استخدام المواد الجيوإصطناعية لأكثر من ثلاثين عامًا في مجال الهندسة المدنية. مجالات استخدامها عديدة ومتنوعة: الصرف، الترشيح، الفصل، تقوية السدود والأرصفة، الحماية من التآكل، إلخ. لا يزال استخدام المواد الجيوإصطناعية في الجزائر محدودًا للغاية على الرغم من التقدم الذي أحرزته بلادنا للتو على مدى العقد الماضي في مجال الأشغال العامة.
الهدف من مشروع نهاية الدراسة هذا هو إلقاء الضوء على هذه التقنية من خلال دراسة ببليوغرافية موثقة للغاية. أولاً، سوف نقدم بعض المفاهيم العامة حول التركيبات الأرضية ومجالات استخدامها. ثم سنقدم لك التقنيات المختلفة المستخدمة في جيوتقنيات الطرق إن استعمال هذه المواد يمنح للمنشأة فوائد ميكانيكية واقتصادية.
في بعض الحالات، قد نحتاج للبناء على أرضية وعرة أو في أحوال بيئية سيئة، فإن استعمال المركب التربتي المناسب يرفع من المقاومة الميكانيكية للأرضية الحاملة ما يسمح لنا بإنشاء جذع الطريق بسمك بسيط، أي حماية المحيط وخفض تكلفة المشروع.
في هذه المذكرة ندرس النمذجة الرقمية للتحسّن الحاصل في قوة تحمّل أرضية الطريق المدعّمة بالشبكيات الترابية والمنشأة على أرضية ذات قوة تحمّل ضعيفة. الهدف من النمذجة الرقمية بواسطة برنامج بلاكسيس هو تحليل الزيادة في قوة تحمل قاعدة الطريق بهدف إنقاص سمك الطبقات في جذع الطريق.
الكلمات المفتاحية: شبكية ترابية، نمذجة، أرضية طريق، تدعيم.

Résumé :

Les géosynthétiques sont mis en application depuis plus d'une trentaine d'années dans le domaine du génie civil. Leurs domaines d'emploi sont nombreux et variés : drainage, filtrage, séparation, renforcement des talus et de chaussées, protection contre l'érosion,…etc. L'utilisation de géosynthétiques en Algérie reste très limitée malgré le progrès que vient d'avoir notre pays pendant la dernière décennie dans le domaine des travaux publics. L'objectif de ce projet de fin d'étude est de mettre la lumière sur cette technique à travers une étude bibliographique très étayée. Dans un premier temps, nous allons exposer quelques notions générales sur les géosynthétiques et leurs domaines d'utilisation. Ensuite nous présenterons les différentes techniques de géosynthétiques utilisées en géotechniques routière.

L'utilisation de ces matériaux présente des intérêts mécaniques et économiques pour l'ouvrage. A certains cas, on est besoin de construire sur des terrains difficiles ou dans des zones de mauvaises conditions environnementales; l'usage d'un géosynthétique adéquat va augmenter la résistance mécanique du sol support ce qui nous permet de réaliser un corps de chaussée de faible épaisseur c'est-à-dire la protection de l'environnement et la diminution du coût du projet. Le présent travail de recherche s'intéresse à la simulation numérique de l'amélioration de la portance d'une plateforme de route renforcée par géogrilles reposant sur un sol de faible portance. Les simulations numériques par le code de calcul Plaxis, ont pour objet d'analyser le processus d'amélioration de la portance du sol support afin de réduire l'épaisseur des couches du corps de la chaussée.

Mots clés : géogrille, modélisation, plate-forme routière, renforcement.

Abstract:

Geosynthetics have been used for more than thirty years in the field of civil engineering. Their fields of use are many and varied: drainage, filtering, separation, reinforcement of embankments and pavements, protection against erosion, etc.

The use of geosynthetics in Algeria remains very limited despite the progress our country has just had over the past decade in the field of public works. The objective of this end-of-study project is to shed light on this technique through a much substantiated bibliographic study.

First, we will present some general notions about geosynthetics and their fields of use. Then we will present the different geosynthetic techniques used in road geotechnics. The use of these materials presents mechanical and economic advantages for the structure.

In some cases, there is a need to build on difficult terrain or in areas of poor environmental conditions; the use of an adequate geosynthetic will increase the mechanical resistance of the support soil, which allows us to achieve a thin pavement body, that is to say the protection of the environment and the reduction in the cost of the project.

This research work is concerned with the numerical simulation of the improvement of the lift of a road platform reinforced by geogrids resting on a ground of low lift. Numerical simulations by the calculation code Plaxis, aim to analyze the process of improving the bearing capacity of the subsoil in order to reduce the thickness of the layers of the pavement body.
Keywords: geogrid, modeling, road platform, reinforcement.

Sommaire :

REMERCIMENTS
DEDICACES
RESUMES
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

I-Introduction……..……1
II-Les sols évolutifs ……..……2
1- Définition des sols évolutifs…….……2
2- Type des sols évolutifs …….……2
2-1 Les argiles……..….2
2-2 Les limons……..….2
2-3 Les marnes...…….…….2
III- Désordres occasionnés par l'utilisation des sols évolutifs dans les constructions de génie civil ……..……..3
1- Introduction : ……3
2- Phénomène de gonflement……...……4
3- Tassements ……...4
4- Glissements :…….4
5- Conséquences enregistrées :……..……4
5-1 Cas des bâtiments ……...5
5-2 Cas des chaussées ……5
6- Conclusion……7
III- Méthode d'améliorations des sols ……..7
I- Procédés Physiques ……...……...8
A- Préchargement ……..8
B. Drainage ……...11
C. Renforcement Par Inclusions ……...12
- Plot ballasté pilonné…….……..13
- Colonne ballastée vibrée……14

o Colonnes ballastées exécutées par voie humide……14
o Colonnes ballastées exécutées par voie sèche ……..14
- Colonnes pilonnées……15

D- Méthodes Par Ondes De Chocs Ou Vibrations ……...17
2- Procèdes Chimiques……..……18
A- Colonnes de sol traité en place ……...19
B- Compactage Statique En Profondeur ……..19
C- Amélioration Temporaire Par Congélation ……19
D-Traitement des sols à la chaux…….……19

D-1 Amélioration à la chaux 20
D-2 Traitement des sols au ciment Portland ……21
3- Quelques Méthodes De Renforcement Des Pentes……23
A. Le renforcement des talus par le clouage……24
B- La Terre Armée ……...24
C- Origine de la production de déchets : La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes ……..……24
C-1 Constitution chimique du déchet ……...25
C-2 Différents types de déchets 25
C-2-1 Déchets ultimes ……..25
C-2-2 Déchets inertes……...25
C-2-3 Déchets assimilés ……...25
C-2-4 Déchets verts : ……...26
C-2-5 Déchets organiques : ……..26
C-2-6 Déchets industriels banals (DIB) ……..……26
C-2-7 Déchets dangereux .. ……..……26
C-2-7-1 Déchets industriels spéciaux (DIS) ……..……26
C-2-7-2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) : ……26
D- le sable……..……..……26
D-1 Définition de sable ……..……..……26
D-3 Les sables de dunes……26
D-3-1 Définition ……..27
D-3-2 Intérêt de sable de dune ……..28
D-3-3 Utilisation du sable de dune ……..28
D-3-1 Définition ……..28
D-3-2 Intérêt de sable de dune ……..…28
D-3-3 Utilisation du sable de dune ……..28
IV-Stabilisations du sol……..28
1- Définition d'un sol instable ……28
2- But de la stabilisation du sol.……29
3-Technique de stabilisation ……29
3-Type de stabilisation.……...30
3-1 Le renforcement par encrage ……30
3-2 Murs de soutènement…….30
3-2-1 Introduction ……30
3-2-2 les différentes classes d'ouvrages de soutènement…….31
V. Fondations profondes (Pieux) ……..33
1- Définition d'un pieu :……33
2- Principaux types de pieux……..……...34
2-1 Différent types de pieux……...……...34
2-1-1 Pieux battus……....34
2-1-2 Pieux forés……...34
2-1-3 Puits……34

2-1-4 Gabions :……..34
VI- Généralité sur les geosynthetiques……35
1- Définition ……35
2- Origine des géosynthétiques……35
3- Différents types des géosynthétiques……36
3-1- Géotextiles……36
3-1- Géotextile non tissé……37
3-1-2- Géotextile tissé……37
3-1-3- Géotextile tricoté……38
3-1-4- Géotextile tube (géotuyaux)……38
3-2- Géogrille……39
3-2-1- Géogrille uni-axiale……39
3-2-2- Géogrille bi-axiale……39
3-3- Géofilet……..39
3-4- Géocomposite……40
3-5- Géosynthétiques bentonitiques……40
3-6- Géosynthétique alvéolaire……41
3-6-1- Tissé de bandelette……41
3-6-2- Mattes……41
3-6-3- Géoconteneur……42
3-7- Géomembranes……..42
4- Propriétés des géosynthétiques……42
5- Domaines d'application……...43
5-1- Les remblais routiers et ferroviaires……..43
5-2- Stabilisation des talus……..……43
5-3- Les remblais……..44
5-4- Les murs de soutènement……..45
5-5- Le contrôle de l'érosion……46
5-6- En agriculture……46
5-7- Traitement des eaux usées……47
5-8- Autres applications……48
VI-Corps de chaussée……48
1- Définition ……48
a) Couche de surface: ……...48
b) Couche de base……...48
c) Couche de fondation: ……..48
d) Couche de forme ……...48
2- Les différentes catégories de chaussée : ……..49
3- Les principales méthodes de dimensionnement: ……49
3-1- Méthode C.B.R (California - bearing - ratio): ……50
3-2- Méthode du catalogue des structures : ……50
3-3- Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP): …….....51

Chapitre II

1-présentation du site à étudier ……53
2- VARIANTE I : CAS D'INCLUSION DE NAPPES GTX……..…….53
3- METHODE DE DIMENSIONNEMENT ……...54
4- CARACTERISTIQUES DES MATERIAU A ETUDIER …….64
4-1 Géotextile non tissé…….64
4-2 GEOGRILLES ……...65
5- CAS D'ETUDE ……65

Chapitre III

I-Synthèse bibliographique sur l'outil numérique utilisé(PLAXIS)……66
I-1 Présentation de PLAXIS 8.2……...66
1-1 Introduction……66
a) Le programme d'entrée de données (Input)…….66
1-2- Les éléments de géogrille…….……69
1-3- Interfaces……..……70
1-4- Conclusion……73
I-2-Modélisation de plateforme routière renforcée et non renforcée……..73
2-1- Introduction…….……..73
2-2- Présentation du modèle étudié……...74
II- Calculs……...75
A- VARIANTE 1 : RENFORCEMENT AVEC GEOTEXTILE……....75
A-1 -CAS D'UNE NAPPE SOUS LA COUCHE DE BASE……...78
A-2 -CAS D'UNE NAPPE SOUS LA COUCHE DE FONDATION……..79
A-3 -CAS DE DEUX NAPPES DANS LE SOL SUPPORT……...81
COMMENTAIRES……82
B- AVEC VARIANTE 2 : RENFORCEMENT GEOCELL……83
B-2 - 2eme cas……...85
III-CONCLUSION GENERALE……..87
Références bibliographiques……88

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I-1 : fissures au niveau d'une structure de génie civil.
Figure I-2 : Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche)
Figure I-3 : Chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (Fin de saison des pluies
Figure I-6 : pré chargement en terre (avec réseau de drains verticaux)
Figure I-7 : Schéma de consolidation atmosphérique
Figure I-8 *:* Schéma de consolidation par inondation
Figure I-9 : Schéma de principe pour la réalisation des drains verticaux
Figure I-10 : Domaine D'application des colonnes
Figure I-11 : Schéma de principe pour la réalisation d'un plot ballasté pilonné
Figure I-12 : Schéma de principe pour la réalisation d'une colonne ballastée vibrée.
Figure I-13 : Réalisation des colonnes ballastées en voie humide sur la plateforme d'assise du futur remblai (SNTF - Liaison ferroviaire Oran / Hassi bounif /Tronçon Sebkha)
Figure I-14 : L'atelier de colonnes ballastées voie sèche (Construction d'une Fromagerie BEL à Kolea)
Figure I-15 : Schéma de principe pour la réalisation d'une colonne pilonnés
Figure I-16 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusion rigides verticale.
Figure I-17 : Chantier de compactage intensif.
Figure I-18 : Vibrocompactage.
Figure I-19 : Principe du compactage statique en profondeur
Figure I-20 : la congélation du sol
Figure I-21 : Schématisation de l'action de chaux à court terme, [Cabane, 2004]
Figure I-22 : Représentation schématique du limon traité au-delà 90 jours de cure, [Cabane, 2004]
Figure I-23 : Hydratation du ciment dans l'argile humide, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]
Figure I-24 : Renforcement des talus par le clouage en surface de rupture
Figure I-25 : la terre armée
Figure I-26 : le sable
Figure I-27 : Renforcement par ancrages
Figure I-28 : Bande en polymère
Figure I-29 : Un mur poids.
Figure I-30 : Ferraillage d'un mur de soutènement.
Figure I-31: Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique De.
Figure I-32 : Gabions
Figure I-37 : à gauche la forme du géotuyaux, à droite la mise en oeuvre de géotuyaux
Figure I-38 : à gauche la structure de géogrille, à droite la mise en place du géogrille
Figure I-39 : à gauche un modèle de géofilet, à droite un géofilet dans un merlon
Figure I-40 : la structure d'un géocomposite
Figure I-41 : Géosynthétique bentonitique
Figure I-42 : à gauche la forme d'un géosynthétique alvéolaire, à droite placement d'une

Figure I-43 : Géomembrane à gauche leur forme, et à droite leur mise en place
Figure I-44 : Un géosynthétique dans une construction routière
Figure I-45 : un renforcement d'une pente par un géosynthétique
Figure I-46 : un géosynthétique sous-sol compressible
Figure I-47 : une nappe géosynthétique pour une construction d'un remblai
Figure I-48 : une nappe géosynthétique dans une construction une pente
Figure I-49 : un mur de soutènement renforcé par géosynthétique
Figure I-50 : à gauche contrôle d'érosion sur pente, à droite travaux achevés
Figure I-51 : à gauche végétation à l'aide de géogrille, à droite un bassin couvé par géomembrane
Figure I-52 : les géosynthétiques dans les bassins de traitement
Figure I-52 : Différentes couches de chaussée
Figure I-53 : Différentes couches de chaussée
Figure I-54: Les catégories de chaussée
Figure I-55: Schéma de la démarche de catalogue

Chapitre II :

Figure II-1 : VARIANTE 1 : UTILISATION DE GEOTEXTILES
Figure II-2 : VARIANTE II : UTILISATION DE GEOGRILLES
Figure II-3 : Démarche de calcul du dimensionnement des structures de chaussée Algériennes selon le catalogue de (2001)
Figure II-4 : schéma de type de chaussée
Figure II-5 : Confinement latéral
Figure II-6 : Modification surface de rupture augmentation de la capacité portante
Figure II-7 : Membrane tendue
Figure II-8 : structure de géotextile
Figure II-9 : Non tissé aiguilleté
Figure II-10 : GEOGRILLES
Figure III-1 : Fenêtre de réglages généraux (onglet *Project*)
Figure III-2 : Position des noeuds et des points de contrainte dans les éléments de sol (a) élément à 15 noeuds; (b) éléments à 6 noeuds,
Figure III-3 : Fenêtre de réglages généraux (onglet *Dimensions)*
Figure III :4 Position des noeuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 noeuds et à 5 noeuds.
Figure III-5 : Fenêtre des propriétés des sols et les interfaces (onglet *Interfaces***)**
Figure I-53 : Différentes couches de chaussée
Figure I-54: Les catégories de chaussée
Figure I-55: Schéma de la démarche de catalogue
Figure II-1 : VARIANTE 1 : UTILISATION DE GEOTEXTILES
Figure II-2 : VARIANTE II : UTILISATION DE GEOGRILLES
Figure II-3 : Démarche de calcul du dimensionnement des structures de chaussée Algériennes selon le catalogue de (2001)
Figure II-4 : schéma de type de chaussée
Figure II-5 : Confinement latéral
Figure II-6 : Modification surface de rupture augmentation de la capacité portante
Figure II-7 : Membrane tendue
Figure II-8 : structure de géotextile

Figure II-9 : Non tissé aiguilleté
Figure II-10 : GEOGRILLES

Chapitre III

Figure III-1 : Fenêtre de réglages généraux (onglet *Project*)
Figure III-2 : Position des noeuds et des points de contrainte dans les éléments de sol (a) élément à 15 noeuds; (b) éléments à 6 noeuds,
Figure III-3 : Fenêtre de réglages généraux (onglet *Dimensions)*
Figure III :4 Position des noeuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 noeuds et à 5 noeuds.
Figure III-5 : Fenêtre des propriétés des sols et les interfaces (onglet *Interfaces***)**
Figure III-6 : Cas d'étude avec géotextile
Figure III-7 : Cas d'étude avec géotextile
Figure III-8 : DEFORMATION SANS RENFORCEMENT
Figure III-9 : TASSEMENT MAX SANS RENFORCEMENT 6.06 mm
Figure III-10: TASSEMENT SOUS COUCHE BASE
Figure III-11 : TASSEMENT SOUS COUCHE FONDATION
Figure III-12: CONTRAINTES EFFECTIVES MOYENNE 160 KN/m2 sous les charges
Figure III-13 : DEFORMATION AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE BASE
Figure III-14 : TASSEMENT MAX AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE BASE : 6.05mm
Figure III-15 : EFFORT AXIAL DANS GEOTEXTILE 12.29 KN/ml
Figure III-16 : CONTRAINTES EFFECTIVE SOUS CHARGES 177 KN/m2
Figure III-17 : DEFORMATION AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE FONDATION
Figure III-18 : TASSEMENT MAX AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE FONDATION: 5.58 mm
Figure III-19 : CONTRAINTE EFFECTIVE SOUS LES CHARGES : 120 N/m2
Figure III-20: TASSEMENT AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE FONDATION : 5.58 mm
Figure III-21 : EFFORT AXIAL MAX DANS LE GEOTEXTILE 27.83 KN/ml
Figure III-22 : DEFORMATION AVEC 2 NAPPES DANS SOL SUPPORT
Figure III-23 : TASSEMENT SOL A LA SURFACE 6.05 mm
Figure III-24 : CONTRAINTE EFFECTIVE SOUS CHARGES 120KN/m2
Figure III-25 : EFFORT DE TRACTION DANS 1ere nappe GEOTEXTILE 5.91 KN/ml
Figure III-26 : EFFORT DE TRACTION DANS 2eme nappe GEOTEXTILE 3.39 KN/ml
Figure III-27 : DEFORMATION 6.35 mm
Figure III-28 : TASSEMENT 6.35 mm
Figure III-29 : CONTRAINTES EFFECTIVE
Figure III-30 : CONTRAINTES EFFECTIVE DANS LA COUCHE DE BASE COUPE
Figure III-31 : DEFORMATION 5.13 mm
Figure III-32 : TASSEMENT 5.13 mm
Figure III-33 : CONTRAINTES EFFECTIVES MAX
Figure III-34 : CONTAINTES EFFECTIVES DANS COUCHE DE BASE 18.21 KN/ml (COUPE HORIZONTALE)

Introduction générale

Les chaussées routières, construites sur les sols faibles, doivent répondre aux conditions de viabilité à long terme face à la circulation relativement continue des véhicules. Sinon, des ornières s'apparaissent et se développent sur la surface en fonction du trafic jusqu'elles rendent la chaussée impossible à circuler.[1]

Dans certains cas, l'utilisation de techniques et de matériaux traditionnelles ne repond pas aux éxigences pratiques et économiques. Alors la recherche dans les nouvelles sources des matériaux, comme le pétrol, peut remplir cette insuffisance. Dans ce sens, les géotextiles et les geomembranes qui sont généralement des fibres synthétiques utilisés pour stabiliser les structures construites sur le sol. Plus tard, des autres types des mêmes composants comme lagéogrille sont fabriqués et le terme générique pour ces matériaux non-naturels devient « géosynthetiques ».[1]

Il est clair que les géosynthétiques ont révolutionné beaucoup d'aspects de notre pratique et dans quelques applications ils ont entièrement remplacé le matériau de construction traditionnel. Dans beaucoup de cas l'utilisation d'un géosynthétique permet l'augmentation de manière significative du facteur de sécurité, l'amélioration de la performance, et la réduction des coûts en comparaison avec une conception conventionnelle et une construction alternative.

Ce mémoire de recherche, intéresse une application particulière des géogrilles qui est le renforcement de plateforme routière pour améliorer la performance des chaussées non revêtues reposant sur un sol support de faible portance. L'étude vise aussi aux déformations et contraintes dans la chaussée ainsi qu'à la force de tension dans la géotextile.

De ce fait notre travail se divise en trois parties, qui sont les suivantes :

La première partie est consacrée à l'étude bibliographique, qui est une étude théorique, Sur les matériaux géosynthétiques parmi lesquels les matériaux géotixtile; leurs fonctions et propriétés.Ainsi des interprétations sur les chaussées routières renforcées par les matériaux géosynthétiques les mécanismes de renforcement, qui expliquent le rôle de renforcement joué par le géosynthétique et des notions sur le corps de chaussée.

Le deuxième chapitre décrit les principales méthodes de dimensionnement et les études antérieures expérimentales en laboratoire et grandeur nature, et les études de modélisation utilisant les éléments finis; la méthodologie de conception des chaussées avec ou sans renforcement.

Chapitre I :

synthese bibliographie

I-Introduction :

Tout le monde est conscient de l'importance majeure d'avoir une bonne connaissance des sols dont l'exploitation est essentielle à l'existence même des communautés humaines. Les problèmes pédologiques sont particulièrement cruciaux régions tropicales avec de nombreux sols vulnérables. Notre planète subit des changements climatiques drastiques qui impliquent des phénomènes tels qu'une augmentation de la température, une fonte des glaces et une désertification de vastes zones, situées principalement dans les pays tropicaux. [2]

Les facteurs humains ont également un impact négatif sur la qualité des sols:

La démographie en pleine expansion, l'agriculture intensive, l'utilisation de systèmes agricoles inadaptés, l'extension des villes et des infrastructures qui peuvent se développer sur des sols agricoles riches, ainsi que la pollution causée par l'industrie, activités minières et domestiques.

Il est donc essentiel d'acquérir une connaissance fiable des sols, de développer un système de classification logique et de suivre systématiquement leur évolution sous différents types de gestion, afin de garantir une utilisation durable des sols disponibles et une conservation des en danger des sites.

Tel est l'objectif principal de notre session.

Les phénomènes d'évolution des caractéristiques géotechniques des sols argileux et marneux provoquent des tassements différentiels et des glissements qui se manifestent par des désordres affectant principalement les constructions de génie civil. Selon des critères mécaniques, les variations de volume du sol ou des formations lithologiques affleurantes à sub-affleurantes sont dues, d'une part, à l'interaction eau/solide, aux échelles microscopiques et macroscopiques, et, d'autre part, à la modification de l'état de contrainte en présence d'eau. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume). Elles sont spécifiques à certains matériaux argileux, en particulier ceux appartenant au groupe des smectites (dont fait partie la montmorillonite). Ce chapitre sera consacré à la définition des sols évolutifs ainsi qu'à la présentation des désordres dus à leur utilisation dans les constructions de génie civil.[3]

II-Les sols évolutifs :

1- Définition des sols évolutifs :

On peut définir un matériau évolutif comme un matériau dont les propriétés physiques et mécaniques évoluent dans le temps. Les sols qui ont un caractère évolutif sont les sols fins (limons, argiles, marne) qui peuvent créer dans les ouvrages, des tassements, gonflements et glissements pendant leur durée de vie (Zoubir, 2009). [4]

2- Type des sols évolutifs :

2-1 Les argiles :

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à 0,005mm, contenant au moins 50% de silicate d'alumine. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à 0,2mm/h), appelée couramment terre glaise, coloriée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert.

Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à craqueler en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol. Les argiles représentent en général une assise acceptable à médiocre lorsqu'elles sont recouvertes par d'autres couches de terrain. En revanche, elles sont dangereuses lorsqu'elles affleurent au niveau du sol, du fait de leur instabilité, se traduisant par des variations de volume et un fluage dans les terrains en pente.

2-2 Les limons :

Les limons, constitués de silt, de lœss et de, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations.

2-3 Les marnes :

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires. On considère, selon leur composition, trois grandes catégories :

- Les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35% de carbonate de calcium ;

- Les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65% et 65 à 95%. Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse.

Les marnes ont souvent fait l'objet d'exploitation en carrières à ciel ouvert ou en souterrain pour donner respectivement :

De la chaux avec les marnes argileuses ;

De la chaux hydraulique avec les marnes proprement dites ;

Et du ciment avec les marnes calcaires ou calcaires marneux.

Elles ont également été utilisées pour amender les terres des exploitations agricoles. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse.

En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis.

Les marnes sont des roches relativement tendres, elles subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des hommes.

Une combinaison de facteurs naturels et anthropiques a provoqué une érosion hydrique intense qui s'est manifestée par une dégradation des sols et une diminution importante de leur productivité [3].

On peut conclure que l'évolution des sols fins est dus à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles, etc., qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques) [4].

III- Désordres occasionnés par l'utilisation des sols évolutifs dans les constructions de génie civil :

1- Introduction :

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des

sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement. [2]

2- Phénomène de gonflement :

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres nontronites) ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau) ; la variation devolume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs). [2]

3- Tassements :

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation **[2]**

4- Glissements :

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.[2]

5- Conséquences enregistrées :

Les désordres provoques par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.[2]

5-1 Cas des bâtiments :

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants : ¬ Fissuration des structures ;

¬ Distorsion des ouvertures ;

¬ Rupture des canalisations ;

¬ Décollement des bâtiments.

La photo suivante représente des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil.

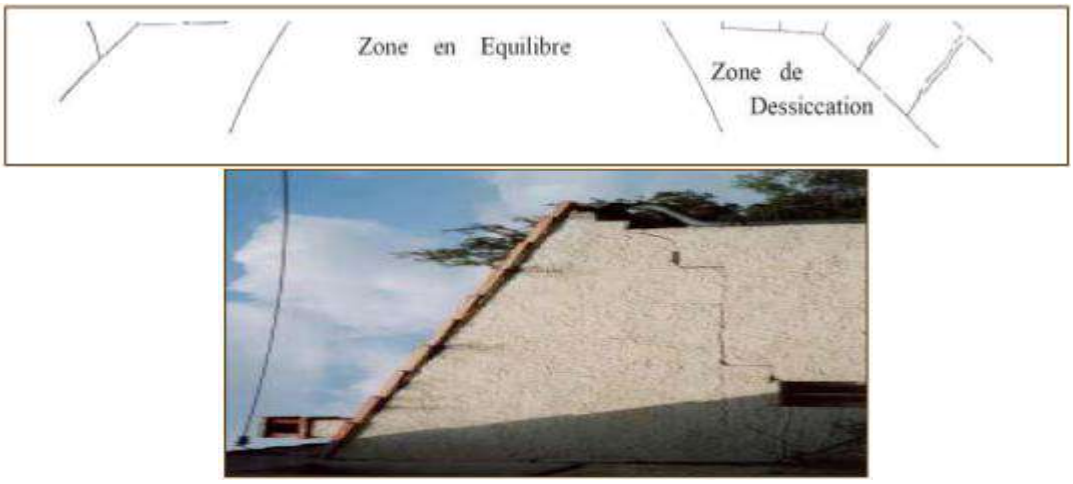


Figure I-1 : fissures au niveau d'une structure de génie civil.

5-2 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Les désordres subis par la chaussée se résument généralement à les fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur les accotements de la chaussée, en saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée (Fig. 1.2 et Fig. 1.3)

Puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords, ces phénomènes sont accélères par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Fig. 1.4).

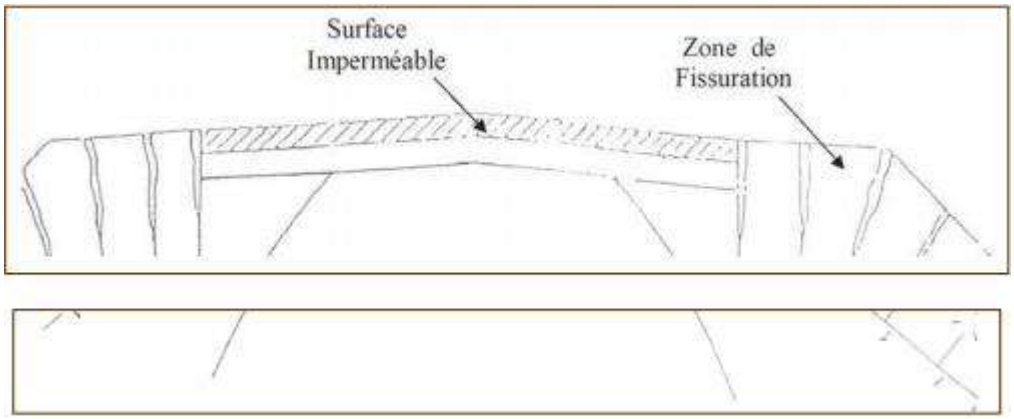


Figure I-2 : Apparition des premières fissures sur les accotements (fin de saison sèche)

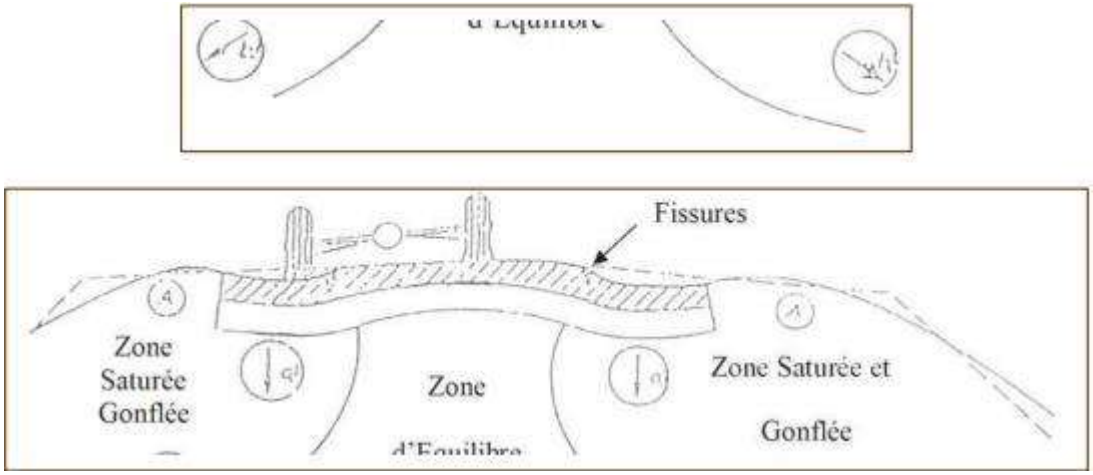


Figure I-3 : Chute de portance des zones saturées apparition des fissures longitudinales (Fin de saison des pluies)

L'expérience du remblai de la JORLE [6], en dehors de tout contexte de pathologie, est riche d'enseignements. En premier lieu, la construction d'un grand remblai routier avec des matériaux marneux évolutifs a été possible sans qu'il y ait de désordres gênants pour l'exploitation de la voie. Toutefois, il faut souligner que des fissures sont apparues à l'intérieur dans des zones de moindre hauteur du remblai. Ces désordres dans la partie basse confirment donc que la hauteur du remblai n'est pas un facteur essentiel ; alors que les circulations d'eau superficielles correspondent à un des facteurs principaux de désordre. Les mesures de déformations verticales et horizontales montrent que les talus d'un remblai sont soumis à des cycles de gonflement et retrait, étroitement liés aux conditions hydriques, réversibles pour la composante verticale mais pratiquement irréversibles horizontalement. [7]

Ce mouvement correspond au phénomène de reptation des pentes. A proximité de la plate-forme, le phénomène se traduit par une inflexion de l'accotement et ‹‹un élargissement›› entre les certes du remblai ; ce mécanisme conduit à la formation de fissures longitudinales, accentuées par les différences de rigidité entre le corps du remblai et la structure de chaussée.

La partie altérée soumise à ces cycles voit ses caractéristiques mécaniques diminuer dans des proportions importantes et de façon quasiment irréversible ; cette évolution peut évidemment conduire à des glissements localisés dans le talus ; aggravés par la présence de fissures ouvertes qui facilitent la pénétration de l'eau.[7]

6- Conclusion :

Les désordres dans les ouvrages de génie civil tels les remblais routiers et les chaussées, les fondations et les structures, les canaux et les conduites se rencontrent ainsi couramment dans les terrains gonflants, les dégâts produits chaque année à travers le monde ont été évalués en cent mille millions de dollars. Ces dégâts surpassent ceux produits par l'effet combiné des tremblements de terre, ouragans et glissements de terre. Pour éviter le problème des sols gonflants, on dispose de différentes solutions parmi lesquelles on peut relever : ─ Le changement de site ;

─ Le remplacement des sols gonflants par un matériau non gonflant ;

─ La protection du sol gonflant vis à vis des accès d'eau ;

─ La prévention du gonflement par un chargement approprié, et ainsi le calcul des structures de manière à ce qu'elles puissent supporter les pressions de gonflement susceptibles de se développer ;

─ La possibilité de variation de volume sous des conditions de chargement déterminé, les structures étant conçues alors, pour suivre les déplacements sans dommages ; ─ La mise en place de fondations profondes, développant leur capacité portante au-delà de la zone active ; ─ Et enfin la stabilisation du sol gonflant par un traitement approprié. Cette dernière solution est étudiée par un grand nombre de chercheurs. Elle est présentée en détails dans le chapitre suivant, en mentionnant les résultats recherches dans le domaine.[9]

III- Méthode d'améliorations des sols :

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'une des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Des nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces.

Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Il existe une très grande variété d'éléments de renforcement utilisés dans la pratique et que l'on classe généralement suivant leur forme géométrique ; unidimensionnelle (linéaire), bidimensionnelle ou tridimensionnelle. En outre, un grand nombre de matériaux constitutifs sont possibles : acier, fibres de verre, géotextiles et produits apparentés (matières plastiques), etc. Il est à noter que les renforcements bidimensionnels et tridimensionnels, du fait de leur géométrie, ne peuvent être utilisés qu'avec des sols rapportés.[9]

1- Procédés Physiques

A- Préchargement

La pré-compression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement. Le pré chargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux. (Figure I.3). Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.[10]

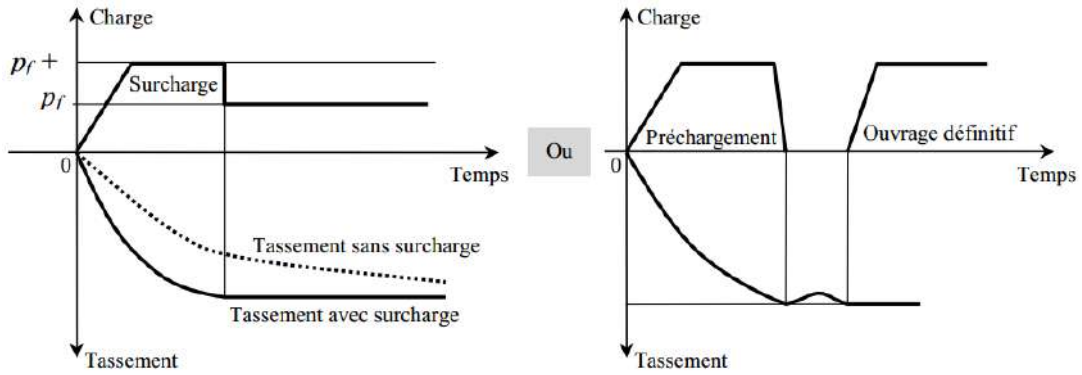


Figure I-4 : Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements [Bell, 1993][1]

i. Surcharge En Terre :

Lorsqu'un projet est déterminé, on met en place sur le terrain un volume de remblai correspondant à la future charge de l'ouvrage. Sur des sols saturés à très faible perméabilité, ce procédé va permettre l'évacuation de l'eau interstitielle du terrain. La qualité du tassement est directement proportionnelle à la durée du préchargement. De plus, la lenteur des phénomènes permet le déchargement du terrain pendant la construction sans risque de gonflement et de retour à l'état initial du terrain (phénomènes élastiques).

Lors de la mise en place de ce procédé, une couche de sable est préalablement installée pour épouser les déformations du sol sous-jacent et contribue à l'évacuation de l'eau qui peut arriver à la surface. Sur des sols très peu perméables, on peut associer le préchargement à un réseau de drains verticaux afin de faciliter l'évacuation de l'eau. Avec un repère préalablement fixé, on mesure régulièrement le tassement du sol et, lorsqu'il a atteint une valeur considérée acceptable, on peut décharger et exécuter la construction des fondations superficielles. En général, si la hauteur du mauvais terrain dépasse 5 mètres, on prévoit après le chargement un système de fondation en radier car il reste des risques de tassement différentiels.

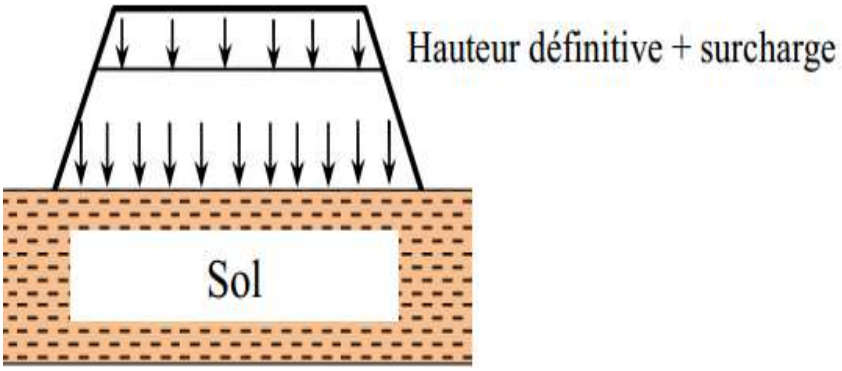


Figure I-5 : Préchargement en terre (simple)

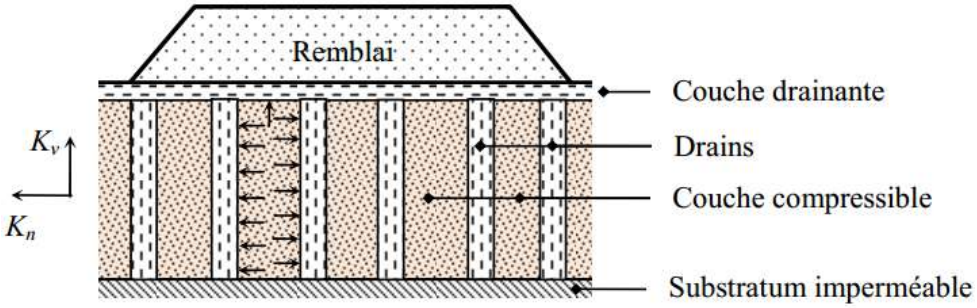


Figure I-6 : pré chargement en terre (avec réseau de drains verticaux)

ii. Consolidation Atmosphérique

C'est une variante du pré chargement par du remblai. Cette méthode est de type isotrope. Elle permet une amélioration des caractéristiques du sol et la rupture et le fluage latéral sont impossibles. Le terrain est recouvert par une membrane étanche sous laquelle on fait le vide : le sol est ainsi chargé par la pression atmosphérique. Ce système est toujours couplé à un réseau de drainage vertical et parfois horizontal.

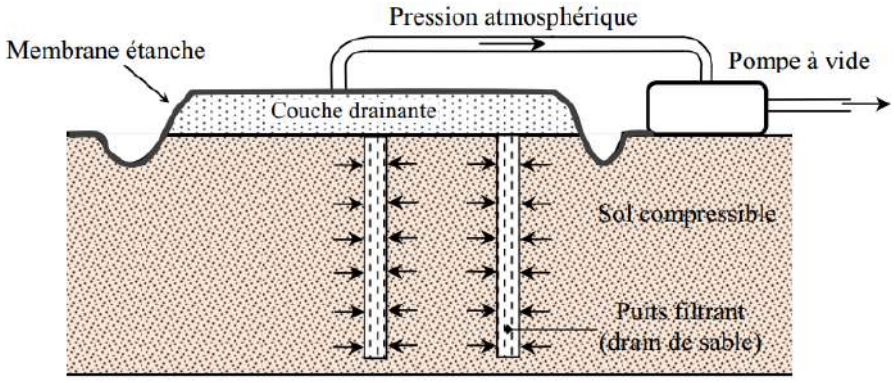


Figure I-7 : Schéma de consolidation atmosphérique

iii. Consolidation Par L'inondation

Une digue en terre est édifié autour de la zone à surcharger et le bassin ainsi créé est étanché par une membrane souple (élastomère ou plastique armé) puis rempli d'eau. Ce système nécessite une hauteur d'eau deux fois supérieure à la hauteur du remblai qui aurait été nécessaire, c'est pourquoi cette méthode est intéressante seulement si l'eau est gratuite et à faible distance (eau de mer par exemple).

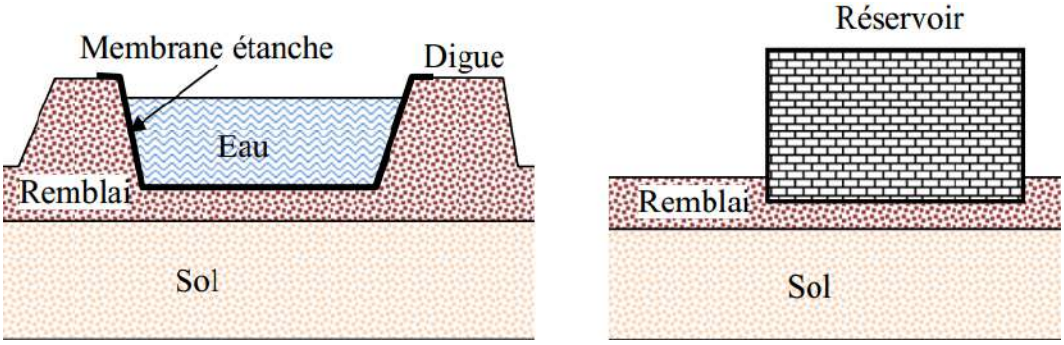


Figure I-8 *:* Schéma de consolidation par inondation

Lors de l'exécution du projet après un pré chargement, il faut tenir compte de la décompression des terrains entre les points d'appuis de l'édifice en intégrant, par exemple, des petits vides sanitaires (hauteur décimétrique). Pour tous les travaux de chargement dont la durée est mensuelle, il faut prendre des précautions avec le mouvement annuel des nappes. La qualité du tassement sera différente en fonction de la hauteur du niveau piézométrique. Le contrôle de

l'amélioration du sol est réalisé en général au moyen d'essais au pénétromètre ou au pressiomètre régulièrement répartis sur le site, et comparés à des essais réalisés avant traitement dans les mêmes zones. On peut aussi contrôler l'augmentation de la densité du sol en réalisant des diagraphies.

B. Drainage

Les drains verticaux préfabriqués sont en plastique (ronds ou plats) enveloppées dans un géotextile filtrant. Les drains favorisent l'évacuation des surpressions interstitielles des sols meubles et compressibles afin de réduire les temps de consolidations de plusieurs décennies à quelques mois.

- **Utilisations :**

Généralement utilisé dans les sols meubles et saturés à grains fins, comme les limons, les argiles, la tourbe, les boues, les résidus miniers et les remblais de dragage, souvent foisonnés et saturés d'eau pour Accélérer le drainage et Consolider les bassins de résidus et les plates-formes de lixiviation.

- **Principe de réalisation**

Les drains plats qui sont les plus utilisés sont constitués d'une bande préfabriquée idéale pour l'écoulement de l'eau. Le noyau flexible est généralement fabriqué en polypropylène et les deux côtés ont des rainures permettant à l'eau de s'écouler sans entrave. Le noyau est enveloppé dans un tissu filtrant géotextile solide et durable avec d'excellentes propriétés de transitivité, permettant un accès libre de l'eau interstitielle dans le drain. Cela empêche également de pomper des fines particules provenant des sols adjacents sans colmatage.

Le drain est amené à travers un mandrin creux monté sur une pelle ou un mât de grue, relié au fond à une plaque perdue. Un vibro-fonceur ou une méthode statique est utilisé pour insérer le mandrin à la profondeur requise. Il est ensuite retiré, laissant le drain plat en place. Le drain est ensuite découpé à la surface du sol, une nouvelle plaque perdue y est fixée et le mandrin est déplacé vers le point suivant. Le maillage de drains verticaux réalisé permet de drainer les eaux interstitielles, ce qui accélère le processus de consolidation et les délais de construction.[10]

- **Avantages**
  - Installation très rapide
  - Accélère le drainage,
  - Réduit les étapes de remblaiement et de fait les délais de construction

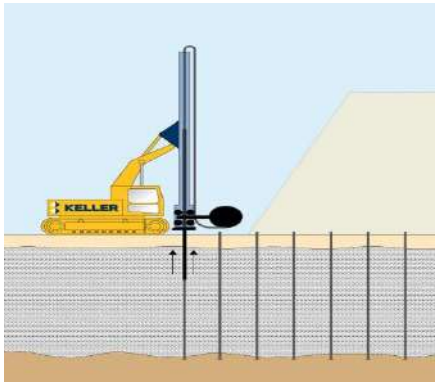


Figure I-9 : Schéma de principe pour la réalisation des drains verticaux

C. Renforcement Par Inclusions :

i. Inclusions souples

Il existe plusieurs techniques pour la réalisation d'inclusions souples (Dhouib et Blondeau 2003) ; que ce soit par la chute libre d'énormes masses (plots ballastés pilonnés), par fonçage ou battage d'un tube obturé provisoirement ou ouvert à sa base (colonnes pilonnées), ou par la descente d'un vibreur en utilisant un fluide (air ou eau) de lançage (colonnes vibrées). Ces techniques permettent, soit d'excaver une partie du sol en place, soit de le refouler latéralement afin d'améliorer globalement ou ponctuellement ses caractéristiques géotechniques. Ces principales techniques de mise en œuvre, classées dans les catégories ci-après, sont fonction des conditions géotechniques autorisant leur utilisation ainsi que des améliorations souhaitées. Parmi ces inclusions on a :

- Plot ballasté pilonné ;
- Colonne vibrée ;
- Colonne pilonnée.

Les techniques des plots ballastés pilonnés ainsi que de la vibroflottation sont évoquées dans ce paragraphe bien que le terme de colonne ballastée au sens strict soit lié aux deux autres techniques (colonnes pilonnées ou vibrées).[10]

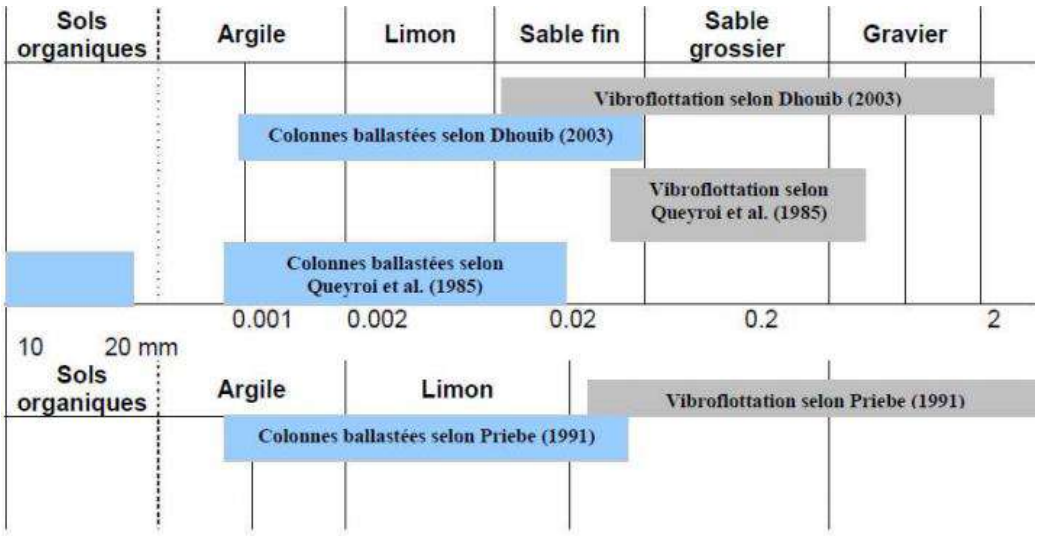


Figure I-10 : Domaine D'application des colonnes

- **Plot ballasté pilonné**

Le principe de cette technique (figure I-10) est le renforcement du sol cohérent compressible par la création des colonnes, jusqu'à environ 8 m de profondeur, de 2 à 3 mètres de diamètre, par matériaux frottant très compactés. Les colonnes ainsi formées sont appelées plots ballastés pilonnés. La mise en œuvre s'effectue à l'aide de grues à chenilles, proches de celles utilisées pour le compactage dynamique réservé aux sols pulvérulents. Les plots ballastés vont pénétrer dans le sol par pilonnage, à l'aide d'une masse de 15 à 30 tonnes, en chute libre de 10 à 30 mètres. L'emplacement du plot est préparé par une préxcavation qui va être partiellement remplie d'un bouchon de matériaux que le pilonnage fera descendre à la profondeur voulue. Le plot est ensuite rechargé puis compacté par phases successives.

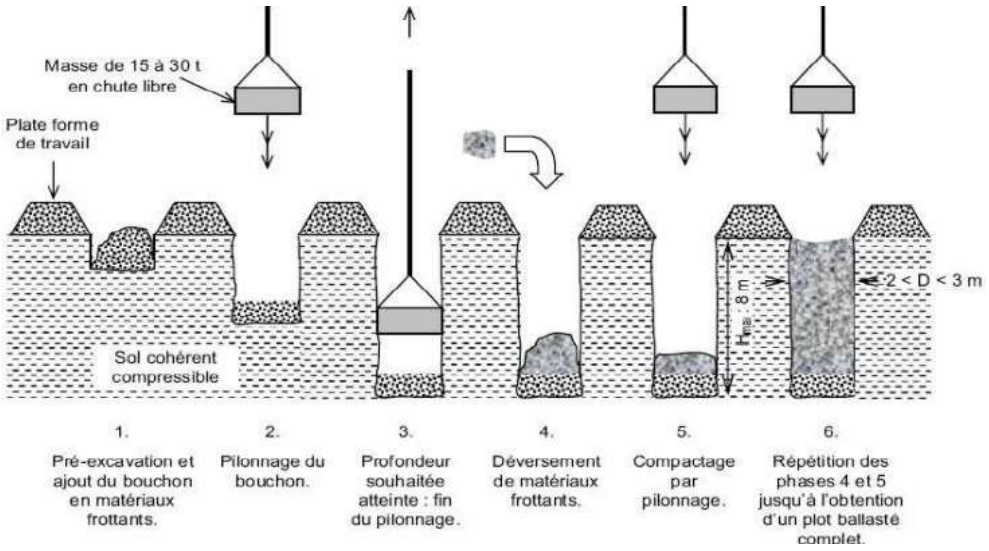


Figure I-11 : Schéma de principe pour la réalisation d'un plot ballasté pilonné

- **Colonne ballastée vibrée**

Cette technique est employée afin d'introduire un matériau granulaire (ballast) dans des sols cohérents car le ballast à de meilleures caractéristiques mécaniques que le sol. Par ailleurs, ce dernier ne peut pas être densifié sous la seule action de la vibration. Les colonnes sont constituées de matériaux granulaires, non cohérents, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives remontantes

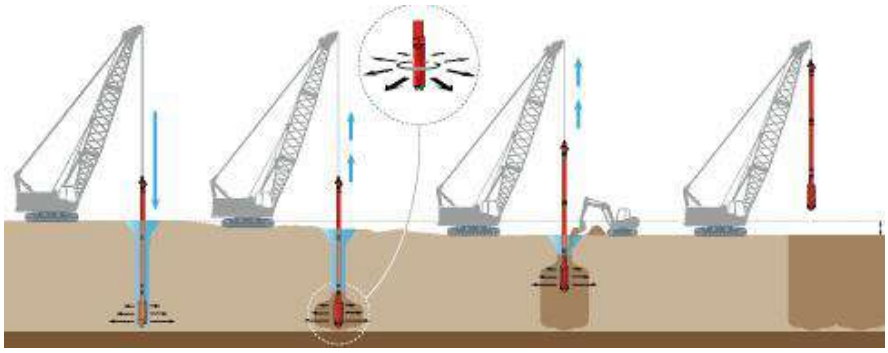


Figure I-12 : Schéma de principe pour la réalisation d'une colonne ballastée vibrée.

Il existe plusieurs modes de construction des colonnes ballastées vibrées en tenant compte du fluide de lançage, air ou eau. -colonne ballastée par voie sèche. -colonne ballastée par voie humide.

- **Colonnes ballastées exécutées par voie humide**

La mise en œuvre en colonne ballastées par voie humide, dite aussi par vibro-substitution consiste à :

- Réalise un forage par auto-fonçage et lançage à l'eau jusqu'à la profondeur désignée ;
- Remonter le vibreur, avec parfois des ramonages successifs, et laisser tomber gravitaire ment le ballast dans le forage préalable ;
- Compacter le ballast par passes successives jusqu'à la finition de la colonne.



Figure I-13 : Réalisation des colonnes ballastées en voie humide sur la plateforme d'assise du futur remblai (SNTF - Liaison ferroviaire Oran / Hassi bounif /Tronçon Sebkha)

- **Colonnes ballastées exécutées par voie sèche :**

La réalisation des colonnes ballastées par voie sèche, dite encore par vibro-refoulement consiste à :

- Auto foncer le vibreur directement dans le sol par renflement jusqu'à la profondeur désignée ;
- Remonter progressivement le vibreur tout en laissant descendre par gravité et par pression d'air, le ballast approvisionner par chargeur dans une benne coulissant le long du mât ;

- Compacter le ballast par passes successives de l'ordre de 0,5 m jusqu'à finition de la colonne.



Figure I-14 : L'atelier de colonnes ballastées voie sèche (Construction d'une Fromagerie BEL à Kolea)

➢ **Colonnes pilonnées**

Ce type de colonne fait appel à une technique utilisée pour les colonnes de sable largement employées dès leur origine au Japon (Aboshi et al 1991) ,(Barksdale et Takefumi, 1991) .

La procédure de construction (figure I.14) consiste à faire pénétrer dans le sol, par battage, fonçage ou vibrofonçage, un tube métallique, provisoirement obturé ou ouvert à sa base, puis à compacter, en utilisant un pilon, un mélange de sable et de ballast préalablement déversé dans le tube. Si le tube est fermé à sa base, le terrain est alors refoulé lors de la pénétration du tube, sinon, le terrain doit être extrait par forage avant l'introduction et le pilonnage du ballast. L'effet bénéfique de ce mode de mise en œuvre des colonnes provient du fait que le trou formé ne peut s'affaisser compte tenu de la présence permanente du tube. Cependant, les vibrations induites lors du battage ou fonçage du tube et du pilonnage du ballast ne permettent pas l'utilisation de cette méthode de construction dans des argiles sensibles.[10]

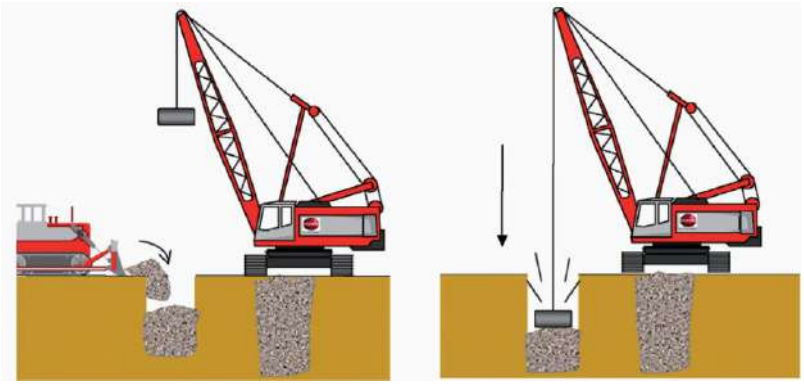


Figure I-15 : Schéma de principe pour la réalisation d'une colonne pilonnés

ii. Inclusions rigides

L'inclusion rigide est un procédé de renforcement de sol utilisant une inclusion en béton ou en mortier réalisée dans tout type de terrain, y compris dans les sols très compressibles et

organiques, pour réduire les tassements et augmenter la capacité portante. On peut citez le domaine d'application comme ce de suit :

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

Une fois la plateforme de travail réalisée, la foreuse se met en position et l'enregistrement des paramètres commence. En général, une tarière à refoulement ou un tube vibrofoncé est utilisé pour descendre jusqu'à la profondeur prévue. Le béton ou le mortier remplit l'empreinte laissé par l'outil au fur et à mesure de sa remontée. L'arase du béton est réalisée en général dans le béton frais. Une fois le béton durci, le recépage est réalisé par des moyens mécaniques (marteau piqueur à main, sciage, écarteur à béton, …).[11]

- **Avantages**
  - Permet d'envisager des fondations superficielles en présence de sols très compressibles et organiques
  - Augmente la capacité portante des sols et peut reprendre des charges élevées
  - Réduit les tassements de manière très efficace (avec un facteur de réduction de l'ordre de trois à plus de huit)
  - Peut être utilisé dans tous les secteurs de la construction et pour tous types de structures et de sols
  - Les travaux de construction peuvent, dans la plupart des cas, commencer immédiatement après l'amélioration du sol.
  - Peu de déblai.
  - L'évacuation des sols pollués peut être évitée

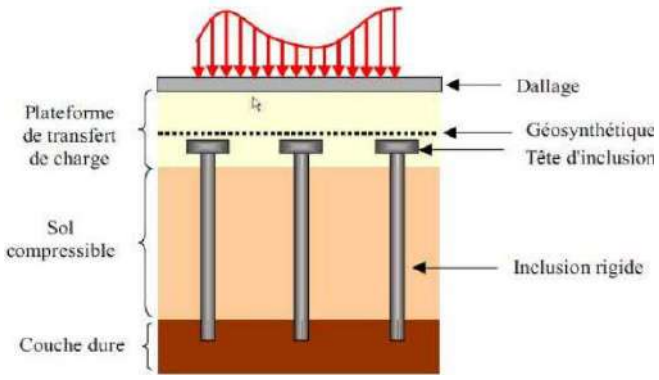


Figure I-16 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusion rigides verticale.

D- Méthodes Par Ondes De Chocs Ou Vibrations

L'utilisation d'effet d'onde de choc ou de vibrations facilite la rupture des contacts Inter granulaires, permettant ainsi, grâce à l'action de la pesanteur et / ou de surcharges, d'obtenir un meilleur enchevêtrement des grains et par conséquent une compacité supérieure.

i. ***Le Compactage Intensif*** :

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre (Figure 1-16). L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées (Fig. 1.16). Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau.[11]

ii. Vibrocompactage :

Le procédé de Vibrocompactage, développé à la fin des années trente, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximums de plus de 50 m.

C'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration. Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative.

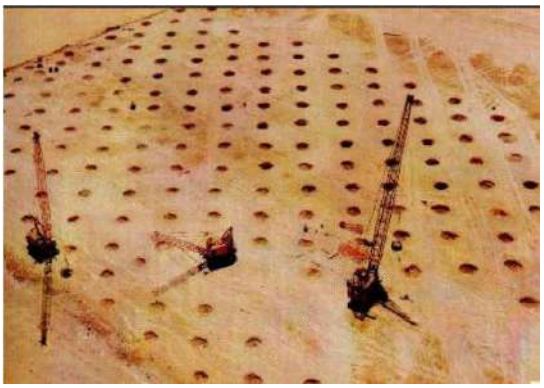


Figure I-17 : Chantier de compactage intensif.



Figure I-18 : Vibrocompactage.

Ce procédé de vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

2- Procèdes Chimiques

A- Colonnes de sol traité en place :

Dans le cas des argiles molles peu consistantes et des limons, on peut réaliser des colonnes de sol traité en place. La technique a été développée pour les argiles sensibles, avec un traitement à la chaux. Le mélange de la chaux avec le sol en place se fait au moyen d'une machine de forage équipée d'une tarière spéciale. Les colonnes produites ont un diamètre de 50cm et une longueur maximale de 15 m. Les colonnes de sol traité à la chaux sont utilisées pour :

- Renforcer les fondations argileuses supports de remblais ou de bâtiments légers.
- Conforter des glissements de versants naturels.
- Réaliser des ouvrages de soutènement.

Suivant les besoins, on peut utiliser aussi du ciment, dont la cinétique de prise est différente de celle de la chaux. Une technique semblable a été développée au Japon, où elle est utilisée principalement pour les travaux de construction portuaire. On a réalisé des colonnes atteignant 1,75 m de diamètre et 60 m de profondeur. Une variante de ces procédés, développée récemment en France, permet de réaliser des colonnes de matériau traité et compacté dotées de résistances élevées sans que l'on ait besoin de charger le massif de sol traité. Cette technique est utilisée, en particulier, pour le traitement des talus instables. [12]

B- Compactage Statique En Profondeur :

L'introduction en force de mortier ou de béton spécial (micro béton) dans un massif de sol meuble, à partir de forages, permet de provoquer la densification du sol naturel sans détruire sa structure ni l'imprégner. Outre la densification de la masse du sol entre les forages, on obtient en plus des colonnes de matériau plus résistant, qui reprennent une partie des charges appliquées au massif de sol. L'injection s'effectue à partir de forages primaires, secondaires et éventuellement tertiaires, selon un maillage adapté au problème à résoudre. Le tube d'injection est descendu dans un forage de diamètre voisin de 10 cm.[13]

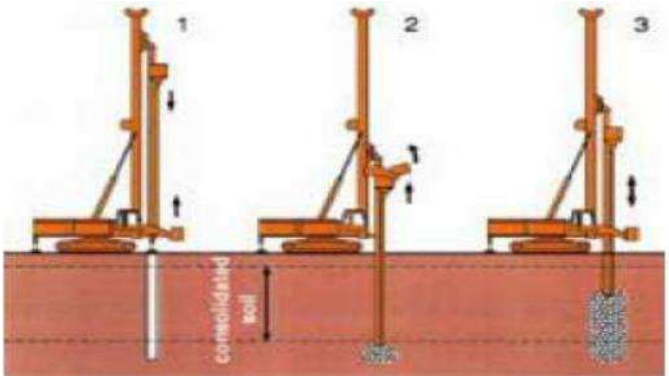


Figure I-19 : Principe du compactage statique en profondeur

C- Amélioration Temporaire Par Congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé (Figure I.20).



Figure I-20 : la congélation du sol

D-Traitement des sols à la chaux

Le traitement des sols à la chaux est un exemple typique de la méthode chimique pour améliorer des propriétés physico-mécaniques du sol. Le principe de la technique se base sur le processus physico-chimique de la réaction entre la chaux ajoutée et les minéraux argileux dans le sol traité qui conduit aux eets à court-terme (amélioration) et à long-terme (stabilisation) sur le sol. Généralement, les sols qui sont candidats pour le traitement à la chaux disposaient d'une

fraction minimale à 75µ m de 25% et leur indice de plasticité supérieure à 10 [Dallas, 2000]. Cela est en accord avec les critères de choix de la méthode du traitement.

En fait, les sols argileux et limoneux satisfont à ces deux conditions.

D-1 Amélioration à la chaux

La mise en contact entre la chaux (vive ou éteinte) et l'eau dans le sol par l'incorporation de la chaux à un sol humide provoque immédiatement une consommation d'eau et une évaporation importante à cause de la réaction exothermique suivante :

$$CaO + H2O \rightarrow Ca(OH)2 + 15.5kJ/mol \quad (2.1)$$

La chaleur de cette réaction chimique sèche le sol humide. La réaction avec de l'eau se produit même si les sols ne contiennent pas d'importantes fractions argileuses. Lorsque les particules argileuses sont présentes, la réaction chimique de la chaux avec des argiles cause un séchage plus fort. Le séchage se passe rapidement, en quelques heures, permettant de faire le compactage du sol beaucoup plus rapidement que par nécessité d'attendre pour le sol séché par évaporation naturelle.[15]

Le séchage du sol humide sur le chantier est un des plus applications les plus courantes de la chaux pour le traitement des sols. Cet avantage de la chaux peut être utilisé pour servir à un ou plusieurs des objectifs suivants : compactage à l'aide d'un séchage sur les zones humides ; de fournir une table de travail pour la construction ultérieure, et de rendre le sol réalisable pour autre stabilisation convenable (avec du ciment Portland ou de l'asphalte). En général, entre 1% et 4% de chaux est su-sant pour sécher un site humide afin de permettre les travaux de construction de s'effectuer [Association et al., 2004].

L'incorporation de la chaux à un sol argileux ou limoneux non seulement provoque le séchage plus rapide, mais aussi modie la structure du sol à court-terme par l'agglomération des particules nes en grumeaux stables (grossières et friables) en raison de leur fraction argileuse. [14]

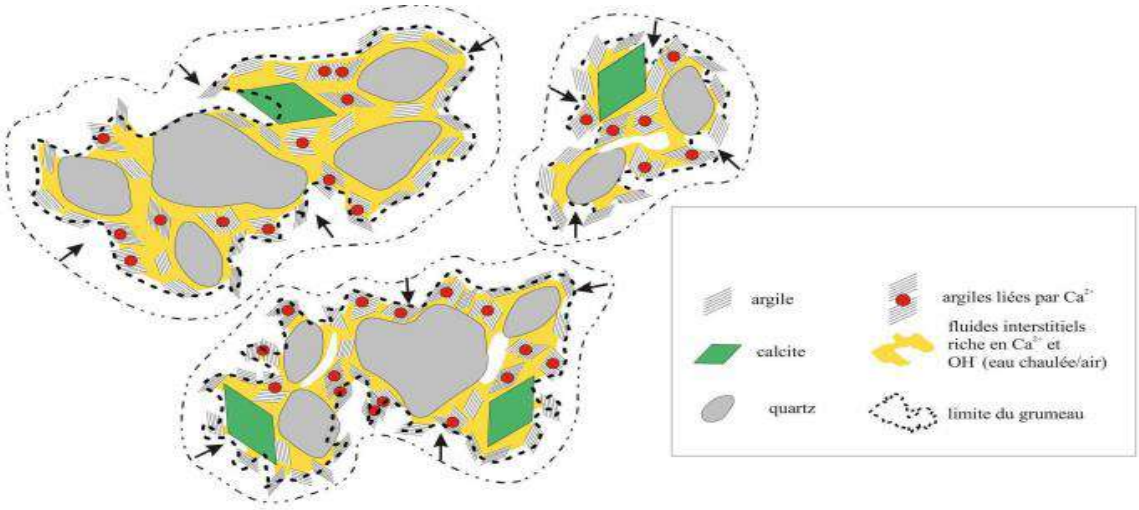


Figure I-21 : Schématisation de l'action de chaux à court terme, [Cabane, 2004]

Ce phénomène est appelé granulation ou osculation et s'explique par l'échange des cations alcalins (N a+, K+...) par des cations Ca2+ apportés par la chaux ; ceci développe des forces électriques conduisant à la formation des ponts Ca(OH) 2 ou CaOH+ entre les feuillets d'argile (figure 2.3).[17]

En raison de changements de texture causés par ces réactions dans le sol, la résistance et l'humidité de ces sols sont améliorées. Ces améliorations se traduisent par une meilleure maniabilité, par l'amélioration de la résistance immédiate et par la réduction du potentiel de gonflement. En pratique, on observe normalement que, les limites de liquidité, la densité sèche, le potentiel de gonflement diminuent, tandis que les limite de plasticité, la teneur en eau optimale Proctor et les valeurs CBR augmentent à court-terme [Eades and Grim, 1960; Bell, 1989; Locat et al., 1990; Bell, 1996].

De plus, la courbe Proctor devient plus plate que celle du sol non-traité. Ces résultats obtenus dans le laboratoire explique, en réalité, qu'un sol n et humide traité à la chaux passe d'un état plastique à un état solide, friable, facilement travaillable et perd une partie de sa sensibilité à l'eau.[16]

D-2 Traitement des sols au ciment Portland

Le ciment Portland est un matériau finement divisé, qui résulte de l'inter-broyage du clinker et du gypse. Le clinker est un produit hydraulique composant de quatre phases principales de l'oxyde : silicate tricalcique (C3S), silicate di calcique (C2S), aluminate tricalcique (C3A) et

aluminoferrite tétra calcique (C4AF). Les deux phases de silicate de calcium sont les plus importantes en ce qui concerne la stabilisation des sols.

$$2C3S + 6H \longrightarrow CSH + 3Ca(OH)\ 2 \quad (2.2)$$

$$2C2S + 4H \longrightarrow CSH + Ca(OH)\ 2 \quad (2.3)$$

Où H = H2O ; CSH = C3S2H3

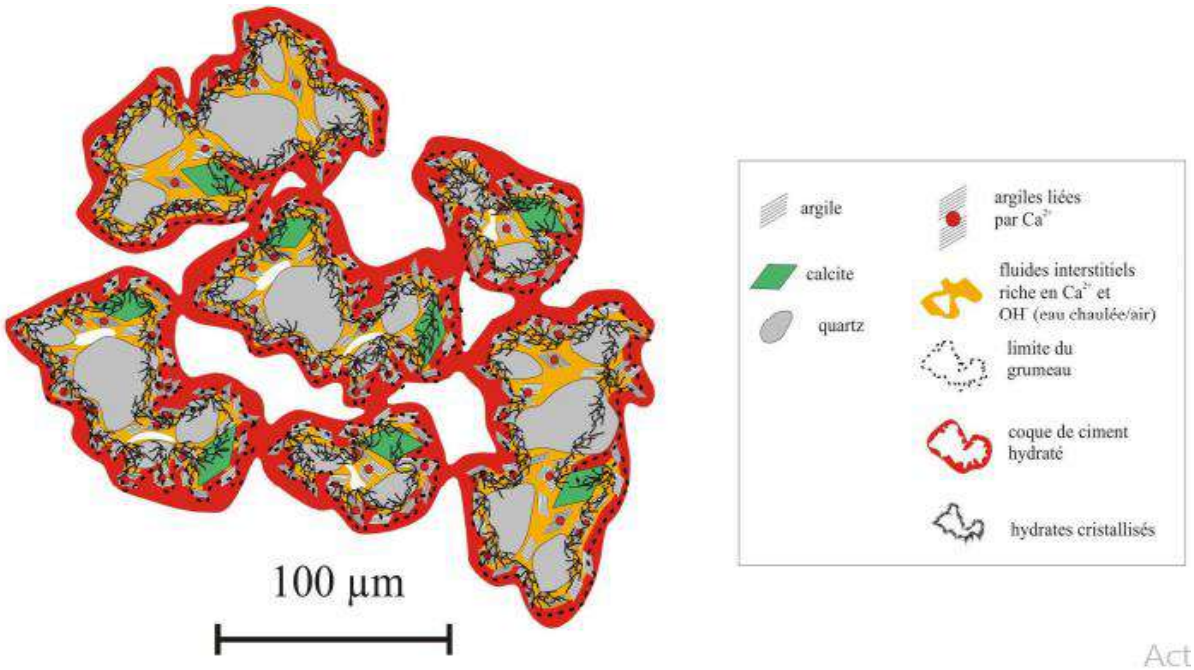


Figure I-22 : Représentation schématique du limon traité au-delà 90 jours de cure, [Cabane, 2004]

Le mélange du ciment dans le sol argileux humide produit donc des matériaux cimentaires primaires et secondaires dans la matrice de sol-ciment [Chew et al. 2004]. Les matériaux primaires à base de ciment sont formés par la réaction d'hydratation, et sont constitués de silicates de calcium hydratés (C2SHx, C3S2Hx), d'aluminates de calcium (C3AHx, C4AHx) qui fournissent la résistance et la structure de la matrice du sol, et la chaux hydratée Ca(OH) 2, ce qui fournit du calcium disponible pour l'échange cationique résultant la osculation et l'agglomération. C'est donc la déférence particulière en termes de mécanisme par rapport au traitement des sols à la chaux. Une réaction pouzzolanique secondaire entre la chaux hydratée et la silice et l'alumine constituée dans les minéraux argileux conduit à la formation d'autres silicates de calcium hydratés et aluminates de calcium hydratés comme dans le cas de la chaux.

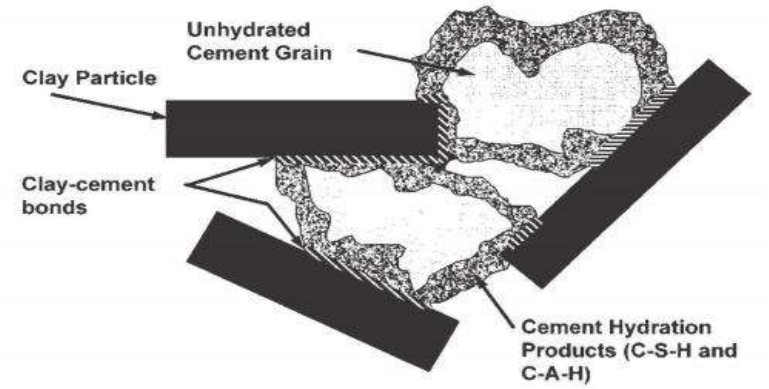


Figure I-23 : Hydratation du ciment dans l'argile humide, [Prusinski and Bhattacharja, 1999]

En pratique, avec la chaux, le ciment est l'un des deux agents de stabilisation le plus largement utilisé dans le domaine de traitement des sols par la méthode chimique. Comme la chaux, le ciment, après avoir mélangé avec le sol, réduit le gonflement/retrait à l'origine de réduction de la plasticité du sol gonflant, améliore l'ouvrabilité, augmente la résistance.[18]

3- Quelques Méthodes De Renforcement Des Pentes

A. Le renforcement des talus par le clouage

Le clouage est une technique de renforcement des sols en place, destinée à améliorer la stabilité de pentes naturelles ou artificielles, et consistant à introduire dans le terrain des inclusions (appelées aussi clous ou armatures), rigides et passives, qui ont pour effet de limiter les déformations du sol. Dans un massif renforcé, on qualifie d'activer la zone qui se déforme et de résistante, la partie rigide. Les mouvements du sol peuvent être très faibles ou plus étendus, la zone active peut rester stable ou, au contraire, s'effondrer suivant la nature et la qualité du renforcement. [19]

Les inclusions sont mises en place de manière à ce que leurs extrémités soient ancrées (par frottement) dans la zone résistante. Elles sont ainsi capables de reprendre les efforts moteurs dus au poids de la zone active. La surface qui sépare les deux parties est la surface de rupture potentielle (ligne en bidimensionnel). Les termes cloutage ou boutonnage sont parfois utilisés pour désigner cette technique bien que clouage soit maintenant consacré par l'usage, à juste titre d'ailleurs. Notons à ce sujet que le boulonnage désigne la technique similaire employée dans les roches et en travaux souterrains, et que clouter signifie garnir de clous, ce qui n'est pas le but de la méthode étudiée.[20]

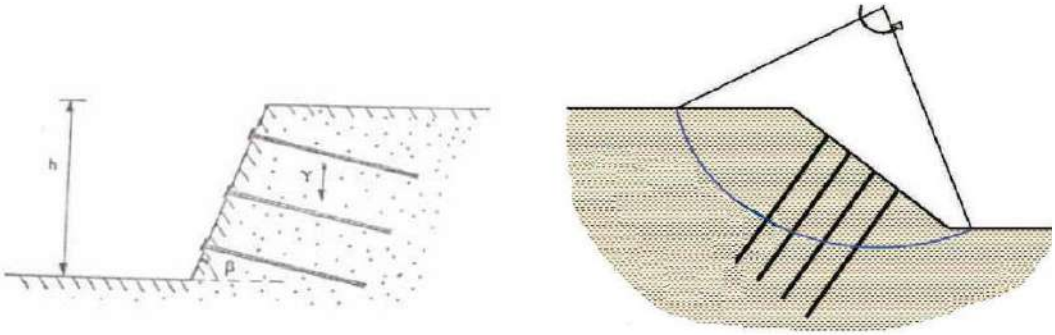


Figure I-24 : Renforcement des talus par le clouage en surface de rupture

B- La Terre Armée

Les structures en Terre Armée associent un remblai granulaire sélectionné et contrôlé, Des armatures résistantes en acier ou synthétiques et un système de parement modulaire généralement constitué de panneaux en béton préfabriqué, de treillis soudés ou de panneaux en acier semi elliptiques.[19]

Cette combinaison idéale crée une structure de soutènement gravitaire durable.



Figure I-25 : la terre armée

Cette technique est adaptable aux murs de soutènement de toute hauteur. Elle est également capable de supporter d'importantes charges de poids propre et de service, imposées par les structures associées, véhicules ou autres équipements. Et leurs avantages sont :

- Force, flexibilité et résilience ;
- Longévité prévisible et rentabilité ;
- Adaptabilité à un large éventail d'environnements ;
- Adaptabilité aux exigences esthétiques.

C- Origine de la production de déchets : La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

• biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;

• chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;

• technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;

• économiques : les produits en une durée de vie limitée ;

• écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;

• accidentelles : l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

C-1 Constitution chimique du déchet :

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particudlarités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [21].

C-2 Différents types de déchets :

C-2-1 Déchets ultimes :

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.[21]

C-2-2 Déchets inertes :

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants : Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux.

C-2-3 Déchets assimilés :

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants)

C-2-4 Déchets verts :

Déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages…)

C-2-5 Déchets organiques : Les termes suivants recouvrent la même notion :

Bio déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères).

Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts)

- déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.…

- boues

C-2-6 Déchets industriels banals (DIB) :

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

C-2-7 Déchets dangereux :

C-2-7-1 Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.…

C-2-7-2 Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé.[21]

D- le sable

D-1 Définition de sable

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0.063 (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler

jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaire de coquillage et de corail. (Voir figure) . [22]



Figure I-26 : le sable

D-2 Les classes de sables

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

a) La granularité

Permet de séparer les sable en trois catégories sont :

- Sables fins.
- Sables moyens.
- Sables grossiers.

b) La propreté et la teneur en fines elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

c) La nature minéralogique : En général, les sables peuvent être classés comme suit : - Sables siliceux. - Sables silico-calcaires. - Sables calcaires

D-3 Les sables de dunes

D-3-1 Définition

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable. D'après Fookes et Higginbotham (1968). Le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, Valorisation de sable des dunes Belhachemi & Berrafa 49 15 % de plaines désertiques et 30 % de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain.[23]

Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démuni en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux.

D-3-2 Intérêt de sable de dune

L'intérêt d'utilisation de tels agrégats se situe à deux niveaux : technique et économique. :

a) Les aspects économiques

Les aspects ont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable.

Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement.

b) Les aspects techniques

Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance.

Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base

D-3-3 Utilisation du sable de dune

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié (Chauvin, 1987). Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. L'utilisation du sable de dune seul ne peut être envisagée malgré la facilité qu'il présente au reprofilage, car sa stabilité de surface est souvent incertaine, ce qui augmente la résistance au roulement et provoque parfois des enlisements (Autret, 1989). Mais i l pourrait être mélangé avec d'autres matériaux.

IV-Stabilisations du sol :

1- Définition d'un sol instable :

Parfois, pour des raisons imprévisibles, le sol commence a se dilater ou a gonfler ou peut avoir des effets inattendus ou peut s'effondrer. Pour certaines raisons, la structure du sol peut également changer, modifiant ainsi la résistance du sol. Tout cela peut créer beaucoup de problèmes pour la construction. Le sol ne peut pas être utilise a des fins de construction et nécessite donc des techniques d'amélioration. Ces sols sont connus comme des sols problématiques.[24]

De nombreux sols peuvent se révéler comme problématique en géotechnique, parce qu'ils se dispersent, développer, réduire, subir tassement excessif, ont un manque force ou sont solubles.

Ces caractéristiques peuvent être attribuables a leur composition, la nature de leurs fluides interstitiels, leur minéralogie ou leur tissu. Il y a beaucoup de types de sols problématiques,

Certains de la plus notable étant le gonflement de l'argile, les sols et les sols souples dispersifs.

2- But de la stabilisation du sol :

Il est nécessaire de stabiliser les sols, car ils sont souvent si bourbeux qu'il est compliqué d'effectuer des travaux de construction, dessus. De plus, la stabilisation s'avère indispensable pour que les fondations soient bien posées et restent stables au cours du temps. Par ailleurs, sa réalisation doit se faire par des professionnels. En effet, seuls les puissants véhicules à transmission intégrale peuvent réaliser cette mission de stabilisation. Ils disposent de grandes roues à grosses nervures, d'une traction élevée et d'un puissant entraînement de translation. Leurs rotors de malaxage mélangent le sol et le liant préalablement répandu sur une profondeur allant jusqu'à 56 cm, et en une seule opération. La teneur en eau diminue et le sol devient poussiéreux, ce qui lui permet d'être parfaitement compacté.[26]

3-Technique de stabilisation :

Le traitement des sols est souvent exécuté pour augmenter leur résistance, pour réduire ou augmenter leur perméabilité ainsi que pour diminuer leur compressibilité. Il est, aussi utilisé pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau comme dans le cas des sols expansifs.

Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

La stabilisation mécanique ;

La stabilisation thermique ;

La stabilisation chimique.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

3-Type de stabilisation :

3-1 Le renforcement par encrage :

Il s'agit de renforcer le sol par des barres métalliques au bout desquelles sont placésdes blocs d'ancrage. Le renforcement est ainsi assuré par frottement ainsi que par contre butée. Les barres ont une section ronde pour réduire la surface soumise à la corrosion et sont liées au parement composé d'écailles en béton. La figure 1.4 montre le principe de renforcement par ancrages

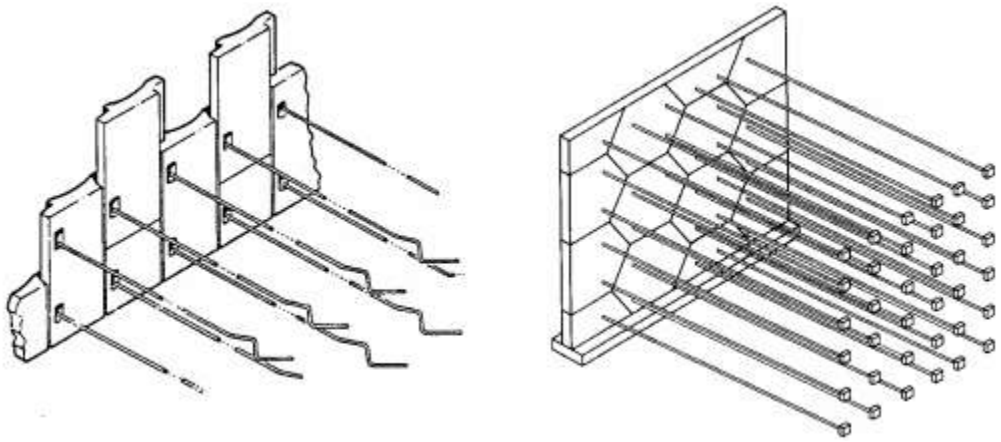


Figure I-27 : Renforcement par ancrages

Une autre technique consiste à lier chaque élément préfabriqué en béton à une butée d'ancrage par l'intermédiaire d'une bande en polymère comme indiqué dans la figure 1.5

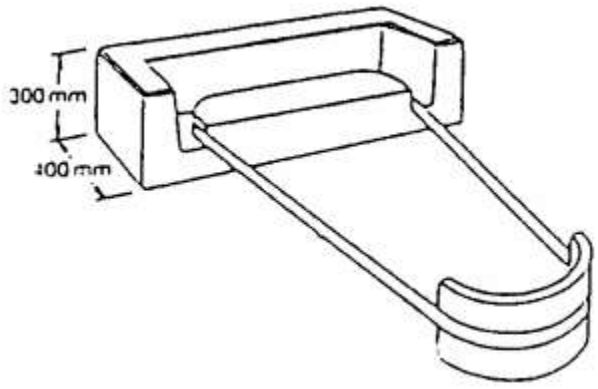


Figure I-28 : Bande en polymère

3-2 Murs de soutènement :

3-2-1 Introduction :

Un ouvrage de soutènement est une construction destinée à prévenir l'éboulement ou le glissement d'un talus raide.

Les ouvrages de soutènement sont essentiellement employés, soit en site montagneux pour protéger les chaussées routières contre le risque d'éboulement ou d'avalanches, soit en site urbain pour réduire l'emprise d'un talus naturel, en vue de la construction d'une route, d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art.

Le mur doit résister au :

- Enfoncement: poinçonnement du sol d'assise dû à la composante verticale

- Renversement : par rapport à son pied, dû au moment de la composante horizontale de la poussée

- Glissement: en pied par rapport au sol d'assise, dû à la composante horizontale de la poussée

3-2-2 les différentes classes d'ouvrages de soutènement :

- **Murs poids**

Caractéristiques :

- Le poids de l'ouvrage assure à lui seul la stabilité externe

- Ils ne sont sollicités qu'en compression (stabilité interne)

- La résultante du poids et de la poussée des terres doit être circonscrite au tiers central de toutes les sections

- Ils sont souvent retenus pour des hauteurs de retenue limitées à 5 – 6m

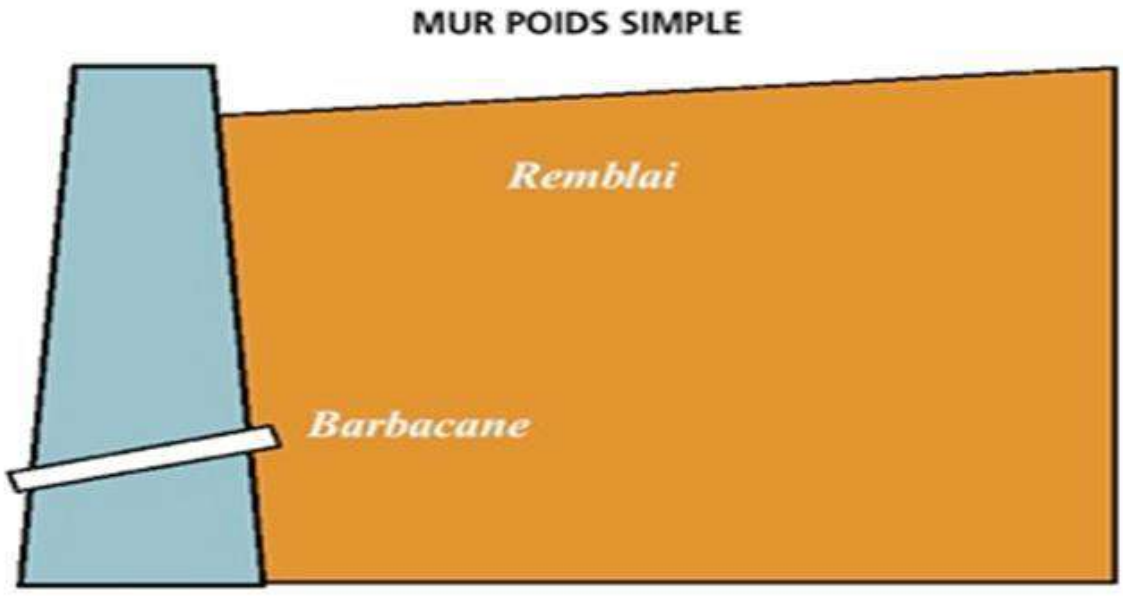


Figure I-29 : Un mur poids.

Type:

–Maçonneries de pierres, hourdées au mortier

–Maçonnerie sèche (gabions auto-drainants)

–Béton faiblement dosé

Pour soulager l'ouvrage des poussées hydrostatiques accidentelles on effectue:

– Drainage amont

Barbacanes: ouvertures cylindriques ou rectangulaires à travers le mur, destinés à donner l'alerte et à soulager l'ouvrage en cas d'engorgement accidentel du drain. Les barbacanes sont espacées de 1,5 à 2m en longueur et en hauteur.

- **Murs de soutènement en béton armé**

Légers et économiques, car leur forme permet de toujours tenir compte d'une partie des terres retenues pour assurer leur stabilité. La poussée des terres varie en fonction de la nature de celles-ci ; s'il s'agit de remblai, choisir avec soins les matériaux utilisés:

– Eliminer les argiles et les silts

–Préférer les sables, graviers, pierres concassées

–Se prémunir de l'eau

Murs auto-stables:

Des contreforts permettent de raidir le voile et ainsi de soulager la liaison semelle-voile ; une bêche éventuelle assure la résistance au glissement. L'importance des débords avant et arrière assure le non renversement au pivotement. La largeur de la semelle est déterminée par la condition de non-enfoncement.[27]

Murs tirés ou ancrés:

Les tirants d'ancrages sont sensiblement inclinés de telle sorte que la réaction de l'ancrage sur le mur équilibre en partie le poids de l'ouvrage et autorise l'absence de semelle de fondations.



Figure I-30 : Ferraillage d'un mur de soutènement.

• **Ouvrages en terre armée**

Le remblai est reconstitué de couches horizontales successives, d'épaisseur compatible avec un compactage efficace (ci. 25 à 40 cm), renforcées par des nappes d'armatures galvanisées disposées entre chaque tranche de sol avant compactage. La présence d'armatures au sein du massif augmente la cohésion du remblai et son angle de talus naturel. La peau (tôles galvanisées ou écailles de béton) protège les bords apparents de l'érosion et assure leur soutènement.

VI. Fondations profondes (Pieux) :

1- Définition d'un pieu :

Un pieu est une fondation élancée qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles. Le mot pieu désigne aussi bien les pieux, les puits et les barrettes.

Les trois parties principales d'un pieu sont la tête, la pointe, et le fût compris entre la tête et la pointe. La longueur d'ancrage h est la longueur de pénétration du pieu dans les couches de terrain résistantes.

D'un point de vue mécanique on distingue la longueur D du pieu de la hauteur d'encastrement mécanique D_e.

Cette valeur de D_e tient compte du fait que les caractéristiques mécaniques de la couche d'ancrage sont nettement supérieures à celles des sols de couverture traversés par le pieu

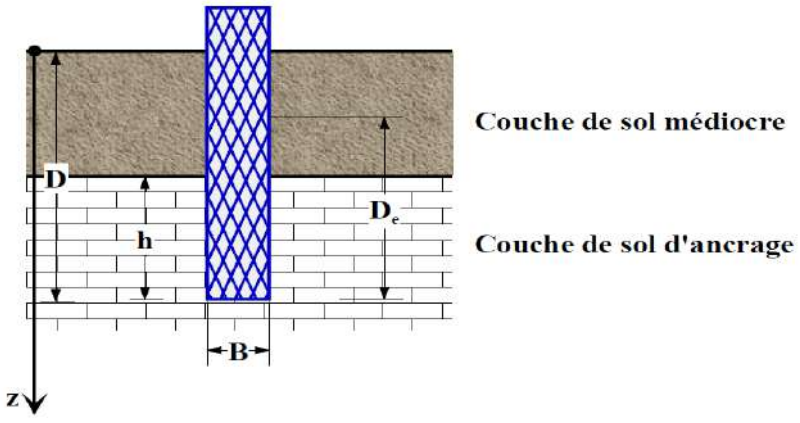


Figure I-31: Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique De.

2- Principaux types de pieux

On distingue deux grands groupes de pieux : les pieux mis en oeuvre avec refoulement du sol et les pieux réalisés par excavation du sol. Dans le premier groupe, on peut citer les pieux battus et dans le second les pieux forés.

2-1 Différent types de pieux

2-1-1 Pieux battus

Ce sont des pieux soit façonnés à l'avance soit à tube battu exécutés en place. Pour les premiers il s'agit essentiellement de pieux en métal et de pieux préfabriqués en béton armé, pour les seconds de pieux battus moulés.

Les pieux métalliques sont généralement sous forme de tube ou en forme de H. Les tubes peuvent être ouverts ou fermés à leur base. Les pieux métalliques sont mis en œuvre par battage ou par vibration.

Les pieux en béton armé sont fabriqués sur des aires proches du chantier. Ils sont mis en œuvre par battage ou par vibration.

L'exécution des pieux battus moulés consiste d'abord à battre un tube muni à sa base d'une plaque métallique dans le sol, à mettre, si nécessaire, en place la cage d'armatures, puis à remplir le tube de béton pendant son extraction.

2-1-2 Pieux forés

Leur exécution nécessite un forage préalable exécuté dans le sol avec les outils appropriés avec ou sans protection d'un tubage ou de boue permettant d'assurer la stabilité des parois du forage. Après mise en place, si nécessaire, de la cage d'armatures, le pieu est bétonné en utilisant une colonne de bétonnage, selon la technique du tube plongeur qui descend jusqu'à la base du pieu.

2-1-3 Puits

Les puits sont des fondations creusées à la main. De section circulaire, ils doivent avoir un diamètre supérieur à 1,20m ; de section quelconque ils doivent avoir une largeur minimale de 0,80m et une section minimale de 1,1m².

Les parois du puits sont soutenues par un blindage qui peut être récupéré ou abandonné. Après curage du fond du puits, le forage est bétonné à sec.

2-1-4 Gabions :

Mur de gabion (casiers remplis de pierre en grillage métallique) disposé en pied de glissement pour stopper son évolution vers la route.



Figure I-32 : Gabions

V- Généralité sur les geosynthetiques

1- Définition :

Un géosynthétique est le terme générique désignant un produit dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande, ou de structure tridimensionnelle, pour assurer aussi bien un rôle de drain, de filtre, de séparation ou de renforcement, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans des différents domaines, tels que la construction routière, les ouvrages souterrains, les travaux hydrauliques, les chemins de fer, les terrains d'aviations…etc.[28]

2- Origine des géosynthétiques

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

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

La deuxième innovation dans ce domaine fut l'utilisation de textile technique comme drain et comme filtre. Le fait que le liquide puisse traverser un matériel poreux tout en retenant une partie ou la totalité du sol adjacent, a permis le développement d'un matériau synthétique plus performant. Ainsi, le géosynthétique permet de remplacer la couche de sable, drainante et filtrante.

La fonction de filtration, autant au niveau de l'eau que des sols a permis aux géosynthétiques de prendre de l'essor dès 1930. C'est à cette date que les manufacturiers de textiles européens transforment leurs machines traditionnelles et développent de nouvelles gammes de produits orientés vers une utilisation en géotechnique.

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

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

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

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

3- Différents types des géosynthétiques

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

3-1- Géotextiles

Matière textile, plane, perméable et à base de polymère (naturel ou synthétique), peuvent être non tissé, tissé ou tricoté utilisé en contact avec le sol ou d'autres matériaux dans des divers

domaines. Les géotextiles sont utilisés pour des applications en séparation, filtration, drainage, renforcement et contrôle de l'érosion.



Figure I-33 : à gauche la structure d'un géotextile, à droite une nappe de géotextile

3-1- Géotextile non tissé

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

- **la liaison mécanique** : est faite par entrelacement des fibres, à partir d'une série d'aiguilles qui s'enfoncent dans la nappe qui défile (non tissé aiguilles).
- **la liaison chimique** : est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des décomposées proches des caoutchoucs naturels.
- **la liaison thermique** : est faite par calandrage (effets conjugués de la chaleur et de la pression) entre deux rouleaux presseurs chauffants. On obtient une fusion partielle des points de contacts des fibres (non tissé thermo soudé).

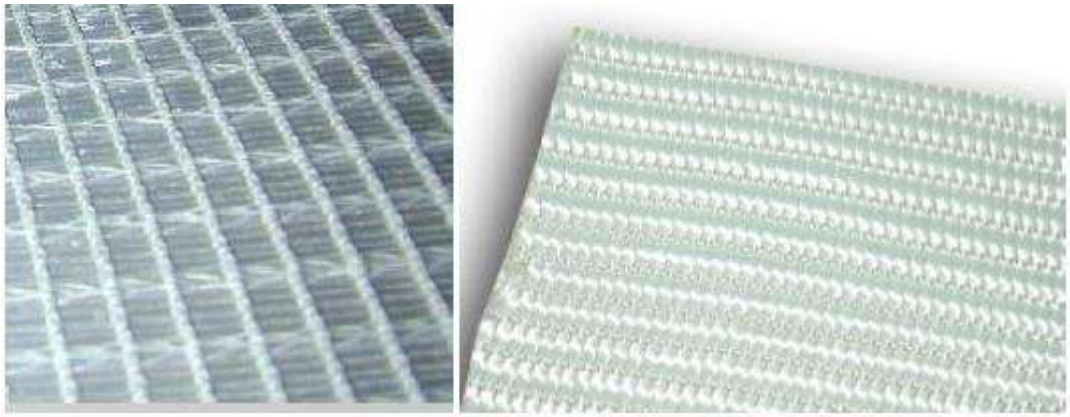


Figure I-34 : Géotextile non tissé

3-1-2- Géotextile tissé

Les tissés sont soit des tissés de fils mono filaments, soit des tissés de fils multifilaments dont chaque fil est constitué de plusieurs brins élémentaires soit des tissés de bandelettes de films extrudés à base de polyéthylène, ou de polypropylène. Le tissage permet d'obtenir un

module de traction élevé, une faible déformabilité et une régularité des pores intéressante sur le plan hydraulique cependant il entraîne une anisotropie en plan.

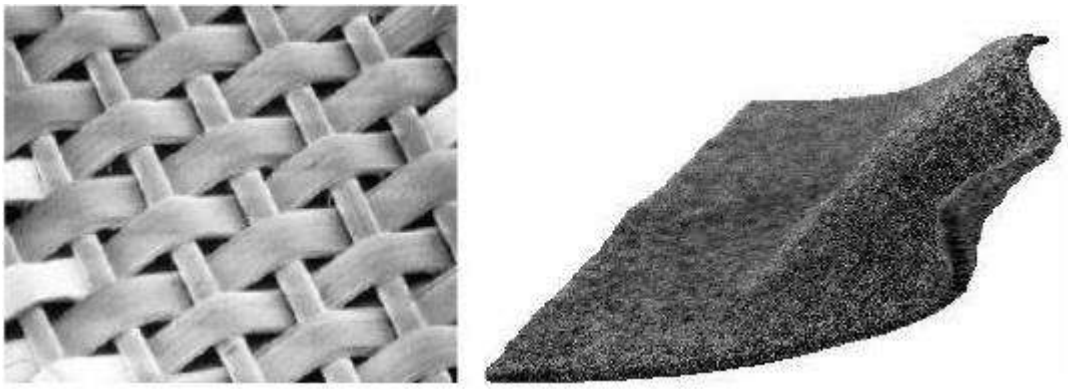


Figure I-35 : Géotextile tissé

3-1-3- Géotextile tricoté

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

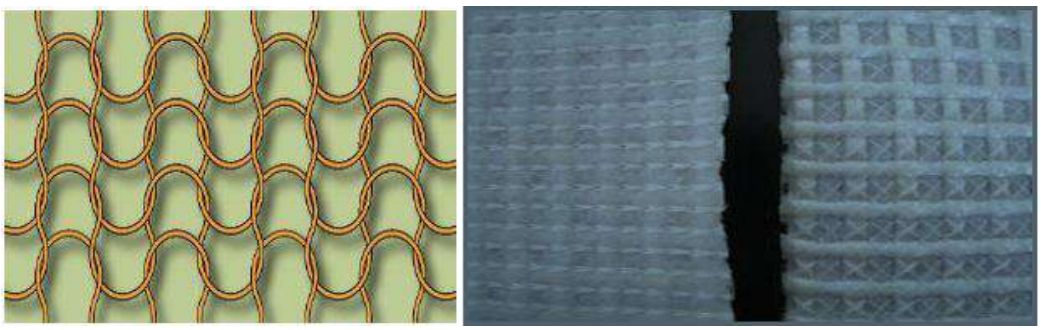


Figure I-36 : Géotextile tricoté

3-1-4- Géotextile tube (géotuyaux)

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



Figure I-37 : à gauche la forme du géotuyaux, à droite la mise en oeuvre de géotuyaux

3-2- Géogrille

C'est une structure plane, à base de polymère, constituée par un ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures sont des dimensions supérieures à celle des constituants. Elles sont utilisées en contact avec le sol pour renforcer les fondations, emblais…etc. Elles sont disponibles avec différentes résistances à la traction (entre 20 kN/m et 1000 kN/m) et différentes ouvertures de maille. Les caractéristiques de traction et d'allongement des géogrilles ne varient que faiblement sous des variations importantes de température et sous des contraintes permanentes. Elles sont faciles à manier et à mettre en oeuvre, car elles peuvent être déroulées et pliées. Elles peuvent être facilement découpées aux dimensions voulues et n'ont pas de bord coupant entrainé des blessures.

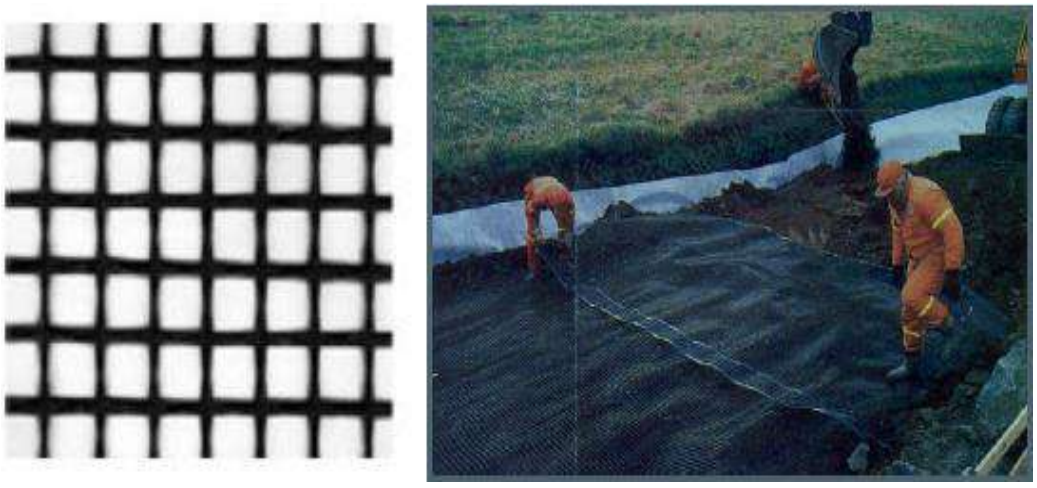


Figure I-38 : à gauche la structure de géogrille, à droite la mise en place du géogrille

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

3-2-1- Géogrille uni-axiale

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

3-2-2- Géogrille bi-axiale

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

3-3- Géofilet

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



Figure I-39 : à gauche un modèle de géofilet, à droite un géofilet dans un merlon

3-4- Géocomposite

Un géocomposite est un assemblage manufacturé de matériaux dont au moins l'un des composants est un produit géosynthétique, par exemple une géogrille complexée avec un géotextile non-tissé. Il peut être utilisé, soit en géotechnique (fonction de séparation et renforcement), soit pour les couches de roulement. Les géocomposites empêchent dans le même temps l'apparition de fissures et l'élargissement de celles existantes. Ceci grâce à leur capacité d'absorption des forces de cisaillement. Les géocomposites permettent également de renforcer les enrobés, non seulement en travaux neufs, mais aussi en entretien et réparation, La limitation de l'apparition et de l'élargissement des fissures augmente de ce fait la durée de vie des chaussées.



Figure I-40 : la structure d'un géocomposite

3-5- Géosynthétiques bentonitiques

Sont des géocomposites préfabriqués avec une couche de bentonite incorporée de façon typique entre un géotextile supérieur et un géotextile inférieur ou collée à une géomembrane ou une couche unique de géotextile. Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) à base de géotextiles sont souvent cousus ou aiguilletés à travers le cœur de bentonite pour augmenter la résistance

au cisaillement interne. Lorsqu'ils sont hydratés, ils sont efficaces comme barrière aux liquides et gaz et sont communément utilisés dans les étanchéités de décharges, souvent en association avec une géomembrane.



Figure I-41 : Géosynthétique bentonitique

3-6- Géosynthétique alvéolaire

Sont relativement épais, étant constitués de réseaux tridimensionnels réalisés à partir de feuilles de polymères découpées en bandes. Les bandes sont jointes entre elles pour former des cellules interconnectées qui sont remplies de sol et parfois de béton. Dans certains cas des bandes de grilles polyoléfines larges de 0,5 m à 1 m ont été attachées ensemble avec des barres en polymères verticales et utilisées pour former des couches épaisses des géosynthétiques alvéolaires appelées géomatelas.

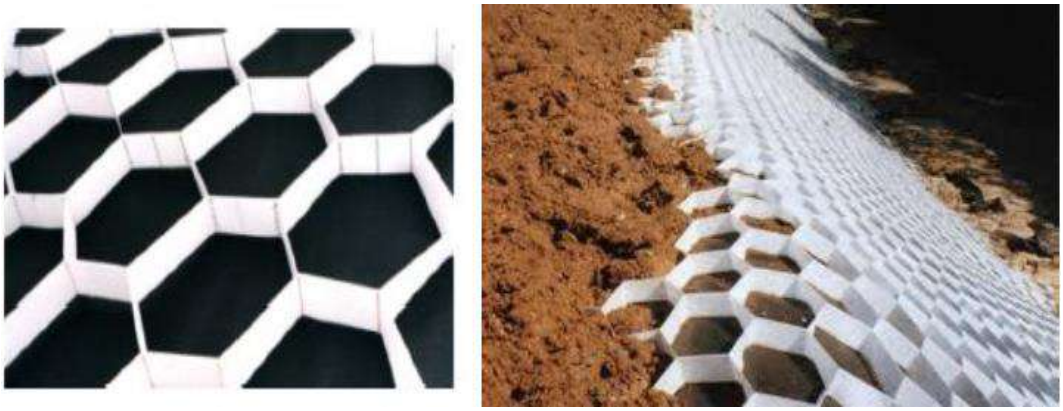


Figure I-42 : à gauche la forme d'un géosynthétique alvéolaire, à droite placement d'une nappe

3-6-1- Tissé de bandelette

C'est une sorte de tissé résultant de l'entrecroisement de bandelette. Ces produits sont surtout employés comme renforcement et protection contre l'érosion.

3-6-2- Mattes

Elles sont constituées de fils relativement rigides, liées thermiquement à leurs intersections, créant des structures (tridimensionnelles) très ouvertes.

3-6-3- Géoconteneurs

Ils sont des géosynthétiques à structure tridimensionnelle alvéolaire. Ils sont principalement utilisés jusqu'à présent pour la protection de talus contre l'érosion ou pour la construction de remblais de forte pente ou allégés. De nouvelles applications se présentent pour ces procédés tels que le renforcement de chaussées, la protection de cuves de gaz ou bien la réalisation de mur en sol renforcé.

3-7- Géomembranes

Ce sont des feuilles étanches, souples, minces et continues, fabriquées à partir de produits synthétiques ou bitumineux, La principale application des géomembranes est donc de constituer une barrière étanche soit entre un sol et un fluide, soit entre un sol et un gaz, et sont utilisés pour l'installation de stockage de déchets.



Figure I-43 : Géomembrane à gauche leur forme, et à droite leur mise en place

4- Propriétés des géosynthétiques

Les géosynthétiques sont définis par des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques selon des essais normalisés, identifiés pour l'essentiel par des normes internationales de type ISO ou européennes de type EN. Le tableau suivant présente quelques caractéristiques de trois types des géosynthétiques :

Tableau I-1 : Caractéristiques de quelques géosynthétiques

Caractéristique	unité	Géomembrane		géotextile		géogrille	
		Min	max	min	max	min	max
Epaisseur	Mm	1.5	1.59	0.7	1.6	0.6	0.9
Masse surfacique	g/m²	1380	1463	150	380	125	380
Masse volumique	g/m³	0.939	0.953	-	-	-	-
Taux de noire de carbone	%	2	3	-	>2	2	4
Résistance à la traction	KN/m	-	-	8.1	30.1	12	19
Déformation a l'effort parallèle	%	16.7	18.5	50	55	24	28
Résistance au seuil d'écoulement	KN/m	13	15	0.67	1.5	-	-
Perméabilité normal au plan	KN/m	10	11.8	0.4	1.4	-	-
Ouverture de filtration	µm	-	-	70	90	400	540

5- Domaines d'application

5-1- Les remblais routiers et ferroviaires

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

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



Figure I-44 : Un géosynthétique dans une construction routière

5-2- Stabilisation des talus

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

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

temporairement la végétation. La figure ci-dessous montre un exemple de réparation d'une pente par une structure de solI renforcée par un géosynthétique.[29]

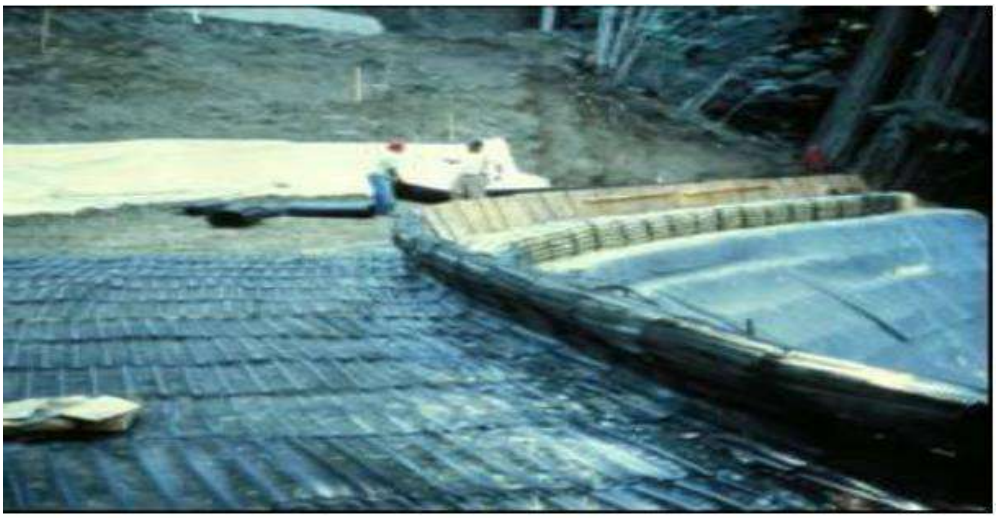


Figure I-45 : un renforcement d'une pente par un géosynthétique

5-3- Les remblais

La construction des remblais sur sols compressibles constitue un enjeu majeur.

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

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

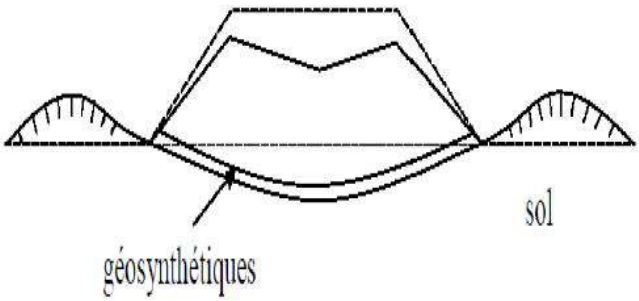




Figure I-46 : un géosynthétique sous-sol compressible

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

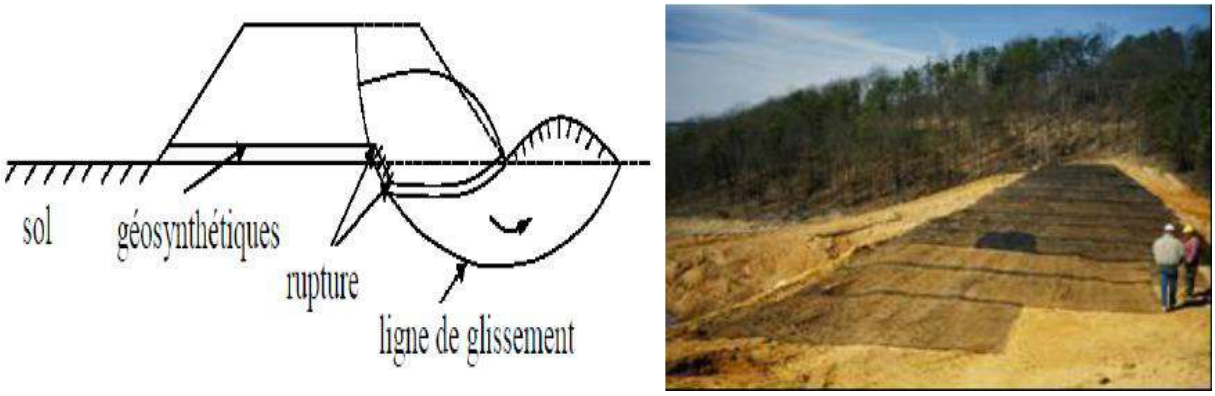


Figure I-47 : une nappe géosynthétique pour une construction d'un remblai

- prévenir une rupture par glissement le long de la nappe géosynthétique.

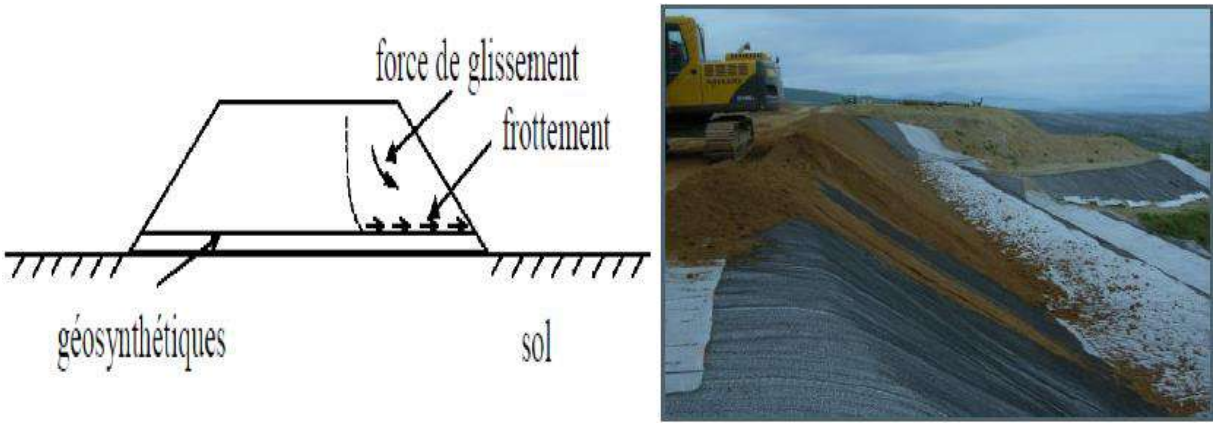


Figure I-48 : une nappe géosynthétique dans une construction une pente

5-4- Les murs de soutènement

Des nappes horizontales de géosynthétiques peuvent être associées à un massif de remblai à parement vertical ou sub-vertical pour constituer un massif en sol renforcé équivalent à un mur poids susceptible de résister à la poussée des terres à l'arrière de l'ouvrage. Les différents types des géosynthétiques habituellement utilisés sont des nappes de géogrilles ou de géotextiles tissés ou des bandes polymères. La stabilité locale du talus renforcé en parement est assurée par liaison des nappes ou bandes de renforcement aux éléments de parement. Ces parements ont des formes et des constituants très variés (polymère, béton, bois, etc.).

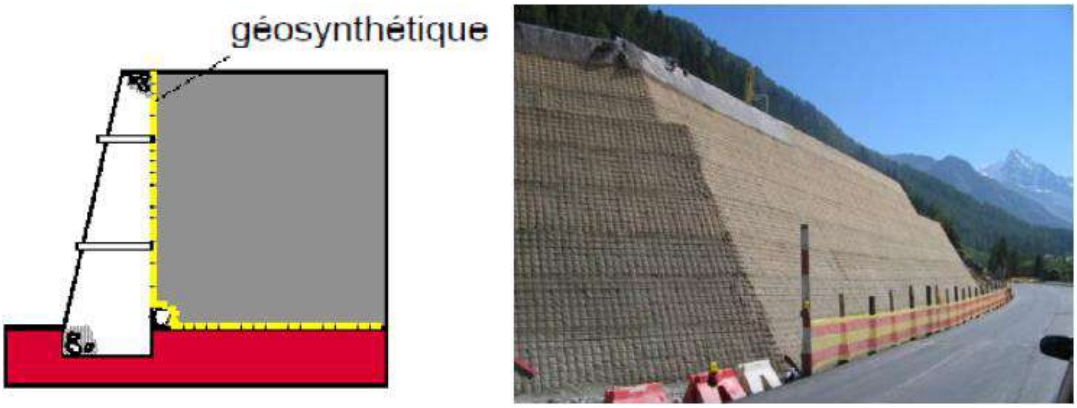


Figure I-49 : un mur de soutènement renforcé par géosynthétique

5-5- Le contrôle de l'érosion

L'érosion est un processus naturel causé par l'action de l'eau et du vent. Ce processus est influencé par nombreux facteurs tels que la nature du sol, de la végétation et la topographie et il peut être accéléré par l'activité humaine. L'absence de contrôle du processus d'érosion peut causer des dommages importants à l'environnement et aux infrastructures.

Selon le projet et les caractéristiques du site, un ouvrage de maîtrise de l'érosion peut impliquer l'utilisation d'un ou plusieurs produits géosynthétiques tels que géotextiles, géomatelas, géogrille, géocellules, géotubes.

Quelques exemples d'application de géosynthétiques dans des travaux de lutte contre l'érosion sont présentés dans les figures suivantes :



Figure I-50 : à gauche contrôle d'érosion sur pente, à droite travaux achevés

5-6- En agriculture

Le domaine agricole est, parmi les marchés des géosynthétiques, celui connaissant la croissance la plus rapide au niveau international. Les premiers usages concernaient les applications à la ferme et un certain nombre des premières spécifications s'adressaient directement à l'étanchéité de bassins à vocation agricole.

Ces usages pionniers comprenaient l'étanchéité de rigoles contribuant à économiser des ressources en eau précieuses ainsi que l'étanchéité de bassins de fermes et le stockage d'eaux issues de captages dans les régions arides du globe. De nos jours, il existe une large variété d'applications allant de l'étanchéité de rigoles et de bassins couverts ou non à la protection des eaux souterraines et de surface contre leur pollution par les déchets animaux.



Figure I-51 : à gauche végétation à l'aide de géogrille, à droite un bassin couvé par géomembrane

5-7- Traitement des eaux usées

Les géosynthétiques sont utilisés dans de nombreuses applications dans les installations de traitement d'eaux usées. L'utilisation la plus fréquente se situe dans les bassins de traitement aérobies et anaérobies. L'amélioration de l'évaporation des eaux usées ainsi que de la dessiccation des boues peut être réalisées à l'aide de géotubes perméables en géotextile. Les utilisations des géosynthétiques dans ces bassins sont essentiellement associées à la barrière d'étanchéité en fond et à la couverture flottante mais il y a de nombreuses variantes qui peuvent être sélectionnées en fonction des circonstances : barrières d'étanchéité de fond, couvertures, amélioration de l'évaporation, et dessiccation des boues.



Figure I-52 : les géosynthétiques dans les bassins de traitement

5-8- Autres applications

Les géosynthetiques peuvent aussi être utilisé pour :

- l'étanchéité des ouvrages hydrauliques ;
- l'installation de stockage de déchet et couverture ;
- renfoncement des dispositifs d'étanchéité sur pente ;
- drainage des tunnels et des ouvrages souterrains ;
- les ouvrages de protection ;
- … etc.

Nous avons fourni dans ce chapitre un aperçu global sur les différents types de géosynthétiques ainsi que leurs domaines d'utilisation, nous allons maintenant faire un zoom sur l'utilisation des géosynthétiques dans le domaine de la géotechnique routière.

VI-Corps de chaussée :

1- Définition :

Au sens géométrique: c'est la surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.

Au sens structurel: c'est l'ensemble des couches de matériaux superposées de façon à permettre la reprise des charges.

a) Couche de surface:

Elle composée de la couches de roulement et la couche de liaison et elle est en contact direct avec le pneumatique de véhicule et la charge extérieure. Son rôle est:

- Encaisser les efforts de cisaillement provoqués par la circulation.
- Imperméabiliser la surface de la chaussée.
- Assurer une transition avec les couches inférieures plus rigides.

b) Couche de base:

Elle reprend les efforts verticaux et repartis les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

c) Couche de fondation:

Elle a le même rôle que celui de la couche de base.

d) Couche de forme :

Elle est généralement prévue pour répondre à certains objectifs en fonction de la nature du sol support:

- Sur un sol rocheux : elle joue le rôle de nivellement afin d'aplanir la surface.
- Sur un sol peu portant (argileux à teneur en eau élevée) : Elle assure une portance suffisante à court terme permettant aux engins de chantier de circuler librement.

Actuellement, on tient de plus en plus compte du rôle de portance à long terme apporté par la couche de forme dans le dimensionnement et l'optimisation des structures de chaussées.

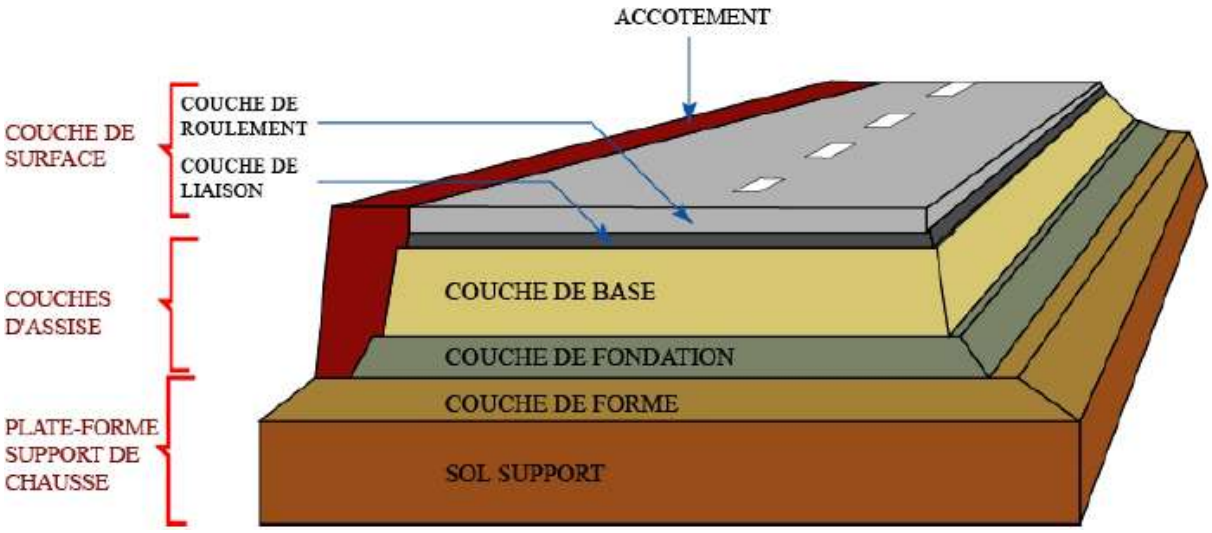


Figure I-53 : Différentes couches de chaussée

2- Les différentes catégories de chaussée :

Il existe deux catégories de chaussées:

- Les chaussées classiques (souples et rigides)
- Les chaussées inverses (mixtes ou semi-rigides)

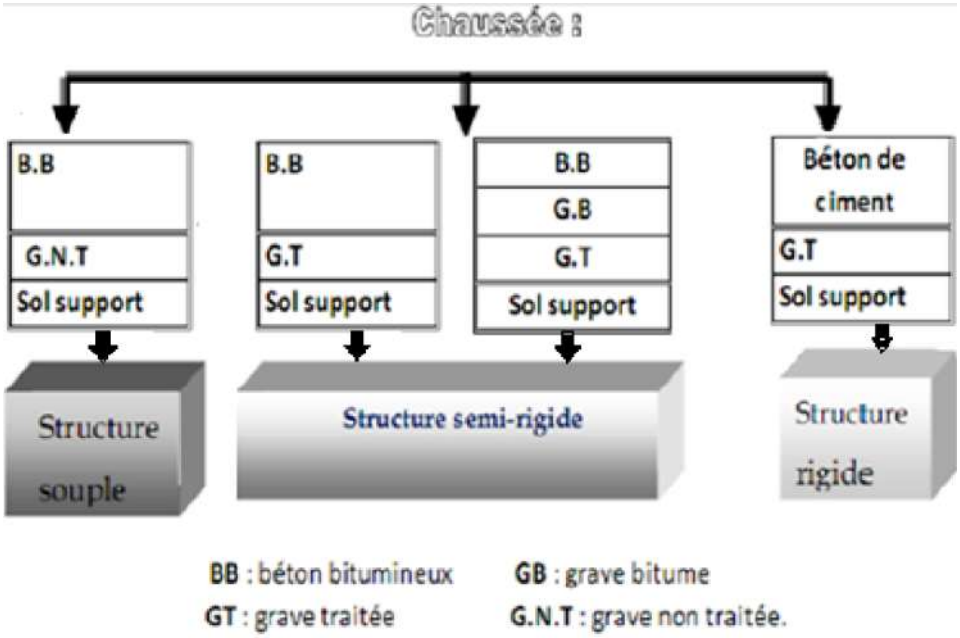


Figure I-54: Les catégories de chaussée

3- Les principales méthodes de dimensionnement:

On distingue deux familles des méthodes :

- Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.
- Les méthodes dites « rationnelles » basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées.

Pour cela on passera en revue les méthodes empiriques les plus utilisées.

3-1- Méthode C.B.R (California - bearing - ratio):

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90° à 100°) de l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur d'eau moins de 15cm.

La détermination de l'épaisseur totale du corps de chaussée à mettre en œuvre s'obtient par l'application de la formule présentée ci-après: $e = \frac{100+\sqrt{p}(75+log\frac{N}{10})}{i_{CBR}+5}$

I: indice CBR (sol support)
n: désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide
P: charge par roue P = 6.5 t (essieux 13t)
Log: logarithme décimal.
L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante:
e = a1 e1 + a2 e2 + a3 e3
a1 e1: couche de roulement
a2 e2: couche de base
a3 e3: couche de fondation
a1, a2, a3: coefficients d'équivalence.
e1, e2, e3 : épaisseurs réelles des couches.

Coefficient d'équivalence

Le tableau ci-dessous indique les coefficients d'équivalence pour chaque matériau :

Tableau I-2: les coefficients d'équivalence pour chaque matériau

Matériaux utilises	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux ou enrobe dense	2
Grave ciment – grave laitier	1.5
Sable ciment	1.00 à 1.20
Grave concasse ou gravier	1
Grave roulée – grave sableuse T.V.O	0.75
Sable	0.5
Grave bitume	1.60 à 1.70

3-2- Méthode du catalogue des structures :

C'est le catalogue des structures type neuves et établi par «SETRA ».Il distingue les structures de chaussées suivant les matériaux employés (GNT, SL, GC, SB).Il considère

également quatre classes de trafic selon leur importance, allant de 200 à 1500 Véh/J. Il tient compte des caractéristiques géotechniques du sol de fondation. Il se présente sous la forme d'un jeu de fiches classées en deux paramètres de données :

- Trafic cumulé de poids lourds à la 20ème année Tj.
- Les caractéristiques de sol.

Détermination de la classe de trafic:

La classe de trafic (TPLi) est déterminée à partir du trafic poids lourd par sens circulant sur la voie la plus chargée à l'année de mise en service. Les classes de trafics adoptées sont dans le tableau suivant:

Tableau I-3: Les classes de trafics

Class de trafic	**Trafic poids lourds cumulé sur 20 ans**
T1	T 7.3 10^5
T2	7.3 10^5 T 2 10^5
T3	2 10^6 T 7.3 10^6
T4	7.3 10^6 T 4 10^7
T5	T 4 10^7

Le trafic cumulé est donné par la formule :

$$Tc = TPl \times [1 + \frac{(1+\tau)^{n+1} - 1}{(1+\tau) - 1}] \times 365$$

TPL : trafic poids lourds à l'année de mise en service

n : durée de vie (n =20 ans)

Détermination de la classe du sol:

Le classement des sols se fait en fonction de l'indice CBR mesuré sur éprouvette compactée à la teneur en eau optimale de Proctor modifié et à la densité maximale correspondante. Après immersion de quatre jours, le classement sera fait en respectant les seuils suivants:

Tableau I-4 : Le classement des sols

Classe de sol	Indice C.B.R
S1	25-40
S2	10-25
S3	05-10
S4	<05

3-3- Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP):

L'utilisation de catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées: trafic, matériaux, sol support et environnement. [30]

Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée.

La Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une méthode rationnelles qui se base sur deux approches:

- Approche théorique.
- Approche empirique.

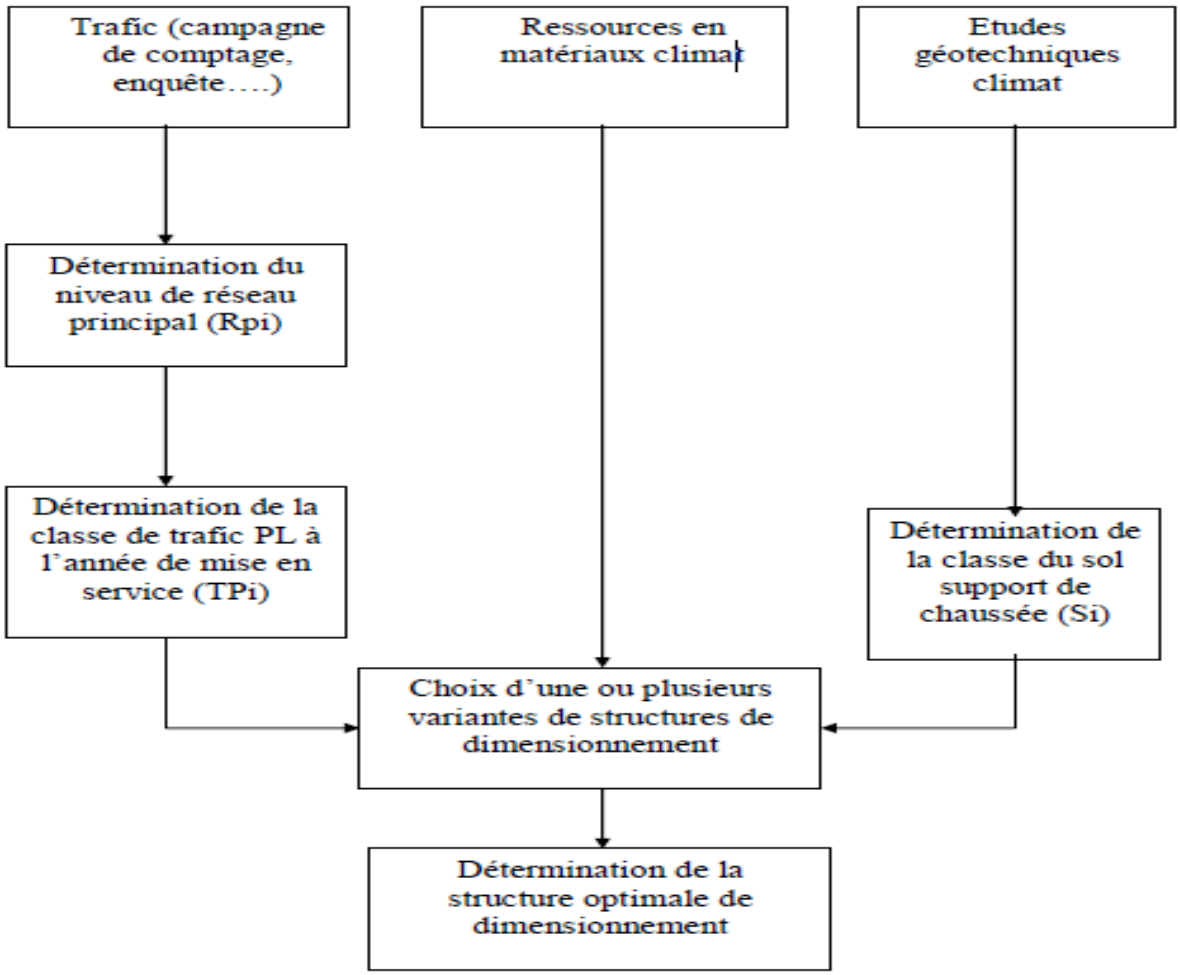


Figure I-55: Schéma de la démarche de catalogue

Chapitre II :

Calcul et dimensionnement d'un corps de chaussée avec géotextile .

Etude paramétrique (plaxis).

1-présentation du site à étudier :

Les routes du sud sont souvent associe a de grands altérations au niveau de leurs chaussée qui sont soumises à un chargement d'un trafic routier lourd.

La couche support est souvent de qualité médiocre et de faible portance ce qui cause des dommages a la chaussée.

Pour renforcer cette couche support nous faisons appel à des méthodes de renforcement par géotextiles.

Il s'agit d'étudier la capacité portante d'une couche de sable de dunes renforcée sous une chausse souple et soumise à un chargement d'un trafic routier.

Le cas d'étude porte sur les variantes suivantes :

1-1) VARIANTE I : CAS D'INCLUSION DE NAPPES GTX

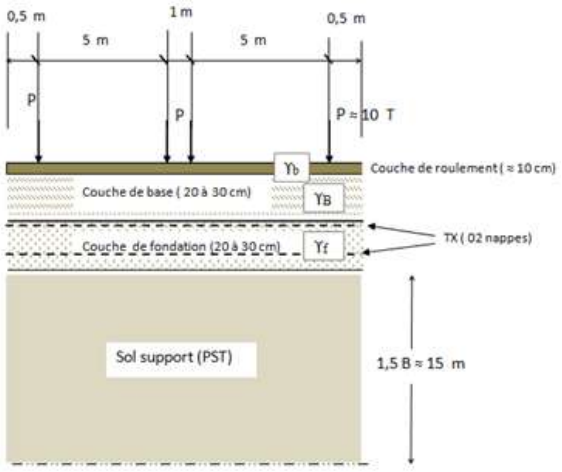


Figure II-1 : VARIANTE 1 : UTILISATION DE GEOTEXTILES

1-2) VARIANTE II : CAS D'INCLUSION D'UNE BANDE DE GCE

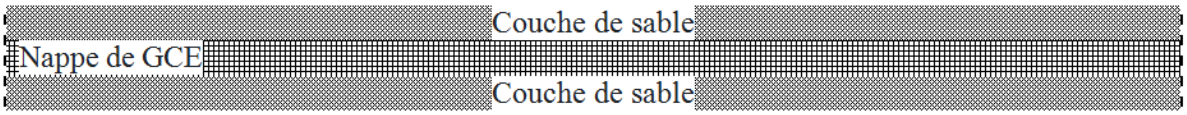


Figure II-2 : VARIANTE II : UTILISATION DE GEOGRILLES

2- cadre géotechnique : données fournies du site

LE SOL SUPPORT EST CONSTITUE DE SABLE DES DUNES DONT LES CARACTERITIQUE SONT LE SUIVANTES :

DS		
Origin		Ouargla area
$d_{100}/d_{20}/d_4$		0.5/0.315/0.15 (mm)
C_u		2.0
γ_{Max}		17.7 kN/m^3
I_D		92.17%
Sand equivalent		83.17%
Insoluble		96.73%
Cohesion	0 kPa	Performed according
Friction angle	29°	to direct shear test

POUR LE GEOTEXTILE :

GTX	
Designation	AS15
Type	Non-woven
Thickness (under 2 kPa)	0.8 mm
Mass per unit area	150 g/m^2
T (long.)	10 kN/m
T (trans.)	12 kN/m
R_{CBR}	1.7 kN

3- METHODE DE DIMENSIONNEMENT :

Le dimensionnement des structures de chaussée constitue une étape importante de l'étude d'un projet routier. Il s'agit simultanément de choisir les matériaux nécessaires ayant des caractéristiques requises et de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la structure de la chaussée. Afin d'assurer de bonnes caractéristiques mécaniques qui lui permettra de résister à toutes les charges pendant toute sa durée de vie.

Détermination du type de réseau

Les études initiées par les services du Ministère des Travaux Publics ont abouti en 1996 à la décomposition du réseau routier national de l'Algérie comme suit:

Réseau principal noté RP

Réseau secondaire noté RS

Mais seul le réseau principal RP est pris en considération dans le catalogue Algérien

Ce réseau principal se décompose en deux niveaux:

- réseau principal de niveau 1 (RP1);
- réseau principal de niveau 2 (RP2).

Réseau principal 1 (RP1):

IL comporte des:

- liaisons supportant un trafic supérieur à 1500 véhicules/jour
- liaisons reliant deux chefs lieu de Wilaya
- liaisons présentant un intérêt économique et ou stratégique

Il s'agit essentiellement d'un réseau composé de routes nationales (RN).

Réseau principal 2 (RP2):

Il est constitué de liaisons supportant un trafic inférieur à 1500 véhicules /jours

Ce réseau est composé de routes nationales (RN), de Chemins de Wilaya (CW) et de liaisons reliant L'Algérie aux pays riverains.

Données d'entrées du dimensionnement

Les données de base pour dimensionnement des structures de chaussées sont:

- **Durée de vie**: est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maître de l'ouvrage. Elles correspondent à un investissement initial moyen à élever et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré.
- **Risque de calcul:** La probabilité d'apparition de dégradation avant une période.
- donnée de x années soit inférieure à une valeur fixée.
- **Données climatiques**
- **Trafic :** Le poids lourds des véhicules est transmis à la chaussée sous forme de pression Classe de trafic
- **Sol support**
- **Les caractéristiques des matériaux**

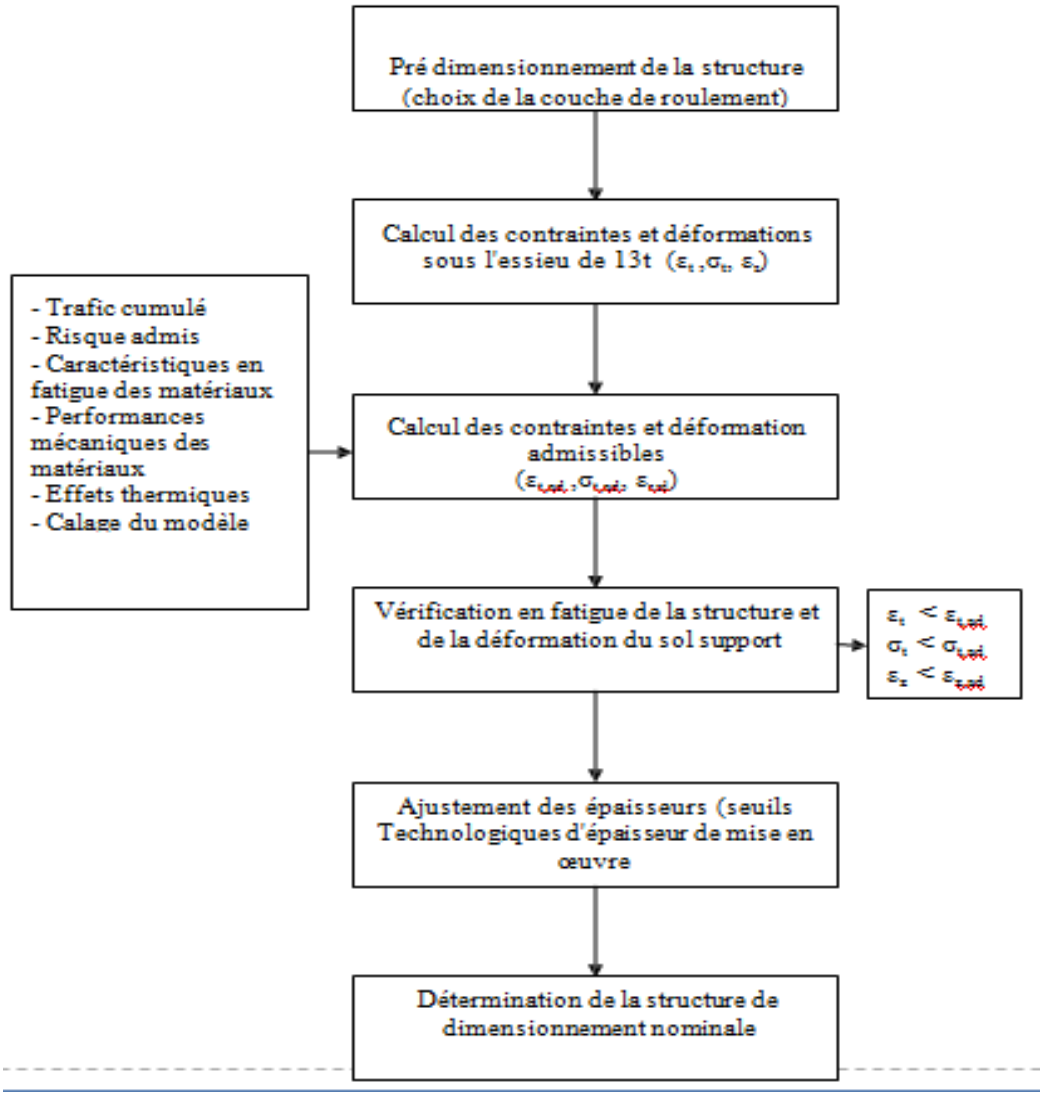


Figure II-3 : Démarche de calcul du dimensionnement des structures de chaussée Algériennes selon le catalogue de (2001)

TYPES DE CHAUSSEES :

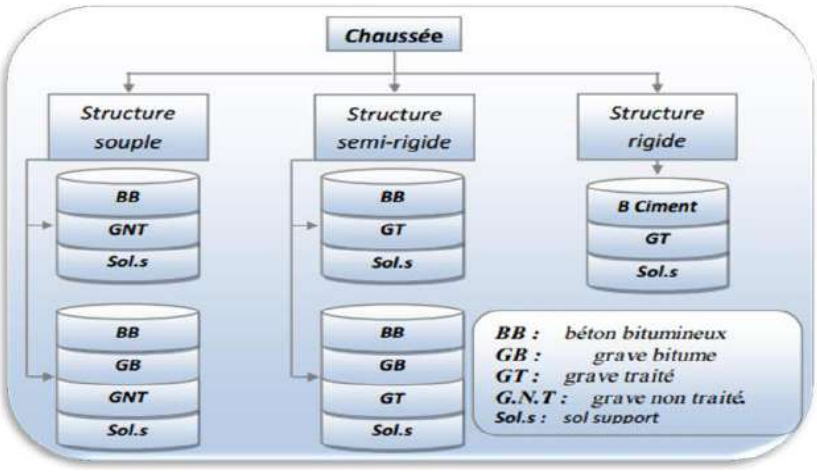


Figure II-4 : schéma de type de chaussée

PRINCIPALES METHODES DE DIMENSIONNEMENT

On distingue deux grandes familles :

- Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.
- Les méthodes dites « rationnelles » basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées.

Les méthodes du dimensionnement de corps de chaussée les plus utilisée sont :

- La méthode de C.B.R (California -Bearing - Ratio):
- Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves.
- Méthode du catalogue des structures.
- La méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

Mécanismes de renforcement

Trois mécanismes rentrent en compte dans le renforcement via les géo synthétiques :

- La contrainte latérale
- L'augmentation de la capacité portante
- L'effet de la membrane sous tension

Mécanisme de confinement latéral de la couche de base : s'explique par le fait que le matériau de l'agrégat de la couche de base interagit avec la géogrille principalement en s'imbriquant dans les ouvertures de la géogrille. Les nervures de la géogrille confinent l'agrégat et résistent au mouvement latéral de l'agrégat quand la couche de base est chargée en surface. En retenant latéralement le sol, quatre mécanismes de renforcement sont potentiellement réalisés, comme représentés sur la **figure II-5.** Ces mécanismes incluent :

- Empêchement de l'étalement latéral de l'agrégat de la couche de base ;
- Confinement croissant et ainsi résistance croissante de la base à proximité du renforcement.
- Amélioration de la distribution verticale des contraintes sur le sol de fondation.
- Réduction de la contrainte de cisaillement dans le sol de fondation.

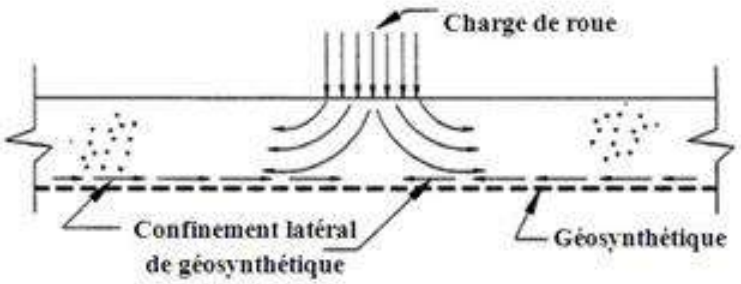


Figure II-5 : Confinement latéral

Mécanisme de surface de rupture modifiée et augmentation de la capacité portante : se traduit par le fait que le géosynthétique force la surface de rupture potentielle à se développer selon une surface alternative qui a une plus grande résistance totale **(figure II-6).**

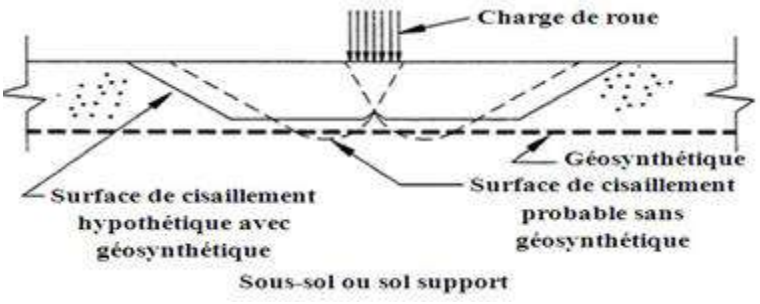


Figure II-6 : Modification surface de rupture augmentation de la capacité portante

Mécanisme de membrane tendue

Comme décrit d'abord par Giroud et Noiray, est plus approprié quand une ornière ou une large déformation verticale (plus grande que 25 mm) est permise. Ainsi ce mécanisme est approprié aux routes non revêtues. Des forces de tension sont installées dans le renforcement par les contraintes de cisaillement agissant à l'interface avec le sol. Pendant le chargement lourd ou répété, la couche d'agrégat déforme sensiblement, créant les ornières de surface qui forcent le géotextile à déformer **figure II-6**. Si les forces de tension coïncident avec une courbure appréciable du renforcement, alors les contraintes normales dans le sol agissant de part et d'autre du renforcement sont inégales. Ce phénomène est connu sous le nom de l'effet de membrane tendue.

Sous la roue, dans le creux de l'onde, la membrane tendue porte une partie de la charge de la roue et réduit la contrainte normale sur le sol de fondation. En dehors de la surface chargée, au-dessus des crêtes adjacentes de l'onde, la membrane tendue s'appuie sur le sol de fondation et augmente la contrainte normale (pression de confinement) où elle sert à résister à la rupture par cisaillement. Une membrane tendue de ce fait permet de diminuer les contraintes appliquées et d'augmenter la capacité portante. L'effet de membrane tendue est significatif seulement si les charges de la circulation sont canalisées et les profondeurs d'ornière sont relativement grandes.

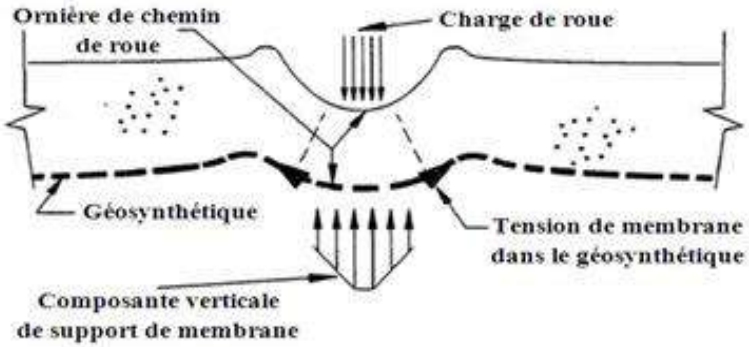


Figure II-7 : Membrane tendue

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

Renforcement des chaussées à l'aide géotextile

Les géotextiles présentent l'avantage de pouvoir jouer aussi bien le rôle de renforcement que de séparateur au sein de la chaussée ce qui constitue un atout important.

Grâce à son rôle séparateur il permet d'empêcher la migration des fines des couches granulaires (vers la couche de sol) ce qui aurait pour effet de fragiliser la couche granulaire et donc l'assise de la chaussée.

Le géotextile utilisé en renforcement améliore la résistance mécanique d'un massif de sol dans lequel il est inclus. Il améliore à la fois la résistance à la traction du massif et sa capacité à se déformer avant la rupture.

Dans son guide sur les systèmes de renforcement des chaussées, le constructeur Tensar nous explique également que l'emploi de géotextile peut permettre de construire un radier sur sol mou. En effet, la réalisation d'un radier en sol renforcé par des nappes de géotextiles et destiné à supporter un remblai sur sol compressible permet d'éviter les cisaillements dans le remblai et de maîtriser son poinçonnement dans le sol compressible.

Dans le cas de corps de chaussée construit sur des terrains susceptibles de comporter des karsts ou autres cavités souterraines non repérées, la réalisation d'un radier renforcé par des nappes de géotextiles permet de diminuer le risque de rupture brutale, voire de maintenir le niveau de service de la chaussée en cas d'apparition de fontis. **Comportement mécanique :**

Lors du passage de roues, il y a comme un « gonflement » du sol autour des roues, or avec la mise en place du géotextile, ce dernier qui a été étiré lors de son installation dans la chaussée se déforme également. Avec la contrainte exercée par les roues, le géotextile prend une forme arrondi et sa face concave reprend plus d'effort. Le fait que le géotextile reprenne plus d'effort à la verticale du passage des roues a pour conséquence que la couche d'agrégats reprend moins d'effort.

Renforcement des chaussées à l'aide Géogrille

La majorité des ouvrages positionnent la géogrille comme le système de renforcement le plus efficace (quand on parle de renforcement pur et non de combinaison des fonctions de renforcement et séparation).

Dans les applications de renforcement du sol, la résistance et la rigidité d'un matériau géosynthétique n'ont d'importance que si elles peuvent être transférées efficacement au sol environnant.

Parmi les désavantages des géotextiles dans le renforcement des routes, on peut mentionner : Leur extrême flexibilité qui peut causer des « tortillements » même après l'installation. Par conséquent, les avantages liés à « l'effet de membrane » ne sont obtenus qu'après une déformation importante de la route pour mettre en tension le géotextile. Cela peut entraîner l'affaiblissement de la chaussée et nécessiter des travaux d'entretien précoces.

Il faut prévoir des bandes plus longues de géotextile pour permettre leur ancrage à l'extérieur de la zone routière soumise à la charge.

L'emplacement du passage des roues doit être fixe pour assurer le rendement à long terme des routes renforcées par géotextiles. Compte tenu que les géotextiles ne sont généralement pas prétendus, il faut que des ornières se forment dans le sol support avant que le trafic lourd ne puisse circuler. Il est essentiel que ces ornières soient maintenues et que d'autres ornières ne se forment pas dans les zones adjacentes le long de l'interface entre le sol support et la fondation.

La formation d'ornières dans le sol support entraîne l'accumulation d'eau. Il en résulte une détérioration accélérée de la route. En raison de tous les désavantages énumérés ci-

dessus, l'utilisation efficace des géotextiles dans le renforcement routier est généralement limitée aux routes de pénétration étroites et non pavées.

Interaction avec l'agrégat

Pour que le renforcement granulaire soit efficace, il faut transférer les charges s'appliquant sur les agrégats vers la géogrille tendue. Avec les géogrilles biaxiales, on y parvient grâce à un «verrouillage mécanique », un procédé où les particules granulaires pénètrent partiellement dans les ouvertures de la géogrille et se figent en place lorsque le matériau est compacté. Ce procédé est aussi appelé « confinement mécanique ».

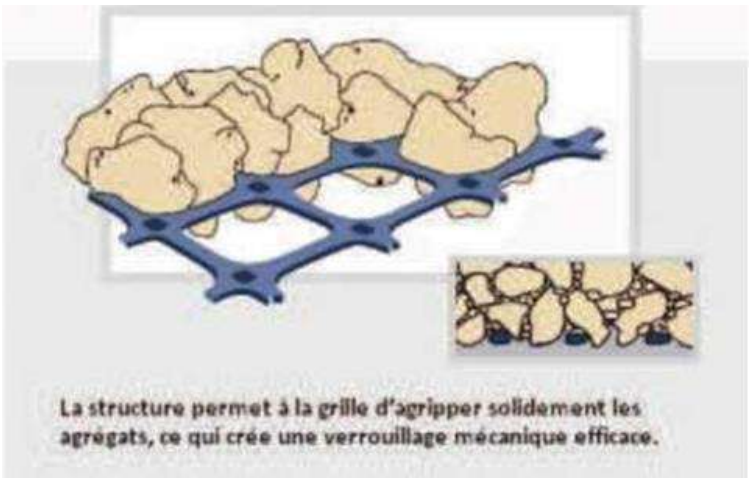


Figure II-8 : structure de géotextile

Le confinement efficace des agrégats produit une « zone améliorée » qui s'étend au-delà de l'interface entre la géogrille et les agrégats. Le rendement de la route est considérablement amélioré grâce au figement des agrégats en place. La force et la résistance des géogrilles biaxiales lorsque soumises à une faible tension sont essentielles à leur rendement dans les applications routières.

Une fois que le verrouillage mécanique a été effectué après l'épandage et le compactage des agrégats sur le dessus de la géogrille, les avantages du renforcement se manifestent dès que le trafic commence à circuler sur la route

Les géogrilles permettent d'utiliser une couche plus mince d'agrégats, tout en offrant la même capacité et fonctionnalité qu'une couche non renforcée plus épaisse. En général, la réduction de la quantité d'agrégats est de l'ordre de 40 % à 60 %.

La méthode de Giroud et Han permet de calculer l'épaisseur de la couche d'agrégat quand on utilise un renforcement.

Cette méthode donne la formule suivante :

$$h = \frac{1.195+\left(0.910+0.019J-1.744J^2\right)\left(\frac{r}{h}\right)^{15}logN}{\left[1+0.204\left(\frac{3.48CBR_{bc}^3}{CBR_{sg}}-1\right)\right]}\left(\sqrt{\frac{P}{13.7N_c\left(\frac{s}{3}\right)\left[1-0.9exp\left(-1.426\left\{\frac{r}{h}\right\}^{15}\right)\right]CBR_{sg}}}-r\right)$$

J(mn/°): module de stabilité des ouvertures
s (mm): profondeur d'ornière admissible.
P(KN): poids de la roue exprimé ; égal à la moitié du poids de l'essieu.
h(m): qui est la profondeur nécessaire pour répartir la charge sur la roue à une pression équivalente à la capacité portante du sol support, $q = mc_uN_C$
r(m): rayon de la surface de contact de pneu équivalente
CBR_{bC} *et* CBR_{sg} = correspondent respectivement aux indices CBR de la fondation granulaire et du sol support.
N : nombre de passages d'essieux
N_C : facteur de la capacité portante
N_C = 3,3, J = 0 dans le cas d'une fondation non renforcée.
N_C = 5,14, J = 0 dans le cas d'une fondation renforcée par géotextile.
N_C = 5,71, J = 0.32 m-N/deg dans le cas d'une fondation renforcée avec une géogrille Tensar
BX1100.
Nc = 5,71, J = 0,65 m-N/deg dans le cas d'une fondation renforcée avec une géogrille Tensar
BX1200.

Avantages

On distingue deux zones d'application pour les géogrilles :

- Le renforcement de la couche de sol
- Le renforcement des couches granulaires (couche de forme, de fondation et de base)

Renforcement de la couche de sol :

Les couches de sols mous (support de la chaussée) constituent un problème courant dans le domaine de la construction routière. Cela peut poser un problème à court terme s'il s'agit de la construction d'une route d'accès temporaire ou un problème à long terme dans le cas d'une route permanente construite sur un sol support de faible portance.

Dans les deux cas, une déformation importante du sol support entraînera la détérioration rapide de l'ensemble de la structure de la route.

C'est pourquoi le confinement des agrégats dans les ouvertures d'une géogrille procure une plate-forme granulaire plus rigide. Cette plate-forme améliore la distribution de la charge, comme une raquette répartit uniformément le poids d'une personne sur une plus grande surface de neige.

Cet « effet de raquette » généré par les géogrilles biaxiales permet une réduction de la contrainte appliquée sur sol.

Les géogrilles peuvent ainsi résoudre des problèmes d'accès sur site, sur les chantiers notamment où les camions exercent de fortes pressions durant la construction. Comme il a été dit précédemment, l'usage d'une géogrille permet de réduire l'utilisation de matériaux de remblais et ainsi limiter les opérations de sur excavation dans des sols parfois de mauvaise qualité.

Les géogrilles biaxiales répartissent les charges de façon plus uniforme, augmentent la capacité portante du sol support, réduisent la formation d'ornières et procurent une solution de rechange aux méthodes de stabilisation conventionnelles plus coûteuses sur le long terme.

Outils de calculs actuels :

En Amérique du nord la méthode de conception la plus utilisée est celle de l'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officiais). La méthode considère la chaussée comme un système élastique multicouche avec un nombre global de structure (SN) qui reflète l'épaisseur de la chaussée au total et sa résilience vis-à- vis des chargements de trafic répétées. Le SN requis pour un projet est sélectionné de telle sorte que la chaussée puisse supporter des charges de trafic prédit ainsi que la décroissance de l'entretien que prévoit.

Le renforcement d'une chaussée se mesure à l'aide de deux outils : le TBR (Traffic Benefit Ration) et le BCR (Base Course Réduction).

Le TBR est défini comme le rapport entre le nombre de cycles de charge sur une section renforcée (N_R) pour atteindre un état de ruine défini (une profondeur d'orniérage donnée) et le nombre de cycles de charge sur une section non renforcée (N_U) avec la même géométrie et les mêmes constituants matériels qui atteint le même état de ruine défini.

TBR = N_R/N_U pour la plupart des géotextiles le TBR se situe entre 1.5 et 10 tandis qu'il se situe entre 1.5 et 70 pour des géogrilles.

La BCR est définie comme le pourcentage de réduction dans l'épaisseur de la couche de base due au renforcement apporté via les géosynthétiques (T_R) par rapport L'épaisseur de la chaussée souple avec les mêmes matériaux, mais sans renforcement (T_U), pour atteindre un état de ruine défini.

$$BCR = T_R/T_U$$

Lors de la détermination du BCR, l'étude a montré qu'une couche de base renforcée de 350 mm d'épaisseur correspondait à une couche non renforcé de 450 mm d'épaisseur. Dans la littérature une BCR peut aller jusqu'à 40% dans certains cas.

Cependant la méthode AASHTO reste empirique et les études menées jusqu'à présent reste du cas par cas, c'est pourquoi il reste difficile avec cette méthode de comparer les renforcements entre eux et d'inclure le TBR et le BCR dans la conception de projet car ces ratios sont rattachés à des cas précis et non généraux.

De plus, un autre outil de calcul afin de connaître la capacité portante d'un sol et le CBR. Il s'agit du rapport de la force par unité de surface, nécessaire pour pénétrer une masse de sol avec piston circulaire normalisé à raison de 1,25 mm / min par rapport à celle nécessaire pour la même pénétration d'un matériau de référence.

Le California Bearing Ratio test est un test de pénétration développé par la California State Highway Department (États-Unis) pour évaluer la capacité portante du sol de fondation pour la conception des chaussées souples.

4- CARACTERISTIQUES DES MATERIAU A ETUDIER :

4-1 Géotextile non tissé

Ce sont des nappe constituées de filaments continus (ou de fibres coupées) disposés de façon aléatoire et liée par différents procédés mécanique, thermique ou chimique.

L'aiguilletage est un procédé de liaison purement mécanique dans lequel un grand nombre d'aiguilles hérissées d'ergots traversent le filament ou de fibres dans un mouvement alternatif rapide. Les aiguilles enchevêtrent les fibres qu'elles rencontrent, ce qui donne à la nappe une cohésion importante.

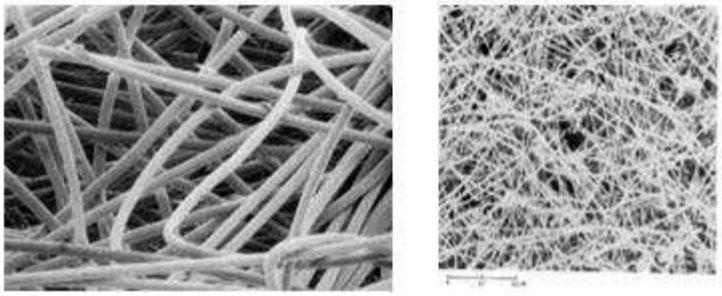


Figure II-9 : Non tissé aiguilleté

4-2 GEOGRILLES :

Les géo grilles sont classées parmi les produits géo synthétiques et dont la fonction est le renforcement des sols. Ils sont le plus souvent utilisés pour le renforcement des sols incohérents et des corps du sol à gros grains. Les Géo grilles ont une haute rigidité et force plus que les autres géotextiles.



Figure II-10 : GEOGRILLES

Tableau II-1 :les propriétés physique de chaussée

MATERIAU	E (MPa)	Coefficient de poisson	Poids (KN/m3)	Epaisseur (mm)
Couche roulement	1.3 E3	0.48	18	100
Couche base	1.5E3	0.35	24	200
Couche fondation	0.3E3	0.35	24	300
Sol support (Sable)	15	0.4	16	15000
GEOTEXTILE	EA = 500 KN/m	-	300 KG/m3	0.8

5- CAS D'ETUDE :

CAS DE GEOTEXTILES : On a procédé à l'insertion de plusieurs nappes de géotextiles. Dans la couche de base, la couche de sable et sous la couche de fondation.e

Chapitre III :

Analyse et resultats

I-Synthèse bibliographique sur l'outil numérique utilisé(PLAXIS) :

I-1 Présentation de PLAXIS 8.2

1-1 Introduction:

PLAXIS 8.2 est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique.

Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. L'utilisation de PLAXIS consiste en quatre sous-programmes (Input, Calculassions, Output, Curves) :

a) Le programme d'entrée de données (Input)

Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

-Réglages généraux

La fenêtre des réglages généraux (*General settings*) apparaît lors de la création d'un nouveau projet et peut ensuite être ouverte depuis le menu *File*. Cette fenêtre contient les onglets de projet (*Project*) et de dimensions (*Dimension*). L'onglet *Project* contient le nom du projet, une description, le type de projet et les données d'accélération.

L'onglet *Dimensions* contient les unités fondamentales de longueur, de force et de temps et les dimensions de la table à dessin.

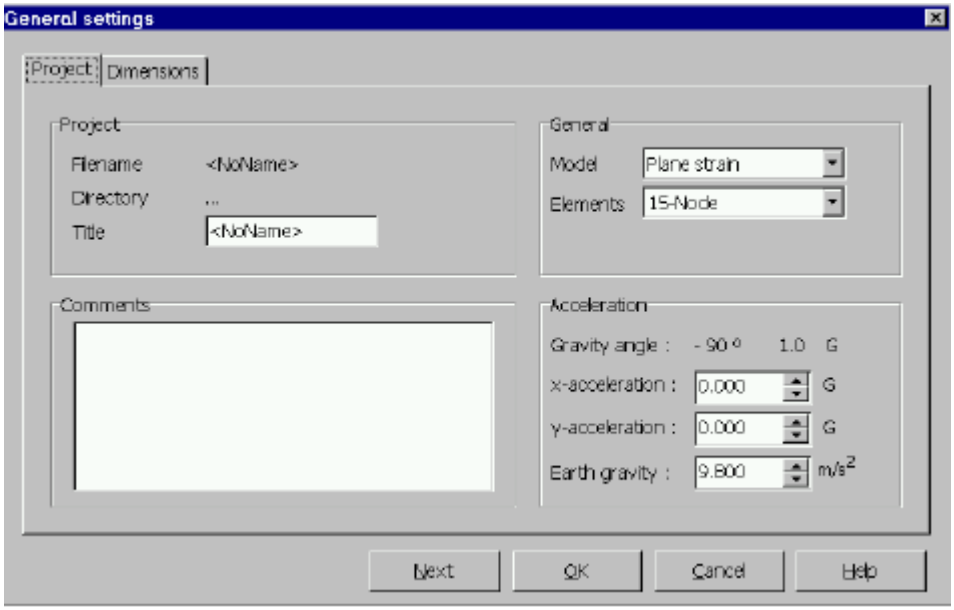


Figure III-1 : Fenêtre de réglages généraux (onglet *Project*)

-Le type de modèle *(Model)*

PLAXIS Version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par éléments finis en deux dimensions. Les modèles d'éléments finis peuvent être soit plans (*Plane strain)*, soit axisymétriques (*Axisymmetric)*. Des programmes de PLAXIS séparés sont disponibles pour effectuer des analyses 3D. Le réglage par défaut du paramètre *Model* est *Plane strain*.

-Les éléments *(Eléments)*

Des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds (Figure 4.1) pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume peuvent être sélectionnés.

L'élément à 15 noeuds fournit une interpolation du quatrième ordre pour les déplacements et l'intégration numérique se fait sur douze points de Gauss (points de contrainte). Pour le triangle à 6 noeuds, l'interpolation est d'ordre deux et l'intégration numérique se fait sur trois points de Gauss (Figure 4.2)**.**

Un élément à 15 noeuds peut être imaginé comme la réunion de quatre éléments à 6 noeuds, étant donné que le nombre de noeuds et de points de contraintes est identique dans les deux cas. Néanmoins, un élément à 15 noeuds est plus puissant que quatre éléments à 6 nœuds réunis.

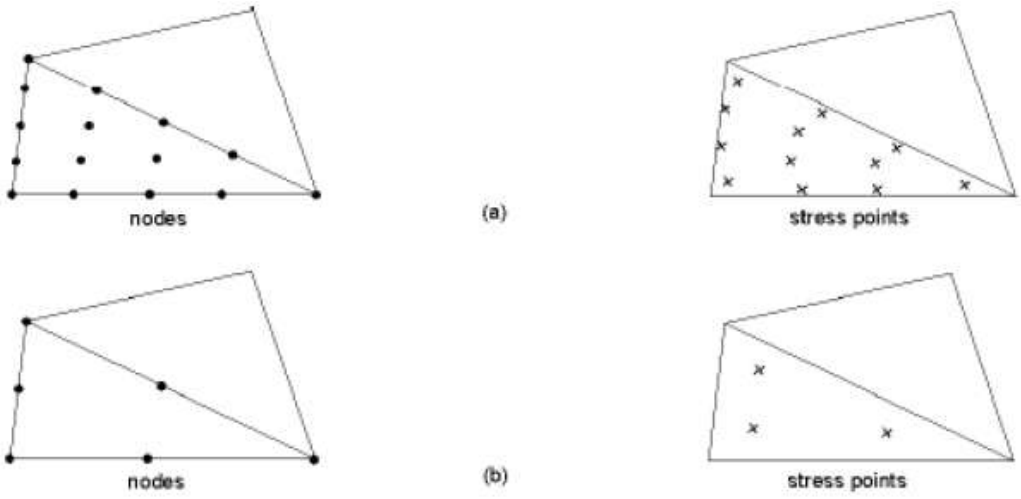


Figure III-2 : Position des noeuds et des points de contrainte dans les éléments de sol (a) élément à 15 noeuds; (b) éléments à 6 noeuds,

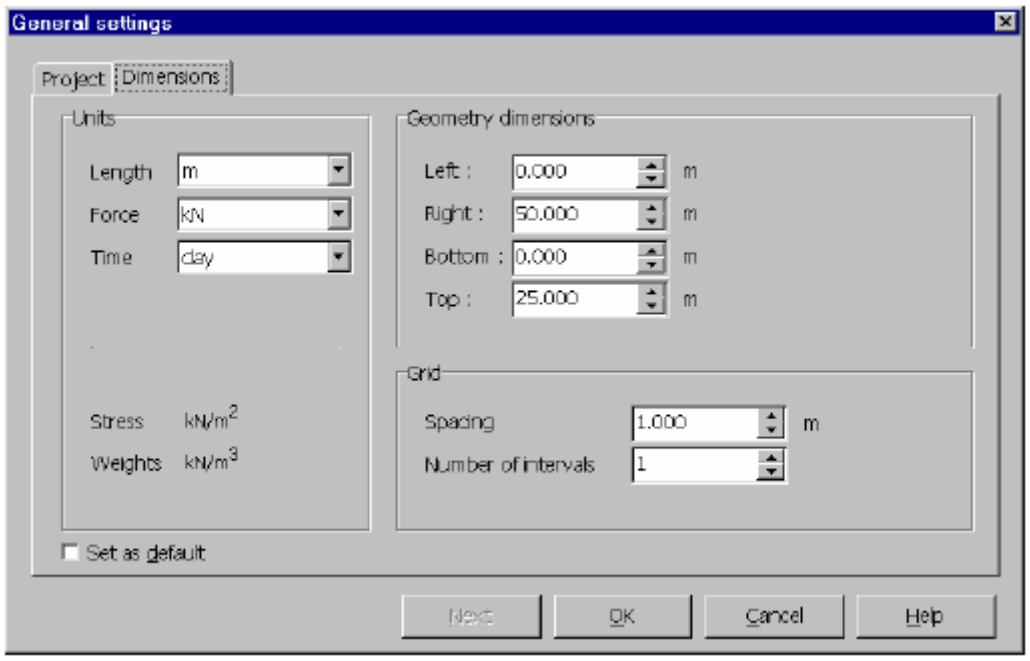


Figure III-3 : Fenêtre de réglages généraux (onglet *Dimensions)*

-Gravité et accélération

Par défaut, l'accélération de la gravité terrestre, g, est fixée à 9,8 m/s² et la direction de la gravité coïncide avec l'axe des *y* négatifs, c'est-à-dire une orientation de –90° dans le plan (x,y) par l'utilisateur. La gravité est contrôlée par le coefficient de charge total relatif au poids des matériaux, S*mweight.*

En plus de la gravité normale, l'utilisateur peut prescrire une accélération indépendante pour modéliser des efforts dynamiques dans une analyse pseudostatique.

-Les unités

Les unités de longueur, force et temps à utiliser dans l'analyse sont définies lorsque les données d'entrées sont spécifiées. Ces unités fondamentales sont à définir dans l'onglet

Dimensions de la fenêtre de réglages généraux (*General settings*).

-Les dimensions

Au démarrage d'un nouveau projet, l'utilisateur doit spécifier les dimensions de la planche à dessin de manière à ce que le modèle géométrique à créer tienne dans ces dimensions. Celles-ci sont saisies dans l'onglet *Dimensions* de la fenêtre *General settings*.

-La grille

Afin de faciliter la création de la géométrie, l'utilisateur peut définir une grille sur la planche à dessin. Cette grille peut être utilisée pour placer le pointeur dans des positions « régulières ».

La grille est définie au moyen d'un espacement (*Spacing*) et d'un nombre d'intervalles (*Number of intervals*). Les caractéristiques de la grille sont entrées dans l'onglet *Dimensions* de la fenêtre *General settings*. Le menu *View* peut permettre d'activer ou de désactiver la grille et les points d'ancrage.

b-La géométrie

La génération du modèle d'éléments finis commence par la création du modèle géométrique, qui est la représentation du problème réel à étudier. Un modèle géométrique consiste en despoints, des lignes et des couches. Les points et les lignes sont définis par l'utilisateur, alors que les couches sont générées par le programme. En plus de ces composants de base, des éléments de structure (géogrilles, interface…) et des conditions spéciales peuvent être ajoutés au modèle géométrique pour simuler l'interaction sol-structure, le soutènement des tunnels, les écrans, les plaques, ou les chargements.

1-2- Les éléments de géogrille

Les géogrilles sont des éléments élancés possédant une rigidité normale EA mais aucune rigidité de flexion, composées d'éléments (linéaires) ayant deux degrés de libertés en translation à chaque noeud (ux, uy).

Le type d'éléments pour les éléments de géogrilles est automatiquement compatible avec le type d'éléments de sol choisi. Quand des éléments de sol à 15 noeuds sont utilisés, chaque élément de géogrille est défini par cinq noeuds alors que des éléments de sol à 6 noeuds sont combinés avec des éléments de géogrilles à 3 noeuds. Les efforts axiaux sont évalués aux points

de contrainte de Newton-Cotes. Ces points de contrainte coïncident avec les noeuds. La localisation des noeuds et points de contraintes des éléments de géogrille sont indiqués sur la

Figure 4.4.

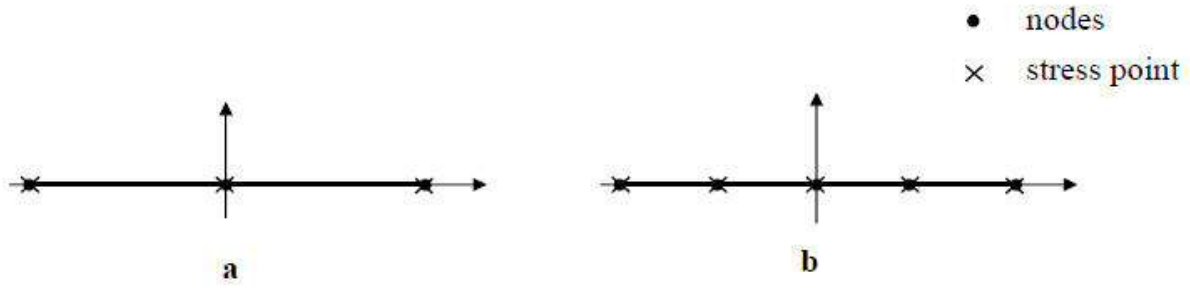


Figure III :4 Position des noeuds et des points de contrainte sur les éléments de géogrille à 3 noeuds et à 5 noeuds.

1-3- Interfaces

Ces éléments joints sont nécessaires pour les calculs impliquant l'interaction d'un ouvrage et du sol. Ils peuvent servir à modéliser la zone de matériau très fortement cisaillé sous la base des fondations, contre les pieux, les géosynthétiques ou les murs de soutènement.

Ils sont caractérisés par les valeurs de l'angle de frottement et de l'adhérence, qui ne sont pas nécessairement les mêmes que l'angle de frottement et la cohésion du sol encaissant.

a-Résistance d'interface (R_{inter})

Le critère de Coulomb est utilisé pour distinguer le comportement élastique, où de petits déplacements peuvent apparaître aux interfaces, et le comportement plastique pour lequel des glissements permanents peuvent se produire.

Pour les interfaces dont le comportement élastique, la contrainte tangentielle □ est donnée par:

$|\tau| < \sigma n \tan\varphi i + Ci$

Et pour un comportement plastique $|\tau|$ est donné par: $|\tau| < \sigma n \tan c + Ci$

Où φi et *ci* sont l'angle de frottement et la cohésion de l'interface. Les caractéristiques de résistance de l'interface sont liées aux propriétés de résistance de la couche de sol.

Chaque jeu de données inclut un facteur de réduction de la résistance pour les interfaces (*Rinter*). Les caractéristiques de l'interface sont calculées à partir des propriétés du sol associé et du facteur de réduction de la résistance, en suivant les règles suivantes:

$$c_i = R_{inter}\, c_{soil}$$

$$\tan\varphi_i = R_{inter}\, \tan\varphi_{soil} \leq \tan\varphi_{soil}$$

$$\psi_i = 0° \text{ pour } R_{inter} < 1, \text{ sinon } \psi_i = \psi_{soil}$$

En plus du critère de cisaillement de Coulomb, le critère de suppression des tractions (*tension cut-off*), s'applique aux interfaces (s'il n'est pas désactivé):

$$\sigma_n < \sigma_{t,i} = R_{inter}\, \sigma_{t,soil}$$

où $\sigma_{t,sol}$ est la résistance à la traction du sol.

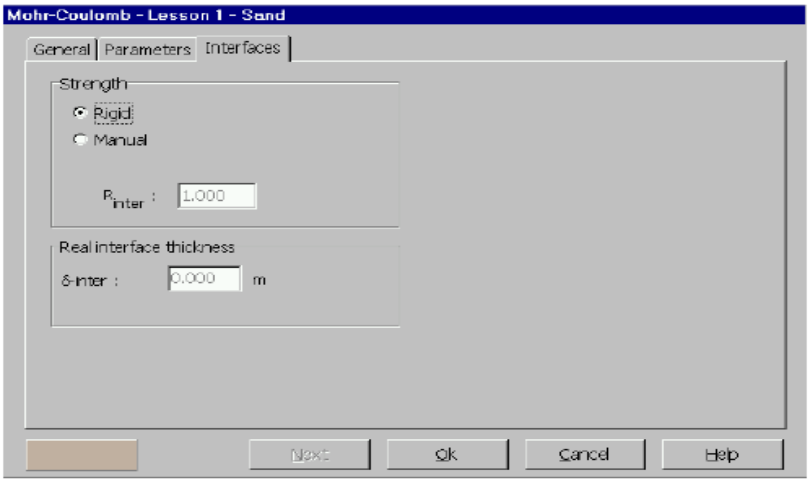


Figure III-5 : Fenêtre des propriétés des sols et les interfaces (onglet *Interfaces*)

La résistance de l'interface peut être définie grâce aux options suivantes :

b-Rigide *(Rigide):*

Cette option est utilisée pour que l'interface n'influence pas la résistance du sol avoisinant.

Par exemple, les interfaces s'étendant autour des angles d'un élément de structure ne sont pas significatives des interactions sol-structure et ne doivent donc pas subir de réduction de leurs caractéristiques. Ces interfaces doivent être déclarées *Rigide* (ce qui correspond à ***Rinter*** =

1.0). Ainsi, les propriétés de l'interface, *y* compris l'angle de dilatance ψ_i, sont identiques aux propriétés du sol **excepté** le coefficient de **Poisson ϑ_i.**

c-Manuel *(Manuel):*

Si la résistance d'interface est régie par l'option *Manual*, la valeur de *Rinter* peut être saisie manuellement. En général, pour des interactions réelles entre le sol et un élément de structure,

l'interface est plus faible et plus déformable que la **couche de sol associée**, ce qui signifie que la valeur de *Rinter* est inférieure à 1. Des valeurs représentatives de *Rinter* dans le cas d'interactions entre différents types de sols et de structures peuvent être trouvées dans la littérature.

Lorsque l'interface **est élastique**, des glissements (mouvements relatifs parallèles à l'interface) et des écartements ou rapprochements (déplacements relatifs perpendiculairement à l'interface) peuvent se produire. Les amplitudes de ces déplacements sont:

$$\text{Ecartement élastique} = \frac{\sigma t_i}{E_{oed,i}}$$

$$\text{Glissement élastique} = \frac{\tau t_i}{G_i}$$

où *Gi* est le module de cisaillement de l'interface, *Eoed,i* est le module oedométrique de l'interface et *ti* est l'épaisseur virtuelle de l'interface générée pendant la création de l'interface dans le modèle géométrique. Les modules de cisaillement et oedométrique sont reliés par l'expression suivante:

$$E_{oed,i} = 2\,G_i \frac{1-\nu_i}{1-2\nu_i}$$

$$G_i = R_{inter}{}^2 G_{soil} \leq G_{soil}$$

$$\nu_i = 0.45$$

D'après ces équations, il est clair que si les paramètres élastiques ont de **faibles valeurs**, les déplacements élastiques pourront être très **importants.** Mais si les paramètres élastiques ont des valeurs **trop importantes**, des erreurs numériques peuvent se produire.

Le facteur clé pour la rigidité est l'épaisseur virtuelle. Cette valeur est choisie **automatiquement** de manière à obtenir une rigidité **adéquate**. L'épaisseur virtuelle peut être modifiée par l'utilisateur dans la fenêtre des propriétés qui apparaît après avoir double-cliqué sur l'interface (Figure 4.5).

d-Épaisseur réelle de l'interface (Real interface thickness) *(δinter)*

L'épaisseur **réelle** de l'interface, ***(δinter)***, représente l'épaisseur réelle de la zone de cisaillement entre une structure et le sol. La valeur de ***δinter*** **n'est importante que** dans le cas du modèle de sol avec **écrouissage**.

Notez que des interfaces peuvent être placées des deux côtés d'une ligne géométrique. Cela permet une interaction totale entre les éléments de structure (écrans, plaques, géogrilles, etc...) et le sol avoisinant. Pour distinguer les deux interfaces possibles de part et d'autre d'une ligne géométrique, celles-ci sont identifiées par un signe (+) ou un signe (-).

e- Le programme de calcul (Calculations)

Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.

f- Le programme de résultats (Output)

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.

g- Le programme courbe (Curves)

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

1-4- Conclusion

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans PLAXIS n'est pas différente d'un choix de paramètres de calcul manuel pour un calcul de tassement ou de stabilité : à partir d'essais, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain. Certains de ces paramètres sont différents dans leurs expression, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le paramètre le moins courant est l'angle de dilatance.

Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé: fondation sur sol, soutènement, tassement de remblai, tunnel : quel modèle de comportement utiliser pour quel problème géotechnique ?

I-2-Modélisation de plateforme routière renforcée et non renforcée

2-1- Introduction

Une application typique des géosynthétiques et qui s'intéresse le sujet de cette partie est le renforcement des chaussées non revêtues reposant sur une plateforme de faible portance pour l'améliorer. Pour cela on va utiliser le code de calcul Plaxis, pour, modéliser numériquement le comportement de la plateforme de chaussée renforcée ou non par géogrille. En réalité l'impact de la roue, qui a des dimensions limitées, s'effectue que le problème est à trois dimensions, mais

la déformation de la route se fait selon une ornière longitudinale ce qui permet de faire l'analyse en déformation plane.

L'étude numérique a pour objectif d'analyser les mécanismes de renforcement agissant sur un système bicouche avec et sans renforcement. Elle est portée sur l'analyse de:

-Contraintes tangentielles agissant sur l'interface corps de chaussée–sol ;

-Contraintes normales agissant sur l'interface corps de chaussée–sol ;

-Tension au renforcement.

En suite une étude paramétrique qui permet d'étudier l'influence des paramètres essentiels qui sont, l'épaisseur et l'angle de frottement de couche d'assisse, la profondeur de la position, la rigidité et la longuer d'ancrage et de la geogrille et la cohésion du sol sur les éfforts suivants:

a- la contrainte normale à l'interface;

b- la contrainte tangentielle à l'interface;

c- sur la tension de renforcement.

L'ensemble des résultats des simulations entreprises dans cette étude sont présentées sous forme de graphiques, tableaux et courbes explicites et sont largement discutés. Le présent chapitre sera couronné par une conclusion synthétique qui viendra y rappeler les résultats les plus importants.

2-2- Présentation du modèle étudié

La chaussée étudiée est une chaussée non revêtue qui peut accepter des déformations sous forme d'ornières. La chaussée se présente comme une bicouche composée d'un corps de chaussée, en matériau sélectionné, et une plateforme d'un sol de faible portance.

L'étude consiste à analyser le comportement d'une chaussée sous l'effet d'une charge unique statique. L'analyse du comportement d'une chaussée qui peut être renforcée ou non par géogrilles, se présente comme étant un problème, de déformation plane, et de la détermination de la capacité portante d'une fondation superficielle continue reposant sur une bicouche. Le problème sera formulé en grande plus qu'en petite déformation pour représenter les grandes profondeurs d'ornière qui peuvent se développer, et sont admissibles, sur les routes non revêtues. Dans notre présent cas la bicouche est constituée de :

- Couches d'assisse composées de deux sous-couches de base et de fondation en grave propre ayant un comportement élastique parfaitement plastique de Mohr Coulomb avec frottement et une règle d'écoulement non associative ;

-Un sol de fondation ayant un comportement élastique parfaitement plastique de Mohr Coulomb sans frottement ;

-Une géogrille de renforcement interposée entre la plateforme et la couche de fondation. Et elle est modélisée comme une structure élastique.

Le contact pneu-chaussée est supposé parfaitement rugueux. Le contact sol-géogrille et fondation-géogrille sont régis par une interface ayant un comportement élastique parfaitement plastique de Mohr Coulomb.

II- Calculs :

Dans ce chapitre on montre le choix de deux cas de variantes à étudier

- Un cas de renforcement avec géotextile
- Un cas de renforcement avec geogrille.

La modélisation a été effectué avec PLAXIS un programme d'analyse avec éléments finis.

A- VARIANTE 1 : RENFORCEMENT AVEC GEOTEXTILE

Le modèle à étudier est schématisé comme suit :

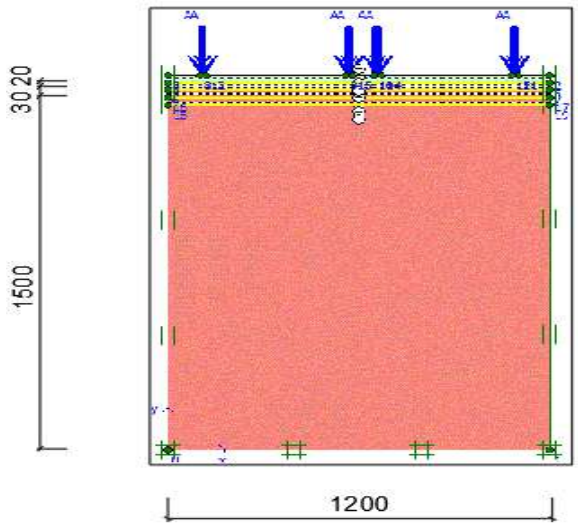


Figure III-6 : Cas d'étude avec géotextile

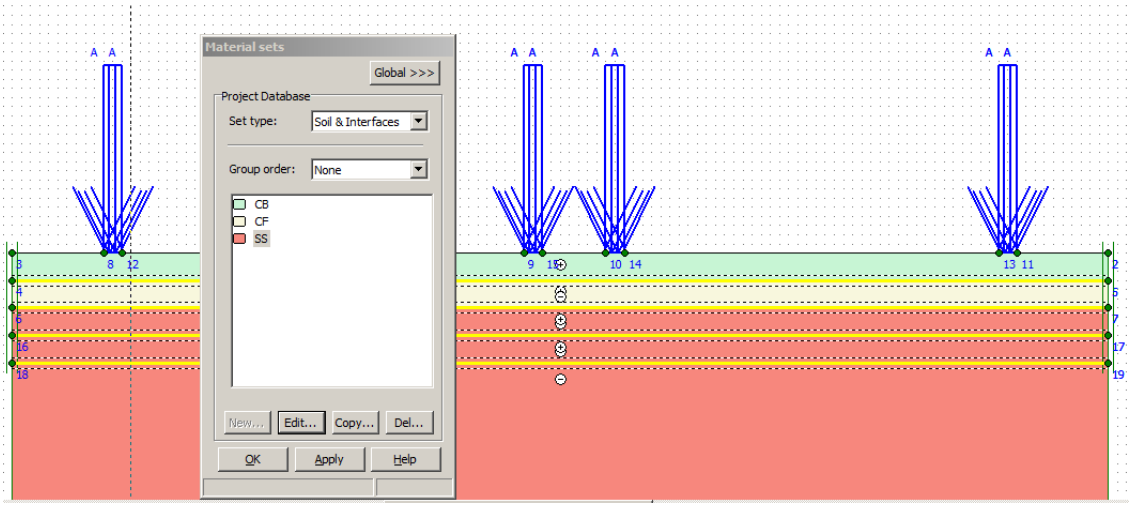


Figure III-7 : Cas d'étude avec géotextile

Tableau III-1 : MATERIAUX MOHR COULOMB

MATERIAU	E (MPa)	Poids Volumique (KN/m3)	Coefficient poisson	Cohésion (KN/m2)	Phi
CB	300	24,00	0.35	40	30
CF	200	24,70	0,38	20	43
SS	10	16,00	0,40	2	29

MATERIAU : GEOTEXTILE EA = 500 KN/ml

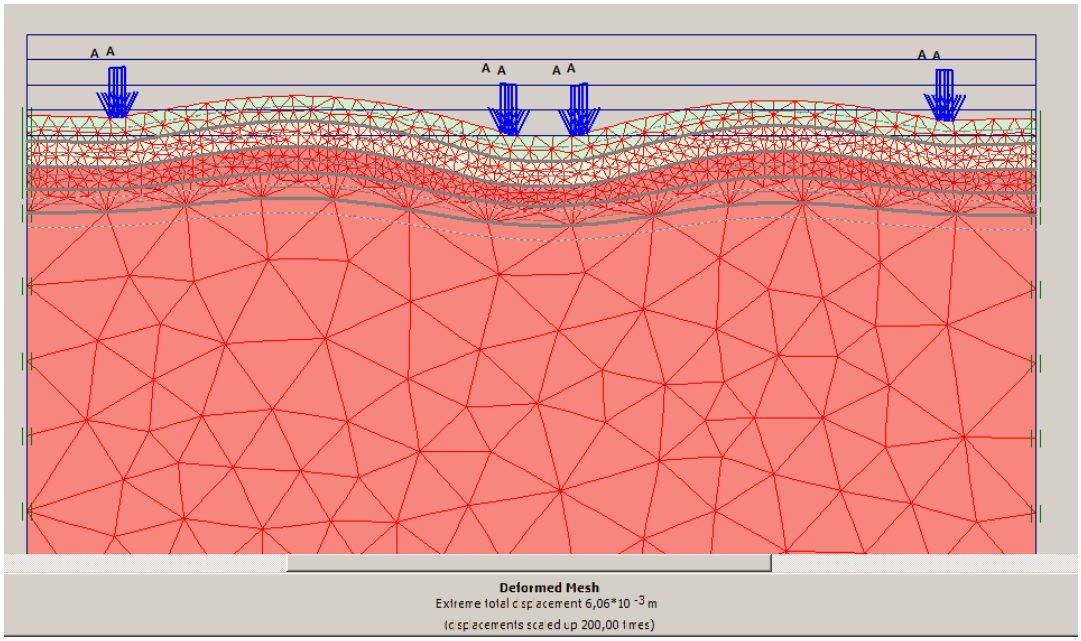


Figure III-8 : DEFORMATION SANS RENFORCEMENT

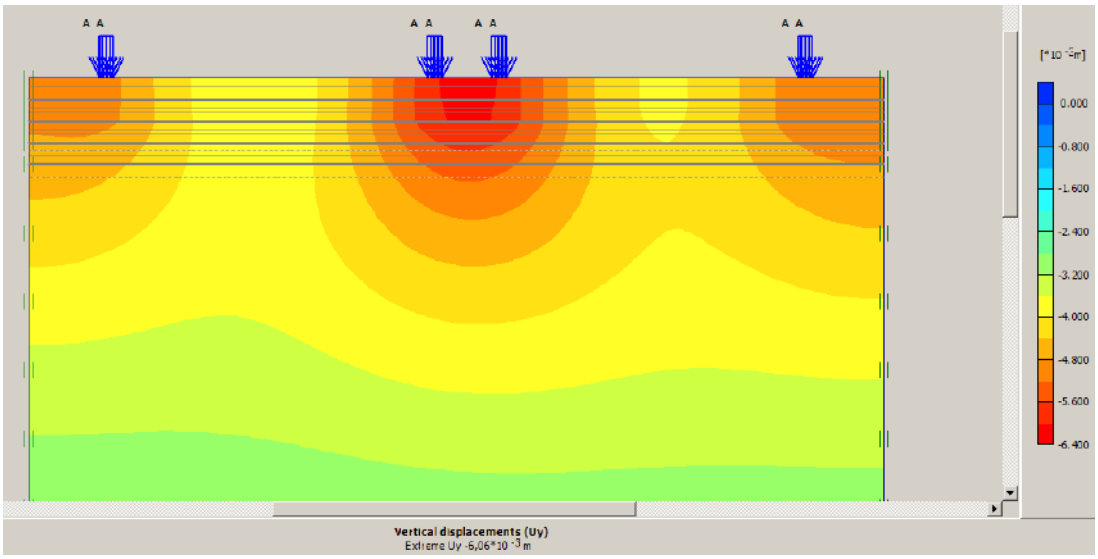


Figure III-9 : TASSEMENT MAX SANS RENFORCEMENT 6.06 mm

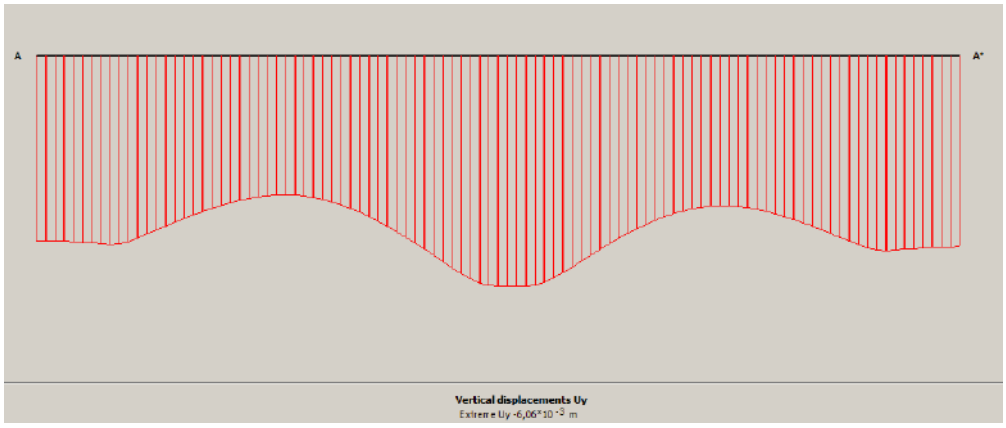


Figure III-10: TASSEMENT SOUS COUCHE BASE

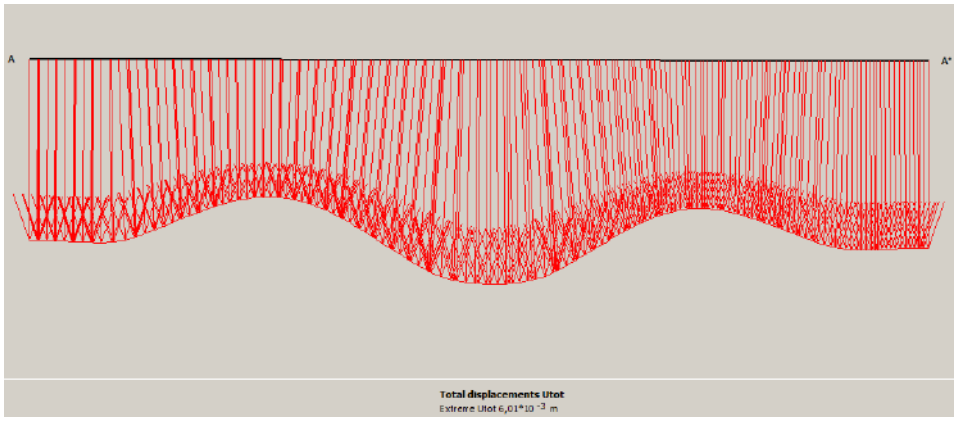


Figure III-11 : TASSEMENT SOUS COUCHE FONDATION

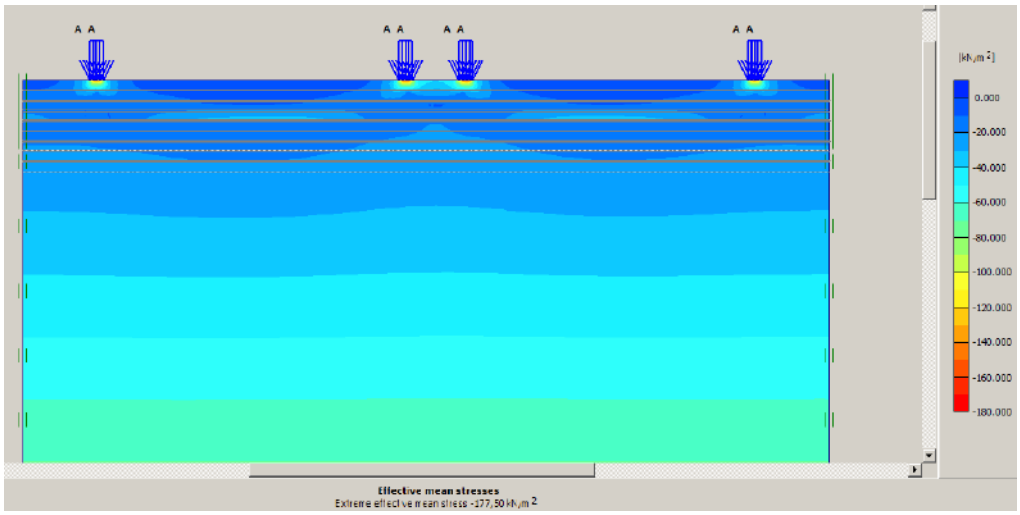


Figure III-12: CONTRAINTES EFFECTIVES MOYENNE 160 KN/m2 sous les charges

A-1 -CAS D'UNE NAPPE SOUS LA COUCHE DE BASE :

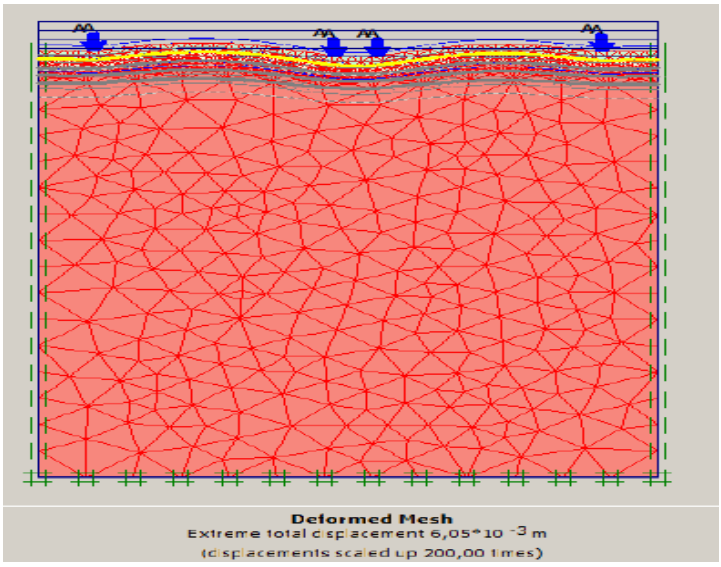


Figure III-13 : DEFORMATION AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE BASE

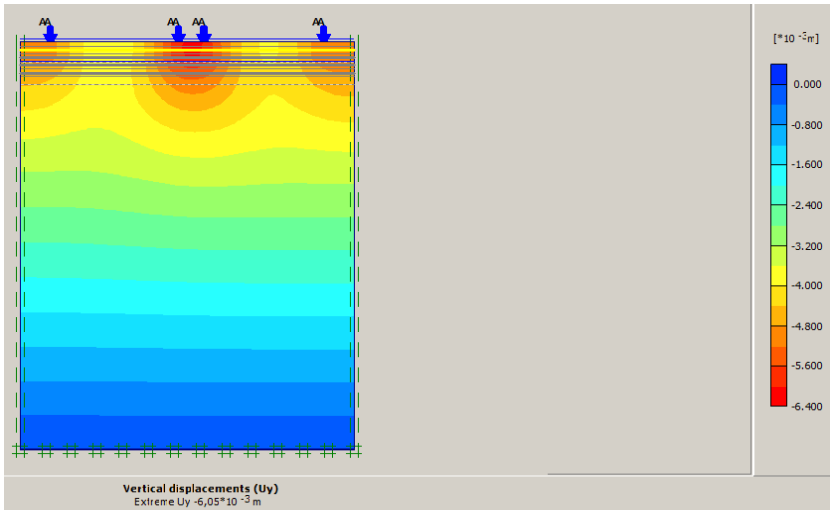


Figure III-14 : TASSEMENT MAX AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE BASE : 6.05mm

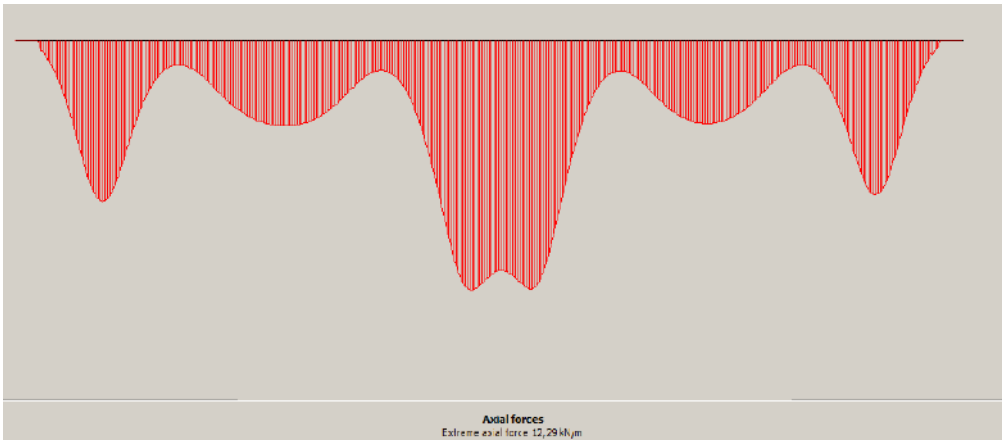


Figure III-15 : EFFORT AXIAL DANS GEOTEXTILE 12.29 KN/ml

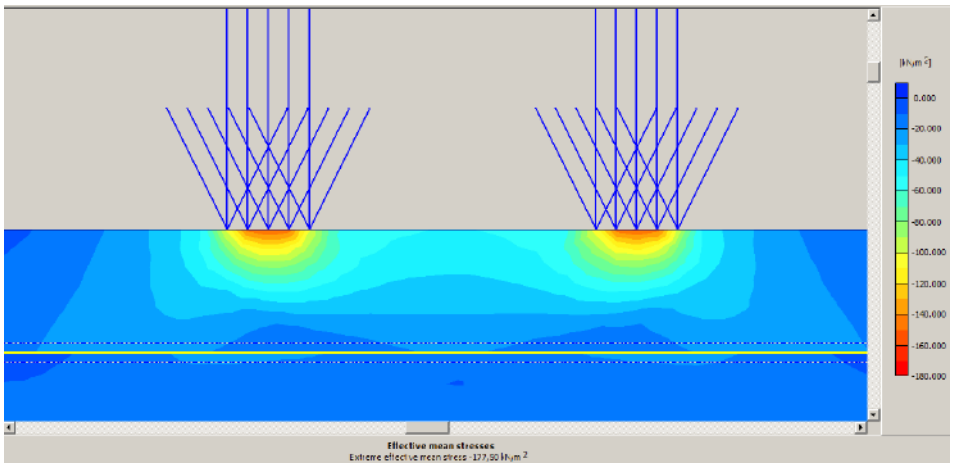


Figure III-16 : CONTRAINTES EFFECTIVE SOUS CHARGES 177 KN/m2

A-2 -CAS D'UNE NAPPE SOUS LA COUCHE DE FONDATION :

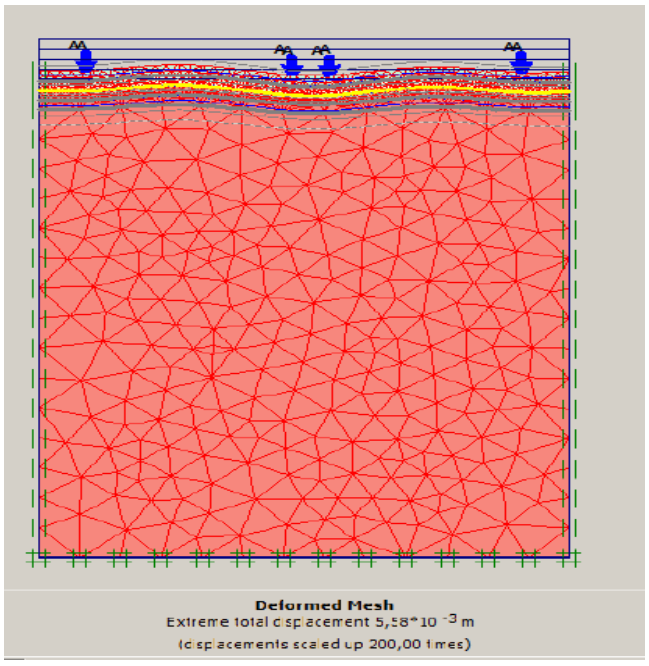


Figure III-17 : DEFORMATION AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE FONDATION :

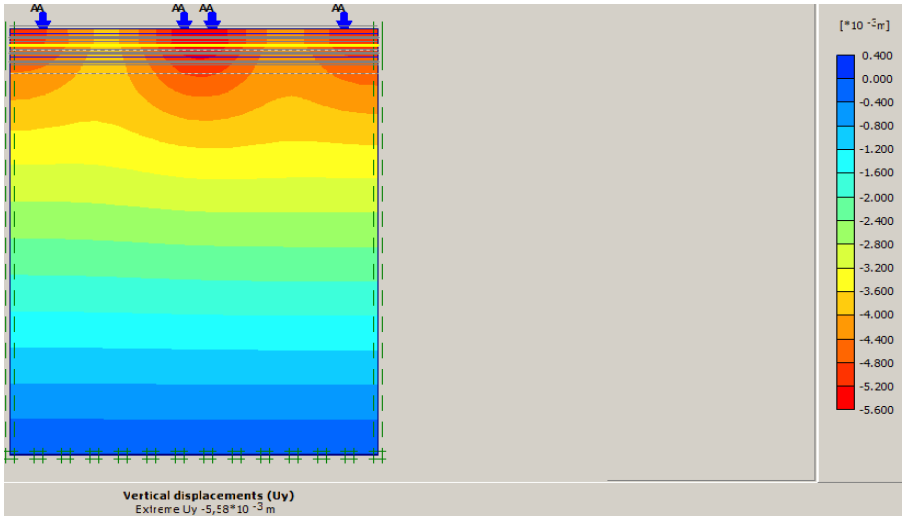


Figure III-18 : TASSEMENT MAX AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE FONDATION : 5.58 mm

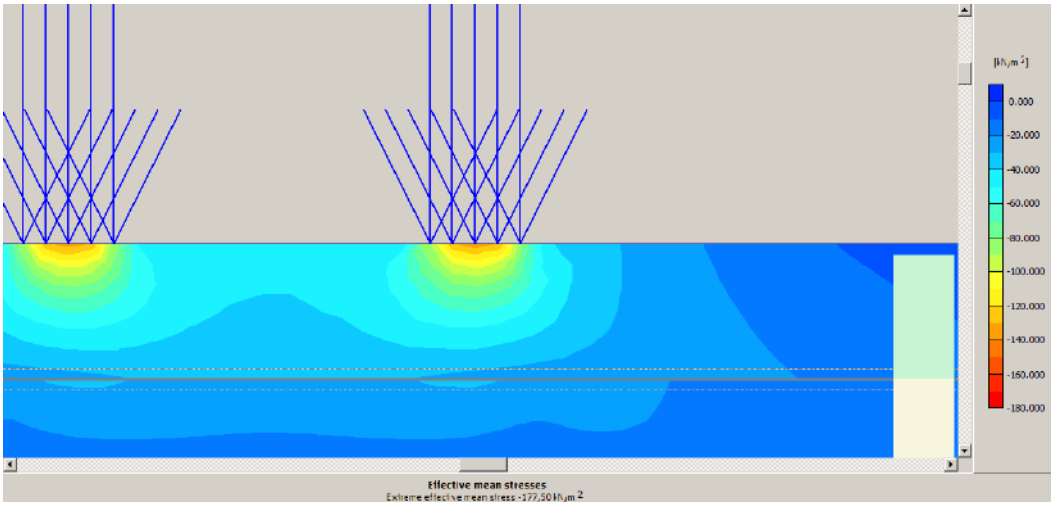


Figure III-19 : CONTRAINTE EFFECTIVE SOUS LES CHARGES : 120 N/m2

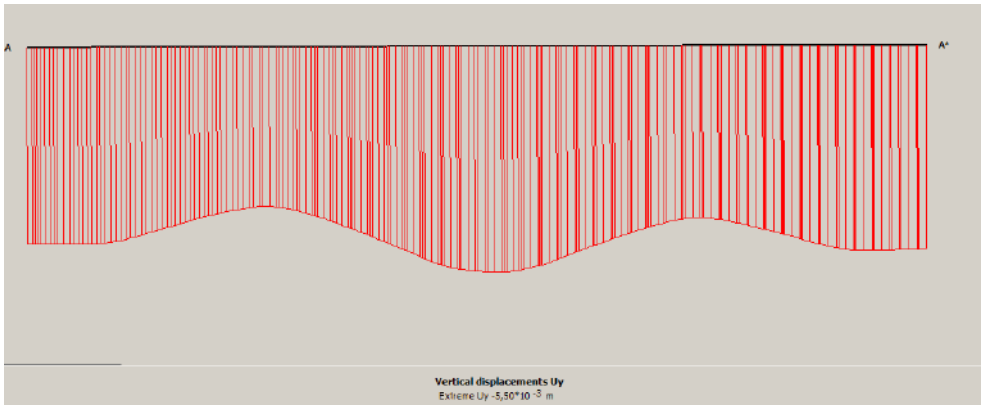


Figure III-20: TASSEMENT AVEC 1 NAPPE SOUS COUCHE FONDATION : 5.58 mm

Au niveau du géotextile

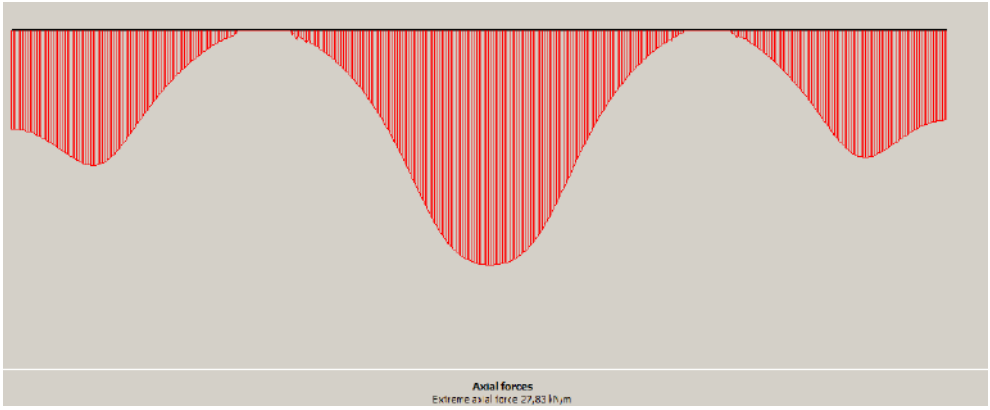


Figure III-21 : EFFORT AXIAL MAX DANS LE GEOTEXTILE 27.83 KN/ml

A-3 -CAS DE DEUX NAPPES DANS LE SOL SUPPORT :

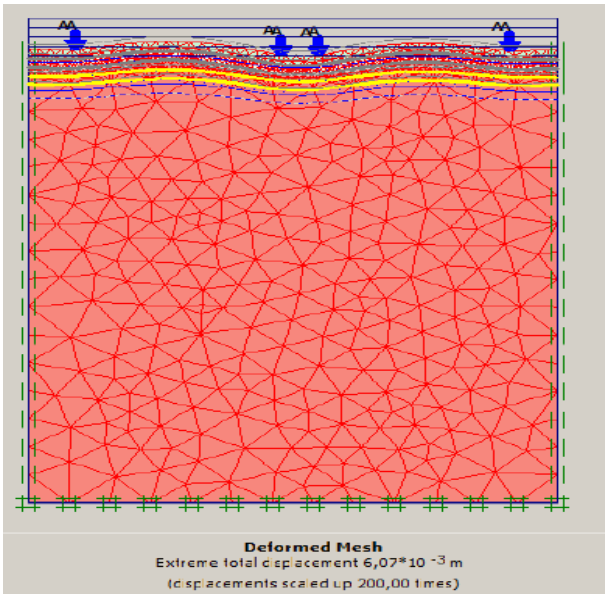


Figure III-22 : DEFORMATION AVEC 2 NAPPES DANS SOL SUPPORT

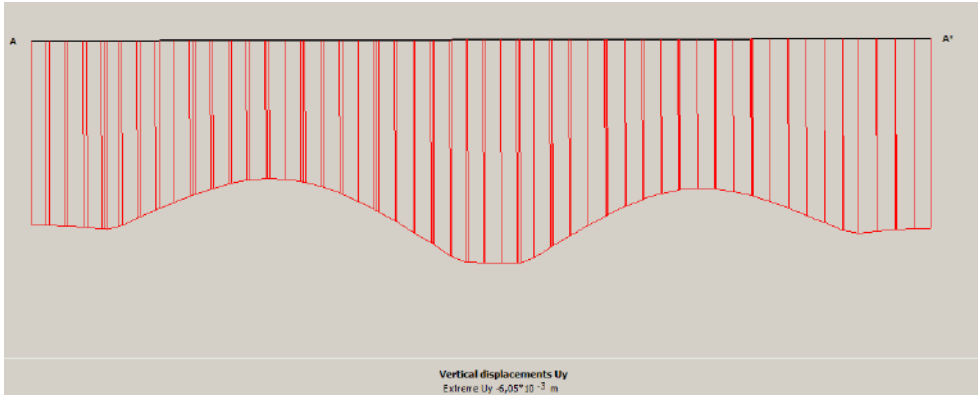


Figure III-23 : TASSEMENT SOL A LA SURFACE 6.05 mm

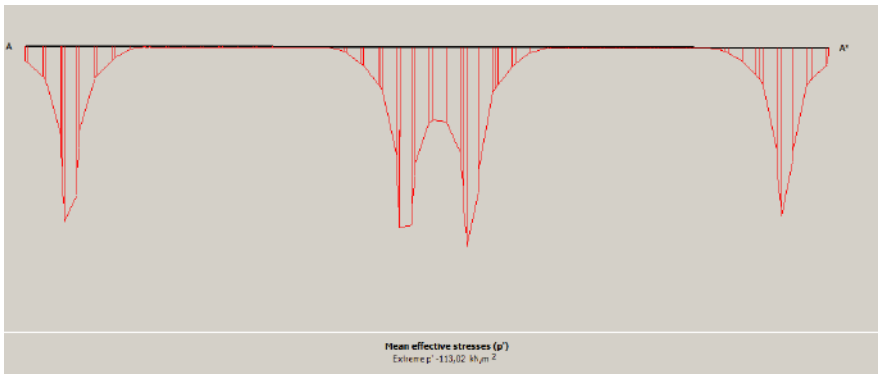


Figure III-24 : CONTRAINTE EFFECTIVE SOUS CHARGES 120KN/m2

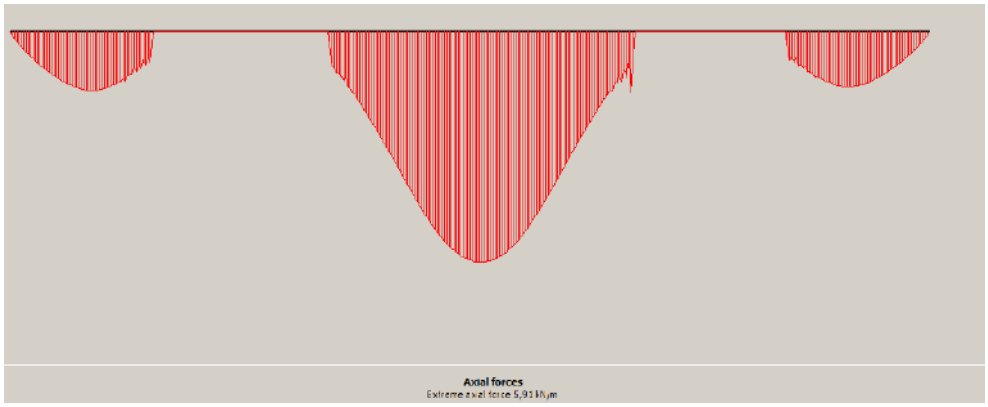


Figure III-25 : EFFORT DE TRACTION DANS 1ere nappe GEOTEXTILE 5.91 KN/ml

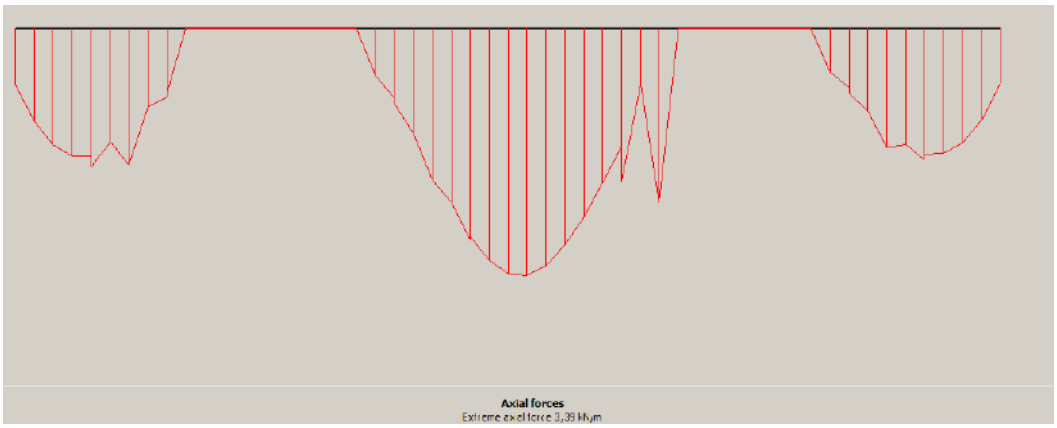


Figure III-26 : EFFORT DE TRACTION DANS 2eme nappe GEOTEXTILE 3.39 KN/ml

COMMENTAIRES :

On remarque que la position du géotextile sous la couche de FONDATION donne un résultats meilleur que sous la couche de base ou dans la couche support.

Le cas non renforce donne un tassement de 6.06 mm

On notera que le tassement est de 6.07 mm lorsque la nappe de géotextile se trouve sous la couche de base et il est de 5.85 mm lorsque la couche de base se trouve sous la couche de fondation.

De plus le nombre de nappes dans la couche support n'améliore pas le tassement.

LES CONTRAINTES EFFECTIVES DANS LE SOL **:**

Les contraintes effectives totales dans le sol sous les charges sont

160 KN/m2 cas sans renforcement

177 KN/m2 cas d'une nappe sous couche de base

120 KN/m2 cas d'une nappe sous couche fondations

177.50 KN/m2 dans couche support.

On voit bien que les contraintes effectives dans le sol se trouvent réduites dans le cas du renforcement avec une nappe de géotextile sous la couche de fondation.

EFFORTS DE TRACTION DANS LE GEOTEXTILE :

La position du géotextile en profondeur affecte son rendement :

- Nappe sous couche de base : 12.29 KN/ml
- Nappe sous couche de fondation : 27.83 KN/ml
- Nappes dans sol support :
  - Nappe 1 5.91 KN/ml
  - Nappe 2 3.39 KN/ml

Le géotextile travaille bien lorsqu'il est place sous la couche de fondation

B- AVEC VARIANTE 2 : RENFORCEMENT GEOCELL

On a procédé à la modélisation de la couche de geogrille comme un sol élastique d'une épaisseur de 20 cm.

1er cas : la couche et place juste sous la couche de fondation

2eme cas : la couche est placée à 20 cm sous la couche de fondation

B-1 - 1er CAS

La déformation du sol est représentée comme suit

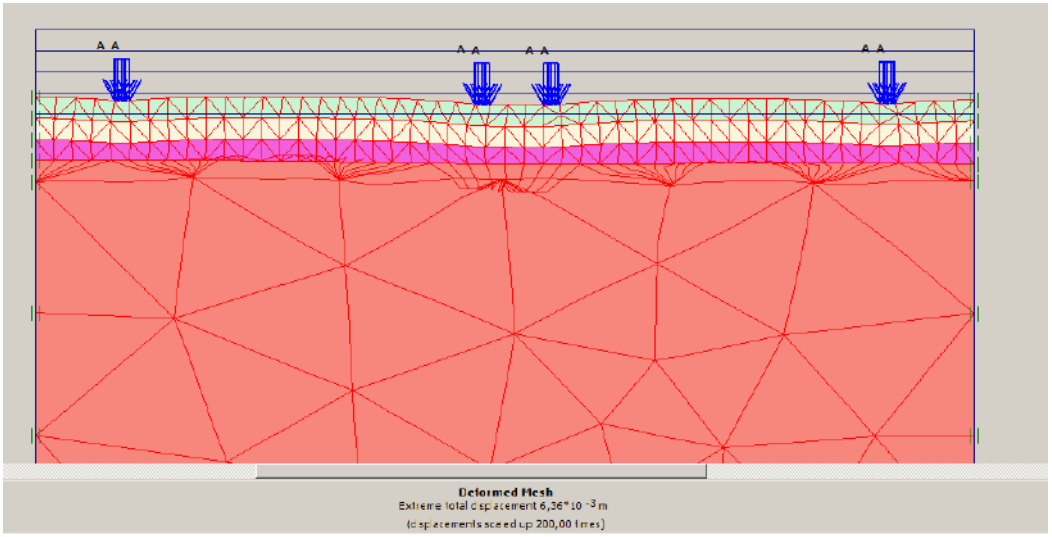


Figure III-27 : DEFORMATION 6.35 mm

Le tassement maximal est :

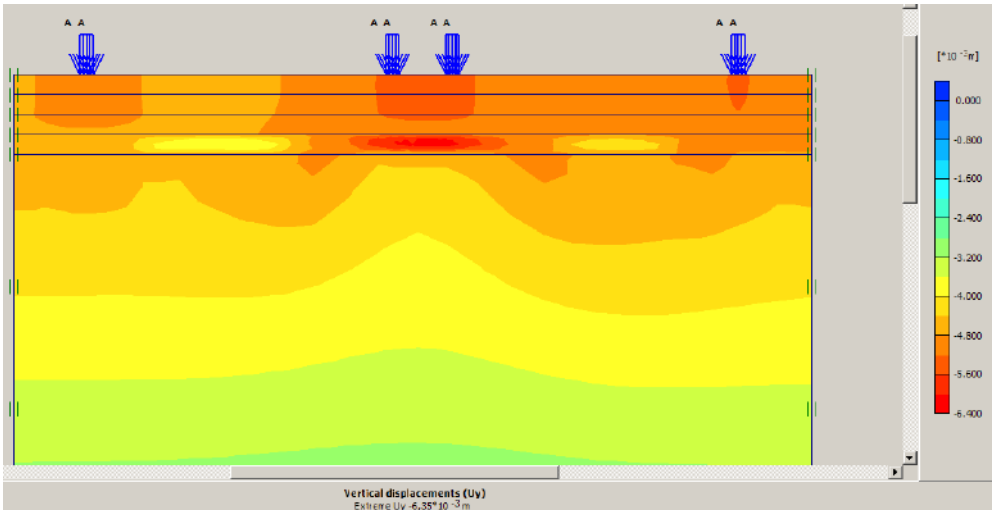


Figure III-28 : TASSEMENT 6.35 mm

La contrainte effective dans le sol

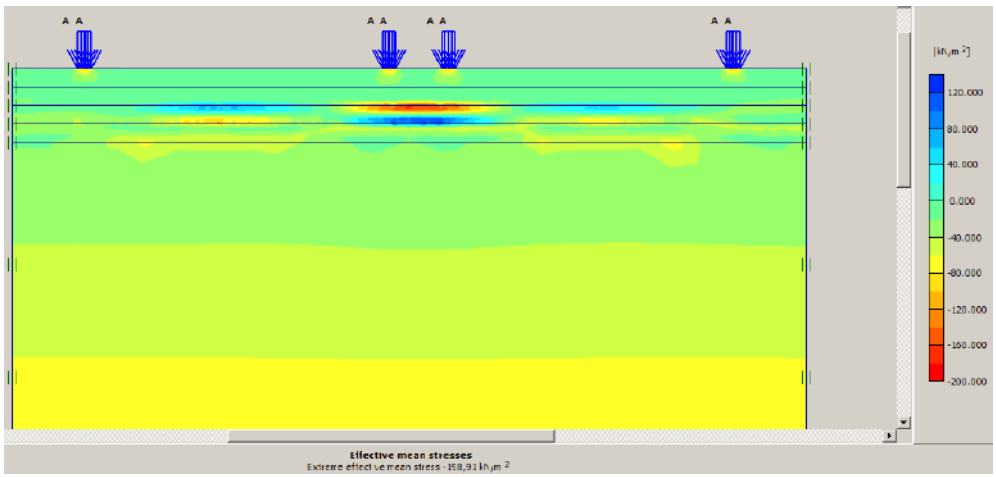


Figure III-29 : CONTRAINTES EFFECTIVE

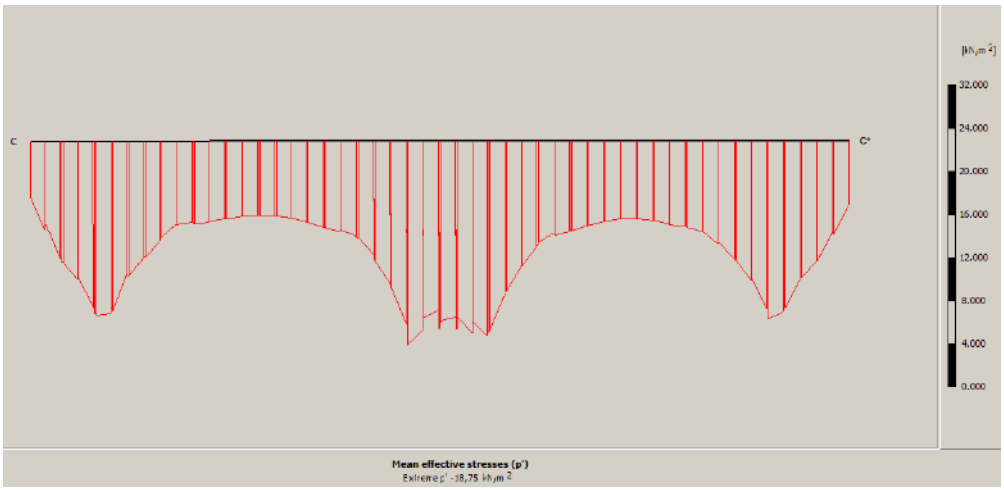


Figure III-30 : CONTRAINTES EFFECTIVE DANS LA COUCHE DE BASE COUPE

B-2 - 2eme cas :

La ouche de GEOCELL se trouve a 20 cm sous la couche de fondation

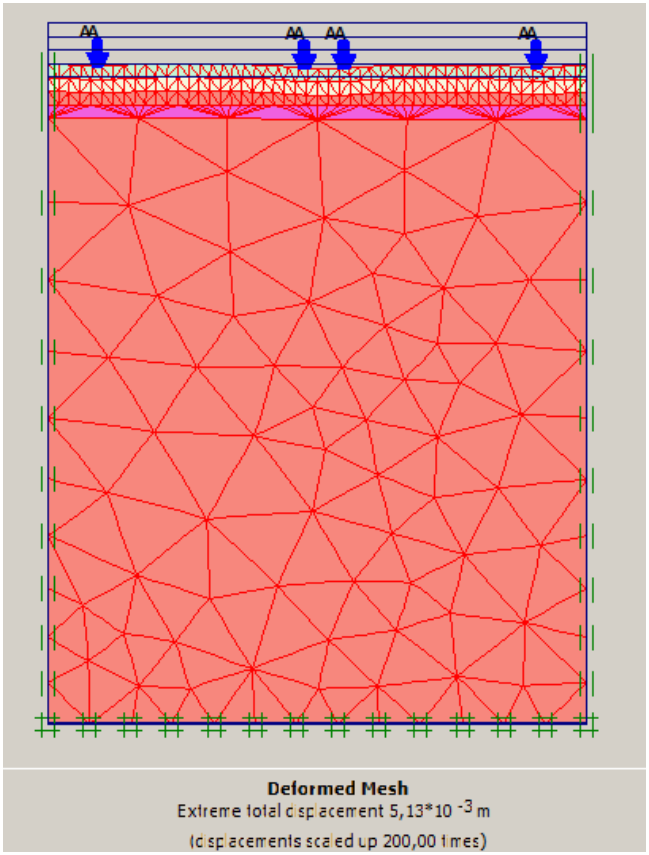


Figure III-31 : DEFORMATION 5.13 mm

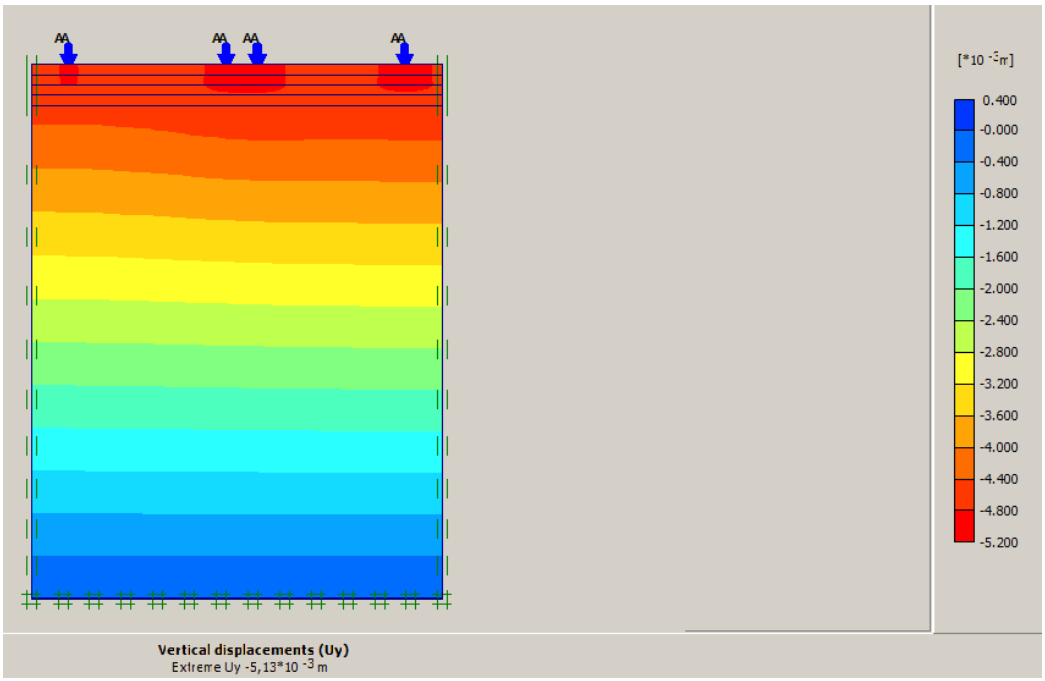


Figure III-32 : TASSEMENT 5.13 mm

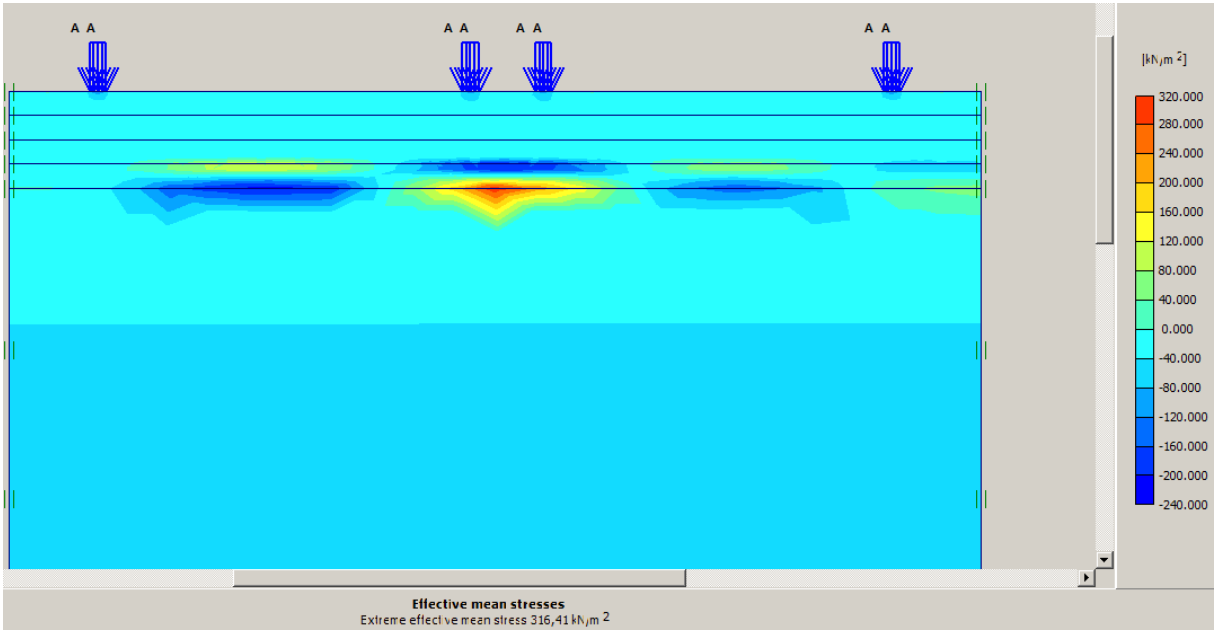


Figure III-33 : CONTRAINTES EFFECTIVES MAX

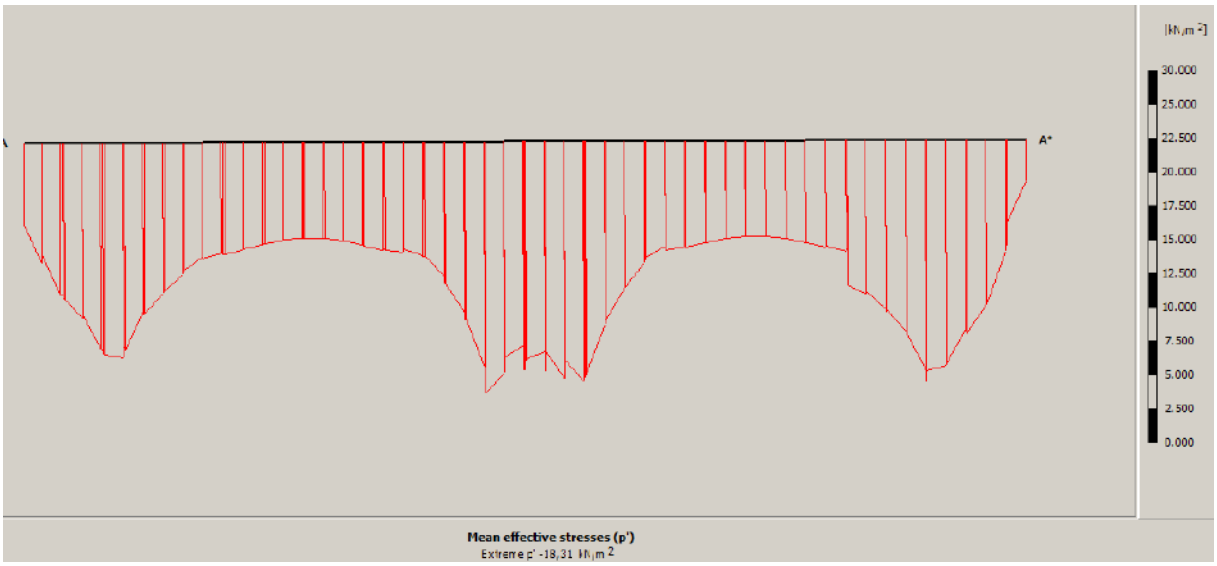


Figure III-34 : CONTAINTES EFFECTIVES DANS COUCHE DE BASE 18.21 KN/ml (COUPE HORIZONTALE)

L'INCLUSION DU GEOCELL DANS LA COUCHE A UNE PROFFONDEU DE 20 cm SOUS LA COUCHE DE FONDATION DONNE UN RESULTAT MEILLEUR.

III-CONCLUSION GENERALE :

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus on peut tirer les conclusions suivantes : Les principaux résultats sont résumés comme suit :

- Les tassements du sol avec geocell sont inférieurs à ceux obtenues avec géotextile.
- Les geocell semblent repartir les contraintes dans le sol de manières uniformes.
- Les contraintes sous les charges sont inférieures à celles obtenues avec géotextiles, donc en résume l'utilisation du geocell de manière correcte semblent la solution plus efficace que les géotextiles

Références bibliographiques :

1. Etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux renforcé par les fibres de verre 2019
2. ETUDE DE RENFORCEMENT PARGEOGRILLES D'UNE PLATE FORME ROUTIERE 2015
3. Les fissures des chaussées souples CAS DE LA rn3 ET LES AERODROMES DE DJANET ET DE OUARGLA (Types, causes et méthodes de réparations) 2016
4. Géosynthétique pour la construction de routes et chaussées 2016
5. Modernisation de la route nationale RN46 avec valorisation du sable de dune dans le grave-ciment comme couche de fondation.2016
6. Etude de modernisation et de renforcement de la RN46 sur 15 km (PK 00+000 au PK 15+000)
7. Géosynthétiques pour la construction de routes et chaussées « Amélioration de la couche de forme »2016.
8. UTILISATION DES GEOSYNTHETIQUES EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE 2016
9. Etude de renforcement par geogrilles d'une plateforme routière 2015
10. ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES REMBLAIS RENFORCÉS PAR DES GÉOSYNTHÉTIQUES SUR SOLS MARÉCAGEUX 2015
11. ″Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques″. Fascicule n°= 12. CFG, 1998
12. ″Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets″. Fascicule n°=11. CFG, 1995.
13. ″Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets″. CFG, Mai 2011
14. ″Recommandation pour les géosynthetiques fonctions et domaines d'applications″.
15. ″Généralités sur les géosynthétiques ″. L'intelligence des sols ″AFITEX″.
16. ″L'emploi des géosynthétiques en géotechnique routière″. L'intelligence des sols ″AFITEX″.
17. International Geosynthetics Society ″igs″
18. ″Les applications des géosynthétiques en agriculture″. Rédigé par R. Fröbel Traduit par H.Girard. International Geosynthetics Society ″igs″
19. ″Fonctions des géosynthétiques″. Préparé par Richard J. Bathurst Traduit par François Caquel. International Geosynthetics Society ″igs″.
20. ″Les Géosynthétiques dans les ouvrages hydrauliques″. Préparé par J. Zornberg and M. Bouazza Traduit par H. Girard. International Geosynthetics Society ″igs″
21. ″Les géosynthétiques dans les ouvrages de soutènement″. Préparé par R.J. Bathurst Traduit par J.P. Gourc. International Geosynthetics Society ″igs″
22. ″Géosynthétiques dans les routes non revêtues″. Préparé par E.M. Palmeira Traduit par M.J.A. Mendes. International Geosynthetics Society ″igs″
23. Site internet du Comité Français des Géosynthétiques. ″CFG ″ *www.cfg.com* Maxime Soudé 2011.
24. "Etude du comportement dynamique d'un massif en sol renforce par géotextile alvéolaire M3S ". Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont II.
25. Racana Nicolas. 2002. "Etude du comportement mécanique d'un massif de sol renforcé par géotextile cellulaire". Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II.

26. Reiffsteck Philippe. 1996. "Etude du comportement mécanique du géotextile tridimensionnel alvéolaire ARMATER – Analyse numérique et expérimentale". Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont II.
27. Philippe Reiffsteck 2003. "Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion". LCPC.
28. "Détection de fuites dans les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques". Juin2003.
29. "Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre". CFG, 1990.
30. "Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembrane". Fasciculen°=10. CFG, 1991.