

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2018

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

**Modélisation numérique et renforcement de la route RN16
Ain Synour Souk-Ahras du PK 02+050**

Domaine : Sciences et Technique

Spécialité :

GENIE CIVIL

OPTION

GEOTECHNIQUE

Par

Noms, Prénoms des Etudiants (es)

1/Meraouna Rym

2/Medar Narimen

3/ Bouzaher Fadia

DIRECTEUR DU MEMOIRE : BOUKHATEM GHANIA.,MC B, GENIE CIVIL, U B M ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :

EXAMINATEURS :

Remerciements

Nous remercions le bon DIEU de nous avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nos remerciements vont particulièrement à nos parents pour leurs soutiens et leurs encouragements.

*Nous tenons à remercier notre promotrice **Mme. Boukhatem** pour son incroyable dévotion à parfaire notre travail et à nous aider par ses orientations et ses précieux conseils pour l'élaboration de cette étude.*

*Nos remerciements également à l'ensemble du corps enseignants de l'université **BADJI MOKHTAR** en générale et plus particulièrement à ceux du département de **génie civil** pour avoir contribué à notre formation.*

Nous adressons nos remerciements à notre pays hôte l'Algérie ainsi qu'à tous les collègues de notre promotion qui nous ont accompagnés depuis 2013.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont conseillées, qui se sont simplement intéressées à ce travail, et aussi celles qui, nous l'espérons me pardonneront de les avoir oubliées.

DÉDICACE

À chaque étape importante d'achever de notre vie, il convient de faire une pause pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes avec lesquelles nous avons passé tous ces bons moments de notre parcours, mais aussi les mauvais. Ces personnes qui nous ont aidées sans jamais rien attendre au retour, soutenues sans réserve, aimées sans compter, ces personnes pour qui notre bonheur, notre réussite comptaient énormément, pour qui un malheur en nous, en eux se transforme en pleur.

« Louange à dieu, le seul et unique »

À nos très chers parents.....

Témoignage d'affection et de grande reconnaissance,

Que Dieu les garde pour nous

À toute nos familles,

Nos très chers frères et sœurs,

Nos Oncles et Tantes

À tous ceux que nous aimons

À tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

À notre pays,

Avec l'expression de tous nos sentiments de respect,

Nous dédions ce modeste travail qui est l'accomplissement de longues années d'études.

III

ملخص

تعتبر ظاهرة انزلاق التربة خطر طبيعي دائم والذي نصادفها في جميع بلدان العالم وهذا نظرا للنتائج المتسبب فيها من خسائر بشرية ومادية تقدر بملايين الدولارات لذا يجب على الحكومات أخذ كل الحذر. كما يجب الأخذ بعين الاعتبار هذه الظاهرة ومخاطرها وأخذ الاحتياطات اللازمة والتنقيب على المناطق المعرضة للانزلاقات من أجل إيجاد أحسن الحلول للحماية والعلاج. في شمال شرق الجزائر يعد انزلاق التربة من بين الأخطار الطبيعية الأكثر انتشارا وهذا نظرا للطبيعة الحساسة لطبقة التربة وأعمال البناء والطرق التي تغير شبكة الجريان والأخطر من ذلك لوحظ ظاهرة تضايق متكررة في الطرق وخاصة في الفترة الشتوية وخصوصا في كل من الولايات بجاية جيجل سكيكدة ميله قسنطينة وسوق أهراس والتي تعتبر كمنحدرات غير مستقرة تدل على حركة أرضية تسببت فيها انزلاق التربة بعد تحديد وتصنيف الانزلاق تمكنا من جهة التعرف على عوامل حركة التربة ومن جهة أخرى اختيار الطريقة الملائمة لتحقيق الاستقرار.

Résumé

Le phénomène de glissement de terrain est considéré comme dangers naturel permanents rencontrés dans tous les pays du monde car l'importance des effets de glissement pouvant engendrer des dégâts humains et matériels pouvant se chiffrer en plusieurs millions de Dollars dont les gouvernements doivent prêter beaucoup d'attention. Pour cela, il faut compte tenu de ces phénomènes et de leurs dangers, et de prendre les précautions convenable pour détecter les zones instables afin de trouver les meilleurs solutions de protections ou de traitements. Au Nord-est de l'Algérie, les glissements de terrain comptent parmi les risques naturels les plus fréquents favorisés par la nature sensible de la couche pédologique et les travaux de construction de route modifiant le réseau de ruissellement et d'infiltration. Plus grave, il a été constaté un phénomène récurrent et dérangeant en matière de circulation sur les routes existantes en période hivernale particulièrement dans les wilayas: Béjaia, Jijel, Skikda, Mila, Constantine et Souk Ahras. Des routes traversent des versants des formations géologiques réputées pour leurs versants fréquemment instables. Il s'agit de mouvement de terrains causant des glissements, des éboulements ou stabilité précaire. Le présent sujet, après identification et classification des glissements inventoriés vise d'une part à identifier les facteurs favorisant les mouvements de terrain et d'autre part le choix des approches adéquates de vérification de la stabilité.

Mots clés : *glissement –solution – éboulement.*

Abstract

The phenomenon of landslides is considered permanent natural hazards encountered in every country of the world because Significant slip can cause human and material damages may cost millions of dollars so, that governments must pay attention to them. Much can be given to these phenomena and their dangers; therefore, it needs to take proper precautions to detect unstable areas to find out the best solutions for protection or treatment. In north-east of Algeria, landslides are among the most frequent natural hazards caused by the sensitive nature of the soil layer and the construction of road network amending runoff and infiltration. More importantly, it is found that there is a recurring and disturbing phenomenon concerning the traffic on existing roads in winter especially in the provinces: Bejaia, Jijel, Skikda, Mila, Constantine and Souk Ahras. Roads across the slopes of the geological formations known for their unstable slopes. These slopes land movement causing landslides, landslides or precarious stability. This subject, after identification and classification of landslides inventoried aims firstly to identify predisposing factors of landslides and secondly the choice of appropriate approaches for checking stability.

Keywords: *landslide – solution*

LISTE DES SYMBOLES

VII

F_s	<i>Coefficient de sécurité</i>	[-]
T	<i>Contrainte de cisaillement</i>	[KN / m ²]
H	<i>Hauteur réelle</i>	[m]
N	<i>Force normale effective</i>	[KN / m ²]
T	<i>Force de cisaillement intertranche</i>	[KN]
U	<i>Sous-pression de l'eau interstitielles</i>	[KN / m ²]
C	<i>Cohésion</i>	[KN / m ²]
w	<i>Poids</i>	[KN]
w	<i>Poids du bloc de sol</i>	[KN]
E	<i>Module de young</i>	[KN / m ²]
ν	<i>Coefficient de poisson</i>	[-]
G	<i>Module de cisaillement</i>	[KN / m ²]
K	<i>Module de compressibilité</i>	[KN / m ²]
E_{oed}	<i>Module oedométrique</i>	[KN / m ²]
φ	<i>L'angle de frottement</i>	[°]
ψ	<i>L'angle de dilatance</i>	[°]
E_0	<i>Pente initiale</i>	[KN / m ²]
E_{50}	<i>Module sécant à 50% de la résistance à la compression</i>	[KN / m ²]
γ_{sat}	<i>Poids volumique humide</i>	[KN / m ³]
γ_{unsat}	<i>Poids volumique sec</i>	[KN / m ³]
K_x	<i>Perméabilité horizontale</i>	[m /jour]
K_v	<i>Perméabilité verticale</i>	[m /jour]
K_0	<i>Coefficient des pressions des terres au repos</i>	[-]
EA	<i>Rigidité normale</i>	[KN/m]
EI	<i>Rigidité de flexion</i>	[KN/m]
MSF	<i>Coefficient de sécurité utilisé par plaxis</i>	[-]
MEF	<i>Méthodes des éléments finis</i>	[-]

LISTE DES TABLEAUX

IX

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau 1.1</i>	<i>Déférents exemple de définition d'un coefficient de sécurité</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 1.2</i>	<i>Les valeurs de F_s en fonction de l'importance de l'ouvrage</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 4.1</i>	<i>Caractéristique géotechnique des matériaux</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 4.2</i>	<i>Propriétés des éléments de renforcement.</i>	<i>76</i>

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
<i><u>Chapitre 1</u></i>		
<i>Figure 1.1</i>	<i>glissement</i>	8
<i>Figure 1.2</i>	<i>Les coulées</i>	9
<i>Figure 1.3</i>	<i>Schéma de principe de chutes de blocs et éboulements</i>	10
<i>Figure 1.4</i>	<i>Eboulements</i>	10
<i>Figure 1.5</i>	<i>(a) Schématisation du phénomène de fluage, (b) Morgan's hill, imagegeograph.org.uk</i>	11
<i>Figure 1.6</i>	<i>Glissement réel à Mountain River, Canada</i>	12
<i>Figure 1.7</i>	<i>(a) Schématisation du phénomène de glissement de terrain plan, (b) avalanche.</i>	12
<i>Figure 1.8</i>	<i>Glissement rationnel simple</i>	13
<i>Figure 1.9</i>	<i>Glissement rotationnel complexe</i>	14
<i>Figure 1.10</i>	<i>Etalement</i>	14
<i>Figure 1.11</i>	<i>drainage</i>	16
<i>Figure 1.12</i>	<i>Colonnes ballastées</i>	25
<i>Figure 1.13</i>	<i>Les colonnes en sol stabilisé</i>	25
<i>Figure 1.14</i>	<i>micro-pieux</i>	26
<i>Figure 1.15</i>	<i>pieux battus</i>	28
<i>Figure 1.16</i>	<i>Machine à pieux ou foreuse sur un chantier de fondation spéciale</i>	28
<i>Figure 1.17</i>	<i>la terre armée</i>	29
<i>Figure 1.18</i>	<i>Le clouage des sols</i>	30

<i>Figure 1.19</i>	<i>Le Texsol</i>	<i>31</i>
<i>Figure 1.20</i>	<i>les géotextiles</i>	<i>33</i>
<i>Figure 1.21</i>	<i>Les géotextiles non tissé</i>	<i>34</i>
<i>Figure 1.22</i>	<i>Les géotextiles tissés</i>	<i>34</i>
<i>Figure 1.23</i>	<i>Les géotextiles tricotés</i>	<i>35</i>
<i>Figure 1.24</i>	<i>les Géogrilles</i>	<i>35</i>
<i>Figure 1.25</i>	<i>les géomembranes</i>	<i>37</i>
 <i><u>Chapitre 2</u></i> 		
<i>Figure 2.1</i>	<i>Les route nationals RN</i>	<i>43</i>
<i>Figure 2.2</i>	<i>Localisation de la zone du glissement</i>	<i>44</i>
<i>Figure 2.3</i>	<i>Affaissement de la chaussée</i>	<i>45</i>
<i>Figure 2.4</i>	<i>Travaux exécutés par l'entreprise au niveau de la zone de glissement d'Ain synour</i>	<i>47</i>
<i>Figure 2.6</i>	<i>Fenêtre d'entrée des données de sig</i>	<i>49</i>
<i>Figure 2.7</i>	<i>Exemple de sélection</i>	<i>50</i>
 <i><u>Chapitre 3</u></i> 		
<i>Figure 3.1</i>	<i>Fenêtre d'entrée des données de plaxis</i>	<i>56</i>
<i>Figure 3.2</i>	<i>Fenêtre des paramètres de mohr-Colomb</i>	<i>59</i>
<i>Figure 3.3</i>	<i>Définition de E_0 et de E_{50}</i>	<i>59</i>

XIII

<i>Figure 3.4</i>	<i>Surface de charge de mohr-coulomb dans l'espace des contraintes principales (c=0)</i>	61
<i>Figure 3.5</i>	<i>Fenêtre des paramètres avancés de mohr-coulomb</i>	62
<i>Chapitre 4</i>		
<i>Figure 4.1</i>	<i>Géométrie du modèle dans plaxis 2D</i>	67
<i>Figure 4.2</i>	<i>Maillage du modèle dans plaxis 2D</i>	68
<i>Figure 4.3</i>	<i>Condition hydraulique dans plaxis 2D</i>	68
<i>Figure 4.4</i>	<i>Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D</i>	69
<i>Figure 4.5</i>	<i>Génération des contraintes effectives initiale dans plaxis 2D</i>	69
<i>Figure 4.6</i>	<i>Coefficients de sécurité dans plaxis 2D</i>	70
<i>Figure 4.7</i>	<i>La courbe du coefficient de sécurité</i>	70
<i>Figure 4.8</i>	<i>Les déplacements totaux dans plaxis 2D</i>	71
<i>Figure 4.9</i>	<i>Géométrie du modèle dans plaxis 2D</i>	71
<i>Figure 4.10</i>	<i>Maillage du modèle dans plaxis 2D.</i>	72
<i>Figure 4.11</i>	<i>Condition hydraulique dans plaxis 2D</i>	72
<i>Figure 4.12</i>	<i>Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D.</i>	73
<i>Figure 4.13</i>	<i>Génération des conditions effectives dans plaxis 2D</i>	73
<i>Figure 4.14</i>	<i>Pahse de calcul dans plaxis 2D</i>	74
<i>Figure 4.15</i>	<i>Coefficient de sécurité dans plaxis 2D</i>	74
<i>Figure 4.16</i>	<i>Les déplacements totaux dans plaxis 2D.</i>	75
<i>Figure 4.17</i>	<i>maillage déformé dans plaxis 2D</i>	75
<i>Figure 4.18</i>	<i>géométrie dans plaxis 2D</i>	77
<i>Figure 4.19</i>	<i>maillage dans plaxis 2D</i>	77

XIV

<i>Figure 4.20</i>	<i>condition hydraulique dans plaxis 2D</i>	78
<i>Figure 4.21</i>	<i>répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D</i>	78
<i>Figure 4.22</i>	<i>génération des conditions effectives dans plaxis 2D</i>	79
<i>Figure 4.23</i>	<i>coefficients de sécurité dans plaxis 2D</i>	79
<i>Figure 4.24</i>	<i>les déplacements totaux dans plaxis 2D</i>	80
<i>Figure 4.25</i>	<i>maillage déformé dans plaxis 2D</i>	80
<i>Figure 4.26</i>	<i>la courbe du coefficient de sécurité dans plaxis 2D</i>	81
<i>Figure 4.27</i>	<i>Géométrie du modèle dans plaxis 2D.</i>	81
<i>Figure 4.28</i>	<i>Maillage du modèle dans plaxis 2D.</i>	82
<i>Figure 4.29</i>	<i>Condition hydraulique dans plaxis 2D.</i>	82
<i>Figure 4.30</i>	<i>Génération des conditions effectives dans plaxis 2D.</i>	83
<i>Figure 4.31</i>	<i>Coefficient de sécurité dans plaxis 2D</i>	83
<i>Figure 4.32</i>	<i>La courbe du coefficient de sécurité dans plaxis 2D</i>	84
<i>Figure 4.33</i>	<i>Les déplacements totaux dans plaxis 2D.</i>	84
<i>Figure 4.34</i>	<i>Géométrie dans plaxis 2D</i>	85
<i>Figure 4.35</i>	<i>Maillage dans plaxis 2D</i>	85
<i>Figure 4.36</i>	<i>Condition hydraulique dans plaxis 2D</i>	86
<i>Figure 4.37</i>	<i>Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D</i>	86
<i>Figure 4.38</i>	<i>Génération des conditions effectives dans plaxis 2D</i>	87

<i>Figure 4.39</i>	<i>Les déplacements totaux dans plaxis 2D</i>	<i>87</i>
<i>Figure 4.40</i>	<i>Coefficient de sécurité dans plaxis 2D</i>	<i>88</i>
<i>Figure 4.41</i>	<i>Comparaison des coefficients de sécurité entre les solutions</i>	<i>89</i>

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....1

Chapitre1:
Recherche bibliographique

1.1 Glissements de terrain..... 7

1.1.1 Introduction..... 7

1.1.2 Définition sur les glissements de terrain7

1.1.3 Différents types des mouvements de glissement de terrain.....9

1.1.3.1 les coulées.....9

1.1.3.2 chutes de blocs et éboulements.....9

1.1.3.3 le fluage11

1.1.3.4 les glissements11

a. Glissement plan.....12

b. Glissement rotationnel.....13

c. Glissement rationnel simple13

d. Glissement rationnel complexe13

1.1.3.5 étalements14

1.1.4 Facteurs d'instabilités14

XVIII

1.1.4.1	Facteurs permanents.....	15
a.	la pesanteur	15
b.	l'eau.....	15
1.1.5	Réduire au minimum les risques liés aux glissements de terrain.....	15
•	Evitement	15
•	Mesures de protection	16
•	Solution de génie civil	16
•	Confinement ou ouvrages de dérivation.....	16
1.1.6	Prévention.....	17
1.2	Méthodes de calcul de la stabilité des pentes	17
1.2.1	Introduction.....	18
1.2.2	Les méthodes d'analyse de stabilité des pentes	18
1.2.2.1	Eléments de base du calcul	19
1.2.2.2	Notion de facteur de sécurité.....	19
1.2.2.3	méthodes à liquilibre limite.....	21
a.	méthodes de fellenius (rupture circulaire)....	22
b.	méthodes bishop simplifiée.....	22
1.3	Renforcement de sol.....	22
1.3.1	Introduction	22
1.3.2	Technique de renforcement	23
1.3.2.1	colonnes ballastées	24
1.3.2.2	les colonnes en sol stabilisé	25

XIX

1.3.2.3 les micro-pieux	26
1.3.2.4 les pieux	26
➤ Les types de pieux	27
a- pieux battus façonné à l'avance	28
b- pieux à tube battu exécutés en place	28
c- pieux forés.....	28
d- Les pieux foncés.....	29
1.3.2.5 la terre armé	29
1.3.2.6 le clouage des sols	29
1.3.2.7 le texsol	30
1.3.2.8 géosynthétique	31
a. les géotextiles	33
• Les géotextiles non tissé	33
• Les géotextiles tissés	34
• Les géotextiles tricotés	35
b. les géogrilles	35
c. les géomembranes	36
1.4 Conclusion	39

Chapitre2:

Présentation de cas étudié

2.1. Introduction	40
2.2. géologie régionale.....	41
2.3. Localisation du site	44
2.4. Géologie locale	44
2.5. États de dégradation	44
2.6. Causes du glissement	44
2.7. Début du confortement du site	45
2.7.1. Rôles des entreprises	46
2.7.2. Le but de l'entreprise	46
Travaux de confortement (ENGOA).....	47
2.8. Définition	48
2.8.1 Fonctionnalités d'un sig.....	49

Chapitre3:

Description du code de calcul

3.1. Les méthodes numériques en géotechnique	52
3.1.1. Introduction.....	52
3.1.2. La méthodes des éléments finis.....	52
3.2. Code plaxis	53
3.2.1. Aperçu historique	53
3.2.2. Présentation du code plaxis	54
❖ Input	55
❖ Calculs	55
❖ Output.....	55
❖ Curves.....	55
3.2.3. Les modèles de comportements utilisés par plaxis.....	56
3.2.3.1. Le modèle élastique linéaire	57
3.2.3.2. Le modèle de mohr coulomb (MC).....	58
a- le module de Young	59
b- le coefficient de poisson	60
c- la cohésion	60
d- l'angle de frottement interne ϕ	60
e- l'angle de dilatance	61
f- les paramètres avancés	61
3.3. Conclusion	63

Chapitre4:

Modélisation numérique

4.1. Glissement et stabilisation du site.....	65
4.1.1. Introduction	65
4.1.2. Caractéristique	66
4.1.3. Début de la modélisation.....	67
4.1.3.1. Avant glissement	67
4.1.3.2. Après glissement.....	71
4.1.3.3. Renforcement du terrain	76
a- solution 1	77
b- solution 2.....	85
4.1.4. Comparaison des coefficients de sécurité	89
5.1. Conclusion et Perspective.....	90
a- conclusion générale.....	91
b- perspectives.....	92

*INTRODUCTION
GENERALE*

Les glissements de terrain sont des phénomènes géologiques de nature très diverse, ils peuvent être brusques, comme ils peuvent s'étaler sur plusieurs mois voire plusieurs années. La rupture se produit selon des formes vaguement circulaires ou bien, elle ne présente au contraire aucune caractéristique géométrique particulière. Ces phénomènes sont très destructeurs, en plus des pertes en vies humaines qu'ils peuvent engendrer, les aménagements humains y sont très sensibles et les dommages aux biens sont considérables et souvent irréversibles.

La nature même des mécanismes des phénomènes à étudier, leurs diversités, leurs dispersions dans l'espace et dans le temps, les conditions de leurs occurrences forment un ensemble de facteurs qui rendent complexe une analyse dans sa globalité.

Un mouvement de terrain survient principalement lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'homme, leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique. L'analyse de la stabilité comporte deux volets essentiels, le premier étant un calcul de stabilité pour déterminer la courbe selon laquelle la rupture est la plus probable, et le deuxième est le calcul du coefficient de sécurité correspondant.

IL existe plusieurs types de calcul de la stabilité :

- Les calculs à la rupture qui supposent que le terrain se comporte comme un solide rigide plastique, ces calculs incluent les méthodes d'analyse limite, et les méthodes à l'équilibre limite, qui sont les méthodes les plus couramment employées. Néanmoins, les calculs à la rupture ne prennent pas en compte les déformations du terrain. Si les terrains sont très

déformables ce type de calcul peut s'avérer insuffisant voire erroné ; ils ne permettent pas non plus d'évaluer les déformations et en conséquence les déplacements enregistrés sur les terrains.

- les calculs en contraintes-déformations permettent de connaître complètement le comportement du terrain en tout point, ils peuvent être approchés par des méthodes numériques telles que les éléments finis, les éléments frontières ou les éléments distincts.

Depuis quelques années, la modélisation en géotechnique est en constante progression, les méthodes numériques sont devenues aujourd'hui un complément utile voire nécessaire à des méthodes d'équilibre limites, qui elles, souffrent de sérieuses limitations pour l'analyse de la stabilité.

Les méthodes numériques sont exécutées par des logiciels spécialement mis en œuvre et adaptés à toutes sortes d'études géotechniques, ces logiciels permettent de traiter des problèmes en deux ou en trois dimensions.

Le phasage des travaux peut être suivi, et l'utilisateur peut aussi visualiser, grâce à des sorties graphiques, les résultats tel que le maillage, les champs de déplacements, les contraintes et déformations principales etc....

Aujourd'hui il existe un grand nombre de logiciels destinés aux études géotechniques. La majorité de ces logiciels sont dotés d'interfaces graphiques qui rendent leur exploitation facile et accessible à tout géotechnicien. Cependant, ils diffèrent dans leur possibilité de refléter plus ou moins fidèlement la géométrie de l'ouvrage, les anisotropies et hétérogénéités des matériaux ainsi que les sollicitations. De plus, ces outils présentent des différences dans la résolution des équations en jeu qui se ramène toujours à l'intégration de fonction « déplacement ». Certains procèdent par intégration directe comme avec la

méthode des éléments frontières, d'autres ont recours à la discrétisation de ces fonctions. Ces dernières diffèrent par ailleurs entre eux par les principes de discrétisation des grandeurs calculées, les algorithmes et les techniques de résolution, comme c'est le cas notamment entre les outils qui s'appuient sur la méthode des éléments finis, celle des éléments distincts, ou celle des différences finies.

La modélisation des problèmes géotechniques par des outils de calculs différents, exploitant différentes méthodes numériques s'avère nécessaire.

La comparaison des résultats obtenus permet de :

- Vérifier la performance des outils de calcul utilisés.
- Vérifier le choix des méthodes numériques.
- Emettre des recommandations pour des travaux futurs.

Le présent travail est une analyse du glissement d'Ain Seymour de la ville de Souk Ahras. Cette étude a été faite par le code Plaxis qui utilise la méthode des éléments finis. L'analyse consiste en l'établissement d'un modèle de référence de ce glissement et de comparer ensuite les principaux résultats obtenus.

Le travail regroupe quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre, il présente une revue bibliographique sur les glissements de terrains, les méthodes de calcul de la stabilité des pentes, les techniques de renforcement des sols

Le deuxième chapitre, présentation du cas étudié.

Le troisième chapitre, consiste en un bref aperçu de la méthode de calcul utilisée, les éléments finis, une présentation de logiciel Plaxis suivie des principales lois de comportement du sol utilisées.

Le dernier chapitre est une modélisation numérique et se compose en deux parties :

Partie 1 : modélisation numérique du glissement du talus endommagé dans logiciel plaxis 2D.

Partie 2 : proposition d'une solution pour la stabilisation du talus.

Chapitre 1

*RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE*

1.1. Glissement de terrain :

1.1.1. Introduction :

Le risque de glissement de terrains croit dans tous les pays du monde en général et dans notre pays en particulier suite à la croissance démographique ainsi qu'à l'urbanisation et au développement renforcés. Si cette tendance semble avoir été renversée dans les pays technologiquement avancés, elle constitue aujourd'hui un problème essentiel dans les pays en voie de développement où la population augmente rapidement et le développement régional est souvent hors.

Les glissements de terrains ont depuis longtemps fait l'objet de plusieurs travaux de recherche pour s'en prévenir ou y remédier. Plusieurs méthodes et outils ont été développés allant de la formulation la plus simple à des expressions incluant des calculs poussés et complexes. Pendant longtemps, ces méthodes ont été destinées principalement au cas des sols saturés car l'aspect polyphasique solide-liquide-air des sols n'était pas pris en compte en raison des difficultés à la fois expérimentales et d'interprétation des mesures.

Toutefois, dans la nature, les terrains susceptibles au glissement sont souvent conditionnés par l'état de non-saturation du massif, et une analyse dans ces conditions s'avère parfois fondamentale. Pour cela, ces dernières décennies, la mécanique des sols non saturés a fait l'objet de plusieurs recherches et beaucoup d'auteurs ont participé à son développement en général et à celui des méthodes d'analyse des glissements de terrains en particulier.

1.1.2. Définitions sur les glissements de terrain :

Les glissements de terrain ne sont qu'un type de mouvement gravitaire (ou mouvement de masse), pourtant, par analogie avec certains auteurs anglophones ("land slide" en anglais), on utilise parfois improprement le terme « glissement de terrain » pour désigner tous les mouvements gravitaires.

Glissement de terrain est un phénomène géologique d'où une masse de terre descend sur une pente, autrement dit un plan de glissement plus ou moins continu, plus ou moins plan ou incurvé. Après la mise en mouvement,

La masse conserve globalement sa consistance et sa physionomie. Il est soit un processus naturel ou se produit en raison des activités humaines qui perturbent la stabilité de la pente.

Les glissements des terrains représentent un problème sérieux presque dans toutes les régions du monde, parce qu'ils causent des pertes économiques ou social sur des propriétés privées et publiques. Les catastrophes naturelles ont démontré la puissance destructrice de soudains mouvements de masse au cours d'un glissement de terrain, qui continuent à faire des victimes et causent des dommages importants aux biens et aux infrastructures sur une base annuelle. Malgré l'apparition fréquente de telles catastrophes naturelles, des lacunes considérables demeurent dans la base de compréhension et de modélisation des principaux mécanismes de déclenchement et de l'extension spatiale des cicatrices et des zones de dépôts, donc qui entravent les efforts visant à développer des systèmes d'alerte précoce efficaces et établir des indicateurs pour panne naissante et tout dommage ultérieur.

Les zones qui sont généralement sujettes à des glissements de terrain sont : Les glissements de terrain existants, ancienne ou récente, à la base ou au sommet de pentes, à la base du creux de drainage mineurs, à la base ou sommet d'un ancien talus de remblai, à la base ou au sommet d'une pente supporte une forte inclinaison.

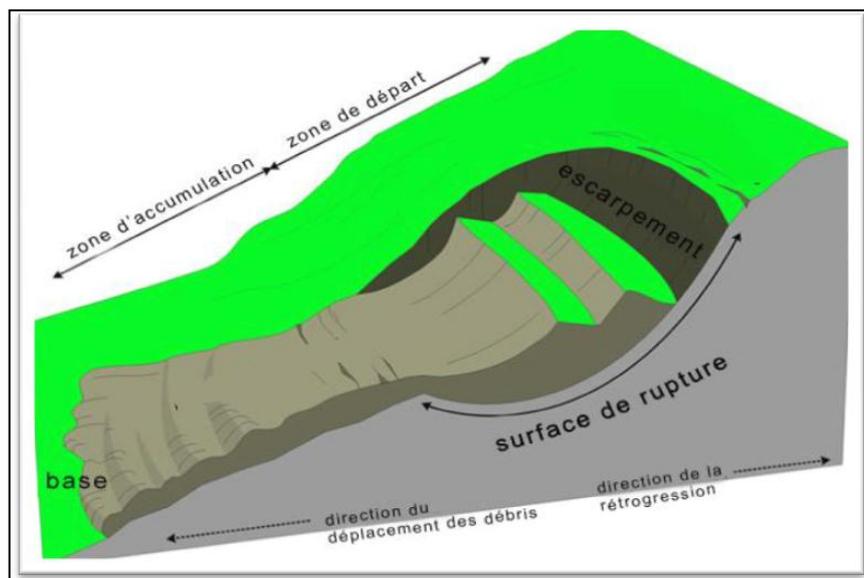


Figure 1.1 : Glissement

1.1.3. Différents types des mouvements du glissement terrain :

1.1.3.1. Les coulées :

Elles se produisent à partir de matériel meuble, momentanément saturé en eau, prenant alors une consistance plus ou moins visqueuse, parfois proche de la fluidité. On distingue plusieurs types de coulées telle que : coulées boueuses (incluant coulée de blocs, de terre, de boue, lave torrentielle, avalanche de débris et se produisant surtout en montagne) coulées de solifluxion (déplacement lent des sols en milieu périglaciaire, résultant de l'instabilité de la partie dégelée du sol, en surface, au cours de l'été).

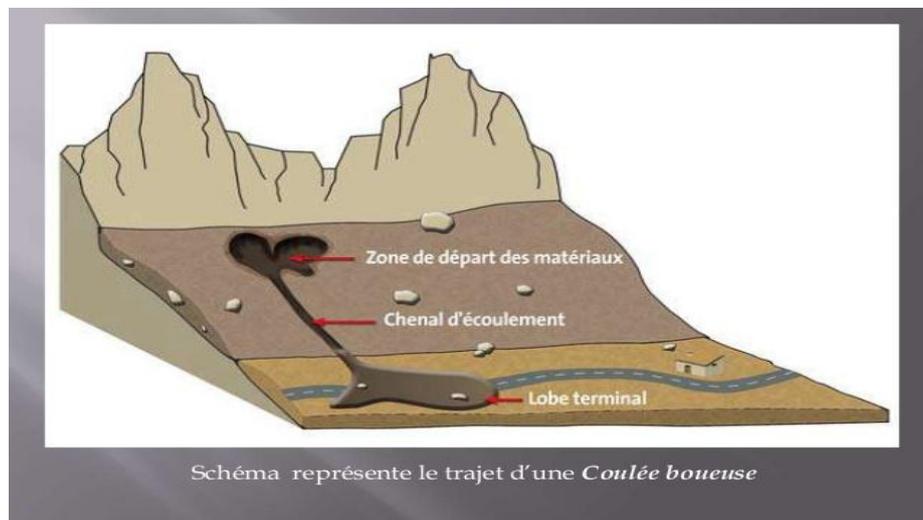


Figure 1.2 : les coulées.

1.1.3.2. Chutes de blocs et éboulements :

Ce sont des phénomènes rapides ou événementiels, résultant de l'évolution de falaise, et mobilisant des blocs de roche plus ou moins homogènes depuis un sommet ou une pente.

Ils consistent en la chute libre ou au roulement au départ, après rupture, de blocs par fragmentation. Le mouvement pouvant ensuite se poursuivre par une série de rebonds de hauteur décroissante (dans le cas d'une pente régulière).

La chute de blocs ne concerne qu'un nombre réduit d'éléments. Pour les éboulements, la masse instable est beaucoup plus volumineuse.

Les blocs déstabilisés ont une trajectoire plus ou moins autonome, l'extension du phénomène est donc variable, car la distance parcourue par les blocs rocheux sera en fonction de la taille des blocs, de la raideur de la pente et de l'amortissement des Chocs, etc.

Ce phénomène se caractérise par une forte désorganisation ou dislocation des Matériaux mis en mouvement. Le volume de matériaux mis en jeu est extrêmement variable, de quelques dizaines à quelques milliers de m³.

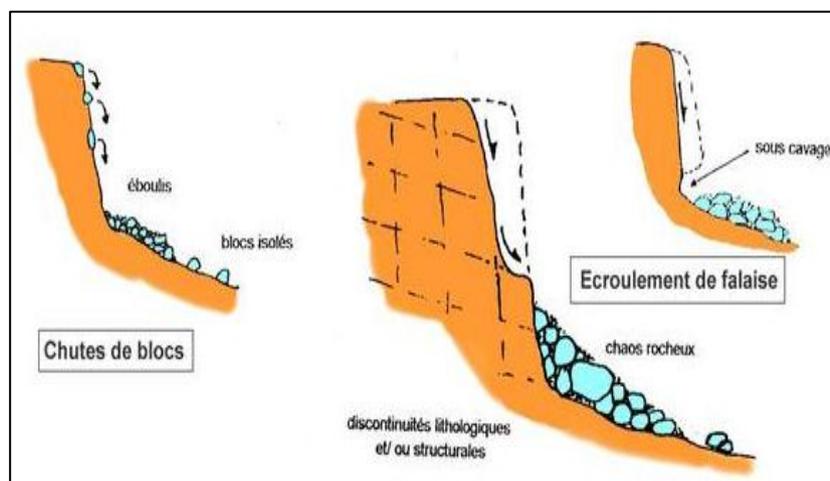


Figure 1.3 : Schéma de principe de chutes de blocs et éboulements



Figure 1.4 : éboulements.

1.1.3.3. Le fluage:

Complexe à prédire, ce type de mouvement apparaît lorsqu'un sol malléable est soumis à une charge importante en amont, souvent un massif rocheux. Il subit de la part de celle-ci une pression importante, qui va le pousser à fluer, et donc à gonfler (figure 1.5)

Le fluage est souvent très visible, les troncs des arbres sont distordus et les poteaux électriques penchés. Installer des drains limite ce phénomène, souvent dévastateur pour les installations souterraines amenées à rupture. Une zone susceptible au fluage à long terme est souvent difficile à identifier, les vitesses d'évolutions sont en effet très lentes et la simple incorporation d'eau dans la terre meuble, diminuant sa résistance mécanique, peut entraîner une situation de fluage.

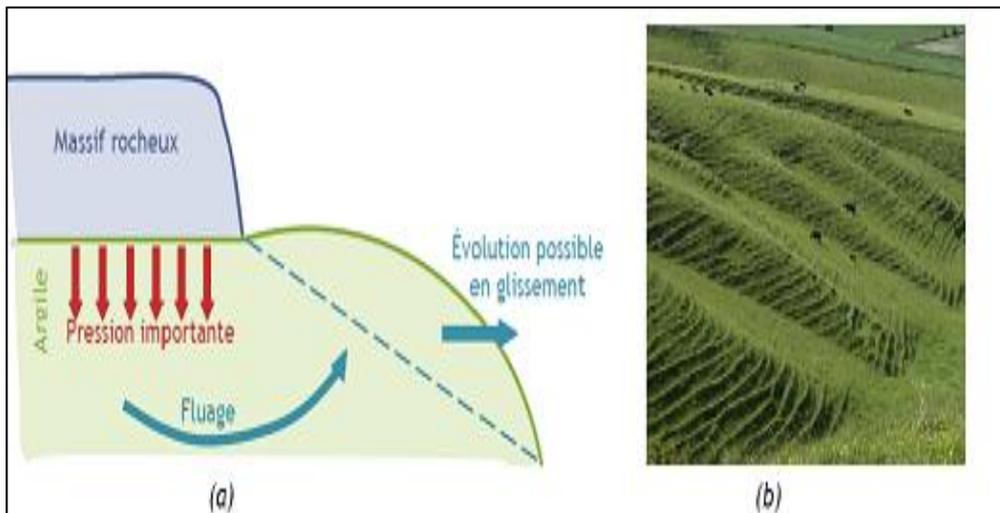


Figure 1.5 : (a) Schématisation du phénomène de fluage, (b) Morgan's hill, image geograph.org.uk

1.1.3.4. Les glissements :

Le glissement est un mouvement d'une pente descendante de sol ou le massif de roche qui se produit surtout à la surface de rupture ou sur des zones relativement minces de déformation en cisaillement intense.

Selon la forme de la surface de rupture, on distingue deux types de glissements :



Figure 1.6. Glissement réel à Mountain River, Canada.

a. Glissement plan :

Il se produit suivant un plan, au niveau d'une surface de discontinuité géologique : zone entre deux matériaux de nature différente, failles, plans de stratification. La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon ».

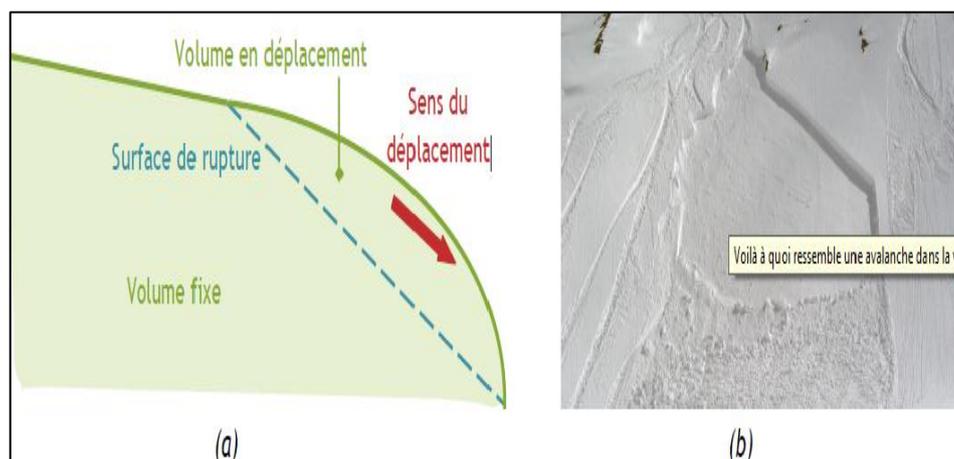


Figure 1.7. (a) Schématisation du phénomène de glissement de terrain plan, (b) avalanche.

b. Glissement rotationnel :

➤ Glissement rotationnel simple :

Ce type de glissement est très fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à un cylindre. Dans un tel glissement, on distingue: au sommet des fissures de traction et un escarpement, correspondant au départ de la surface de glissement, et à la base un bourrelet formé par des matières glissées. Dans certains cas, la surface de rupture peut être assimilée à un cercle, d'où le nom de glissement circulaire.

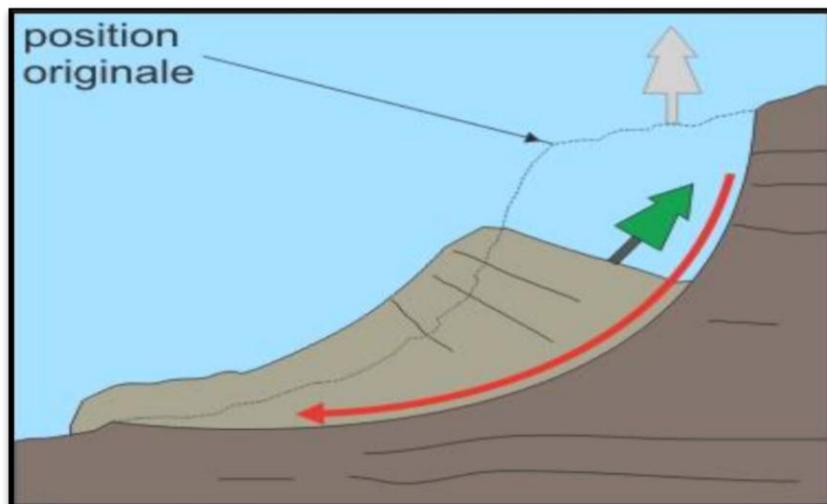


Figure1.8 : Glissement rotationnel simple.

➤ Glissement rotationnel complexe :

Ce type de glissement est rare. Il s'agit de glissements multiples emboîtés les uns dans les autres, dus souvent à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, ce qui entraîne des glissements successifs remontant vers l'amont. Principales causes des glissements : Plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants étant :

- la nature des terrains : les terrains argileux sont prédisposés aux glissements.
- l'action de l'eau : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.
- les causes mécaniques externes : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les talus stables, toute surcharge naturelle ou artificielle

déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines ...).

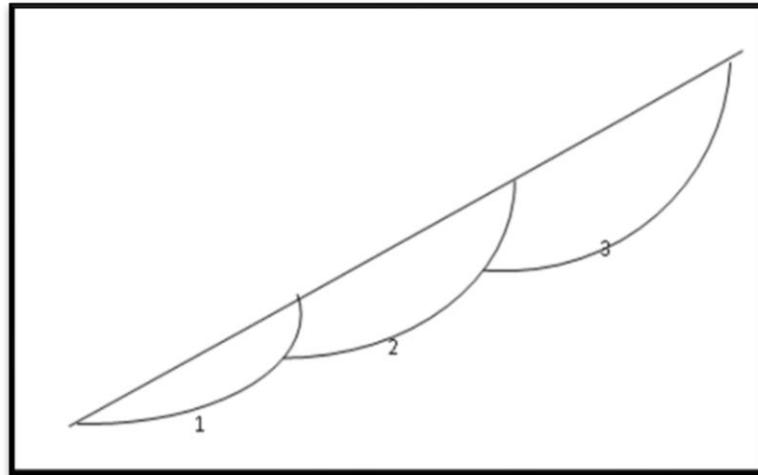


Figure1.9 : Glissement rotationnel complexe

1.1.3.5 Étalement :

L'agrandissement de la zone occupée par des blocs de sédiments ou de roche sur une pente douce



Figure1.10 : Étalement

1.1.4 Facteurs d'instabilités :

Les mouvements de pente sont des manifestations naturelles de l'évolution du relief, en action, à la surface terrestre depuis des millions d'années. Les observations et les études effectuées à partir d'événements passés ont permis de

mettre en évidence certaines conditions de site favorables à l'apparition de tel ou tel phénomène d'instabilité.

1.1.4.1. Facteurs permanents :

Ce sont des facteurs de prédisposition d'un site aux instabilités (relief, nature Géologique des terrains, etc.).

a- La pesanteur :

Elle constitue le moteur essentiel des mouvements de terrain, qualifiés souvent de gravitaires.

b- L'eau :

Elle est un facteur très déterminant pour la genèse d'un glissement de terrain. Elle agit par ameublissement et dégradation mécanique des terrains. Elle joue en même temps un facteur permanent et un facteur variable dans le temps (précipitation).

1.1.5. Réduire au minimum les risques liés aux glissements de terrain :

Les risques liés aux glissements de terrain peuvent être réduits au minimum au moyen de différentes méthodes.

❖ Évitement :

En utilisant les commentaires d'experts et une planification méthodique, les collectivités peuvent déterminer les pentes à risque et restreindre ou surveiller le développement dans les zones dangereuses.

❖ Mesures de protection:

Dans les collectivités déjà établies, les autorités municipales ou provinciales doivent déterminer si l'on doit prendre des mesures de protection de génie civil ou racheter certaines propriétés afin de déplacer leurs occupants.

❖ Solutions de génie civil :

Si l'on doit vivre à proximité de pentes à risque, il existe plusieurs solutions de génie civil afin de prévenir les glissements de terrain, notamment :

- ✓ améliorer le drainage : L'eau joue très souvent un rôle déterminant dans "le déclenchement" des glissements de terrain, que cela soit par son action mécanique, physico-chimique ou chimique. Les dispositifs de drainage ont pour rôle de réduire l'action de l'eau soit en évitant l'alimentation en eau du site, soit en expulsant l'eau présente dans le massif instable.



Figure1.11: Drainage

- ✓ réduire la dénivellation de la pente.
- ✓ excaver le haut de la pente.
- ✓ construire une berme ou un mur de protection afin de renforcer le bas de la pente.

❖ Confinement ou ouvrages de dérivation :

Lorsque l'on ne peut prévenir ni éviter les glissements de terrain, il existe un certain nombre de mesures de confinement physique ou d'ouvrages de dérivation, notamment :

- ✓ barrages de captage et bassins de confinement afin de retenir les débris et l'eau

- ✓ canaux ou chutes artificiels afin de détourner les débris
- ✓ filets et murs artificiels afin d'empêcher que les éboulements de roches ou de terre n'atteignent les routes ou les structures.

1.1.6. Prévention :

- ❖ S'informer sur la géologie de la région et l'historique de glissement de terrain dans le secteur
- ❖ Consulter les cartes sur lesquelles sont présentées les zones à risque
- ❖ Eviter les travaux qui pourraient augmenter l'instabilité. par exemple :
 - ✓ Creuser dans une pente
 - ✓ Construire au sommet ou au pied d'un talus
 - ✓ Augmenter de quelque façon l'écoulement d'eau sur des pentes abruptes
- ❖ Reconnaître les signes d'un éventuel glissement qui se présentent sous forme de :
- ❖ Fissure, un renflement dans une pente, un éboulement de pierres ou de sédiments, un écoulement inhabituel d'eau.

1.2 Méthodes de calcul de la stabilité des pentes :

1.2.1 Introduction :

La stabilité des ouvrages en terre (déblais, remblais, digues) et des pentes naturelles est un problème qui préoccupe les géotechniciens tant praticiens que chercheurs. Les désordres engendrés par la rupture des pentes sont généralement spectaculaires, souvent destructifs et parfois meurtriers.

De nombreuses méthodes de calcul de stabilité ont été proposées. Celles-ci se différencient par les hypothèses admises par leurs auteurs (méthodes de calcul en équilibre limite, méthodes de calcul à la rupture, méthodes de calcul en déformations) et par la facilité de leur mise en œuvre (calculs à l'aide d'abaques, calculs automatiques à l'aide de logiciels), mais elles s'accordent toutes à définir un coefficient de sécurité global en fonction duquel la stabilité du talus étudié est considérée comme assurée ou compromise, ou par des coefficients de sécurité partiels affectant, d'une part, les sollicitations appliquées et, d'autre part, les propriétés mécaniques des sols. Diverses techniques de renforcement

des talus ont par ailleurs été développées. Elles se différencient par le procédé de leur réalisation, leur coût et leur durabilité.

La présente communication passe en revue les différentes méthodes d'analyse de stabilité et de stabilisation des versants naturels ou artificiels instables actuellement utilisées pour l'élaboration des projets.

1.2.2 Les méthodes d'analyse de stabilité des pentes :

Les méthodes habituellement utilisées sont basées sur une constatation d'expérience, à savoir que lorsqu'il y a glissement générale de terrain, il y a séparation d'une masse de sol du reste du massif et glissement suivant une surface de rupture.

L'analyse de la stabilité des pentes est traitée comme un problème d'équilibre limite.

Le calcul à la rupture, on suppose que le terrain se comporte comme un solide rigide plastique et obéit aux lois classiques de la rupture par cisaillement. Il est utilisé depuis plusieurs décennies et a donné naissance, dans l'hypothèse de ruptures rotationnelles, à plusieurs méthodes de calcul.

Les ruptures planes représentent un cas particulier très simple dans son principe. Pour les surfaces de rupture de forme quelconque, le calcul est beaucoup plus complexe.

Pour évaluer la stabilité des pentes par une méthode à l'équilibre limite, il existe des méthodes linéaires et non linéaires. Les méthodes linéaires sont des méthodes directes de calcul de FS et les méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif.

1.2.2.1. Eléments de base du calcul:

Pour faire un calcul de stabilité nous devons connaître certains éléments dont :

- ❖ La géologie et la nature des terrains.
- ❖ Les propriétés mécaniques des terrains et/ou des discontinuités.

- ❖ La géométrie du talus en 2 ou 3 dimensions.
- ❖ Les conditions hydrodynamiques (hauteurs d'eau et écoulements)
- ❖ Les projets et les risques (mine à ciel ouvert ou abords d'habitation).

1.2.2.2. Notion de facteur de sécurité :

Si les données géotechniques nécessaires sont définies, le calcul de la stabilité des pentes peut être effectué à l'aide d'une des méthodes de calcul connues.

Le principe de calcul consiste à déterminer le facteur de sécurité FS par lequel il faut diviser la résistance de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre.

On distingue deux manières différentes d'utiliser les méthodes de calcul:

- ❖ Dans la première, le glissement a déjà eu lieu, il s'agit d'une valeur de FS inférieure ou égale à 1, dans ce cas la surface exacte est connue et on cherche à déterminer, pour FS=1, les caractéristiques correspondantes.
- ❖ La deuxième, la plus fréquente, consiste à déterminer la marge de sécurité disponible et adopter les solutions adéquates pour améliorer la sécurité de l'ouvrage en répondant à des exigences en fonction de l'emploi des talus.
- ❖ Pour évaluer la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité, ce coefficient peut être un rapport de forces, de moments, de grandeurs par rapport à une grandeur limite comme le montre le (tableau 1.1):

Tableau 1.1: *Différents exemples de définitions d'un coefficient de sécurité*

<i>Définition</i>	<i>Formule</i>
<i>Rapport de contraintes</i>	$F = \tau_{max} / \tau$
<i>Rapport de forces</i>	$F = E_{resist} / M_{moteur}$
<i>Rapport de moments</i>	$F = M_{resist} / M_{moteur}$
<i>Rapport de grandeurs</i>	<i>Par ex : H / Hmax</i>

Théoriquement, le talus est dit stable si $F_s > 1$, l'état d'équilibre limite (rupture) est obtenu lorsque $F_s = 1$, mais dans la pratique, le coefficient F_s est compris entre 1,15 et 1,30 en tenant compte des facteurs suivants :

- ❖ Les erreurs dues à l'exactitude des méthodes de calcul de la stabilité du bord.
- ❖ Les incertitudes expérimentales de la détermination des propriétés physico-mécaniques des roches, comme par exemple la valeur moyenne du poids volumique des roches composant le massif.
- ❖ Les incertitudes de la détermination de l'influence de la fissure.
- ❖ L'influence des charges dynamiques provoquées par le tir, par le mouvement des moyens de transport et par les séismes. Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de F_s en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entoure.

Tableau 1.2 : Les valeurs de F_s en fonction de l'importance de l'ouvrage.

<i>FS</i>	<i>Etat de l'ouvrage</i>
<i><1</i>	<i>Danger</i>
<i>1,0 -1,25</i>	<i>Sécurité contestable</i>
<i>1,25-1,4</i>	<i>Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants Sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique</i>
<i>>1,4</i>	<i>Satisfaisante pour les barrages</i>

1.2.2.3. Méthodes à l'équilibre limite :

L'analyse de la stabilité des pentes s'effectue habituellement à la rupture à l'aide de la méthode des tranches. Cette méthode donne par l'intermédiaire du coefficient de sécurité une idée de l'état d'équilibre de la pente étudiée par rapport à l'équilibre limite. L'expression du coefficient de sécurité est différente selon qu'il s'agit d'une rupture plane, circulaire ou quelconque. Dans tous les cas, les calculs de stabilité s'effectuent en contraintes totales à court terme et/ou en contraintes effectives à long terme.

Le degré de précision des calculs dépendra toutefois de la qualité de détermination des paramètres de cisaillement, mais aussi des moyens de calculs mis en œuvre. Le coefficient de sécurité est déterminé par un calcul manuel ou à l'aide d'abaques dans le cas de configurations simples ou d'avant-projet sommaire et à l'aide de programmes de calcul sur ordinateur pour les configurations complexes ou de projets détaillés.

La mise en équation du problème de l'équilibre d'une masse de sol peut se faire de deux manières :

Etude de l'équilibre de l'ensemble de la zone de glissement. La ligne de rupture est la plupart du temps supposée circulaire. C'est la "méthode globale" (par exemple méthode de TAYLOR ; de CAQUOT ; de BIARETZ...).

Décomposition du talus en tranches dont on étudie d'abord l'équilibre individuel, avant de globaliser le résultat en faisant intervenir certaines hypothèses simplificatrices ; c'est la méthode des tranches (par exemple méthode de FELLENIUS ; BISHOP...).

a- Méthode de Fellenius (rupture circulaire) :

Encore appelée méthode suédoise, on suppose que la ligne de glissement est circulaire mais on néglige totalement les efforts inter tranches :

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2$$

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_2.$$

Comme les autres méthodes simplifiées, la répartition des forces effectives normales N' sera entachée d'erreur mais à un degré supérieur, puisque

chaque tranche est considérée comme totalement indépendante. Dans cette méthode la force normale agissant à la base de chaque tranche sera :

$$N' = W \cos \alpha - U L \dots \dots \dots (1)$$

Avec : $U = \gamma_w h_w$ et h_w , la hauteur d'eau souterraine au-dessus de la base de la tranche, le facteur de sécurité est alors :

$$F = \frac{c' l + \tan \varphi' \sum W \cos \alpha - ul}{\sum W \sin \alpha} \dots \dots \dots (2)$$

b- Méthode Bishop simplifiée :

Dans cette méthode on suppose que les forces inter tranches verticales sont égales et opposées, $X_1 = X_2$ ce qui équivaut à considérer les forces inter tranches uniquement horizontaux. L'équilibre des forces verticales sera donc :

$$W = N' \cos \alpha + ul \cos \alpha + \frac{c'}{F} \tan \varphi' \sin \alpha \dots \dots \dots (3)$$

Qui donne une force normale effective :

$$N' = \frac{W - \frac{c'}{F} \sin \alpha - ul \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \varphi' \sin \alpha}{F}} \dots \dots \dots (4)$$

Avec un facteur de sécurité :

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \frac{[c' b + (W - ul) \tan \varphi'] \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi'}{F}} \dots \dots \dots (5)$$

1.3. Renforcement de sol :

1.3.1 Introduction :

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

L'aménagement de sol de qualité médiocre est de plus en plus nécessaire, compte tenu de la croissance de l'humanité et de ses activités. Certains types de sol, jusque-là délaissés, car présentant des caractéristiques mécaniques faibles, doivent être renforcés pour assurer la stabilité des édifices et des infrastructures de génie civil qu'ils sont appelés à porter. Peu visibles pour le profane car enfouies dans le sol, les techniques de renforcement sont très largement répandues et nous entourent au quotidien (fondations, murs de soutènement, remblais routiers, voies de chemin de fer, etc.)

1.3.2 Technique de renforcement :

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

Dans les sols perméables, comme les cailloux, les graviers et les sables, l'eau circule facilement. Ce n'est pas le cas dans les sols peu perméables voire imperméables, comme le limon et l'argile. L'eau circule ainsi 1 million de fois moins vite dans l'argile que dans le gravier. Par ailleurs, suite à des sollicitations extérieures telles que des venues d'eau, des périodes de sécheresse ou des

séismes, les caractéristiques mécaniques des sols peuvent évoluer et ne plus être adaptées à l'usage qui leur était destiné.

Suivant le type de sol considéré et le type d'ouvrage à réaliser, il convient de retenir une solution de renforcement adaptée qui s'accorde à la fois à la nature du sol en place et à son environnement. Le problème reste d'une grande complexité comme en témoigne les vestiges du passé (tour de Pise par exemple). Deux techniques majeures peuvent être utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols : par la modification de la structure interne du sol en place et le renforcement du sol par ajout d'inclusions. Plus spécifiquement, les techniques d'amélioration des sols permettent d'accroître la compacité du sol en place, soit en réduisant le volume des vides, par exemple en appliquant une surcharge sur un sol saturé et en le laissant tasser par expulsion de l'eau en surpression, on parle dans ce cas de consolidation des sols, soit en imposant des vibrations dans le sol pour qu'il se densifie par réarrangement des grains (compactage, dynamique).

Les techniques de renforcement des sols proprement dites font intervenir des éléments de renfort verticaux ou horizontaux dans le sol. L'objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d'un ouvrage sans qu'il n'y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité.

Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols. Il recouvre des techniques qui consistent à placer des inclusions résistantes au sein du sol.

Le concept de sol renforcé a été, utilisé pour la première fois par Henri Vidal, dans le cadre de la technique de la Terre Armée qu'il a inventée et développée au début des années 60. Ce concept a depuis été, étendu, par d'autres auteurs, à des techniques variées telles que: micro pieux, colonnes ballastées, colonnes en sol stabilisé, clouage des sols, Texsol, membranes, etc.

1.3.2.1. Colonnes ballastées :

Cette technique est utilisée dans les sols mous; l'inclusion de renforcement est une colonne verticale en sable, gravier ou agrégats fortement compactés. En générale, la mise en place de la colonne comporte deux phases principales:

- ❖ un tube ou un vibreur est enfoncé dans le sol jusqu'au niveau souhaité en refoulant le sol environnant
- ❖ le système est ensuite remonté progressivement pendant que la cavité est comblée par un matériau granulaire fortement compacté statiquement ou par vibrations.

Le rôle principal de la colonne est d'augmenter la résistance et le module du sol de fondation, en outre la colonne agit comme un drain vertical. Cette inclusion est relativement souple et résiste principalement à la compression. Cependant, lorsque les colonnes ballastées sont utilisées pour améliorer la stabilité du sol de fondation vis-à-vis d'un glissement général, elles améliorent aussi, de façon significative, la résistance au cisaillement du sol



Figure 1.12 : Colonnes ballastées

1.3.2.2. Les colonnes en sol stabilisé :

L'efficacité des colonnes ballastées a conduit au développement d'une technique assez proche qui consiste à créer des colonnes en sol stabilisé. Différentes méthodes ont été mises au point; elles comprennent: la stabilisation in situ à la chaux (Broms, L975), la stabilisation in situ par injection (Yahiro et Yoshida, L978), les pieux avec déplacement du sol par injection (Baker, 1981). Si on les compare aux colonnes ballastées, ces inclusions sont en général plus rigides et peuvent supporter à la fois de la compression, de la flexion et du cisaillement.

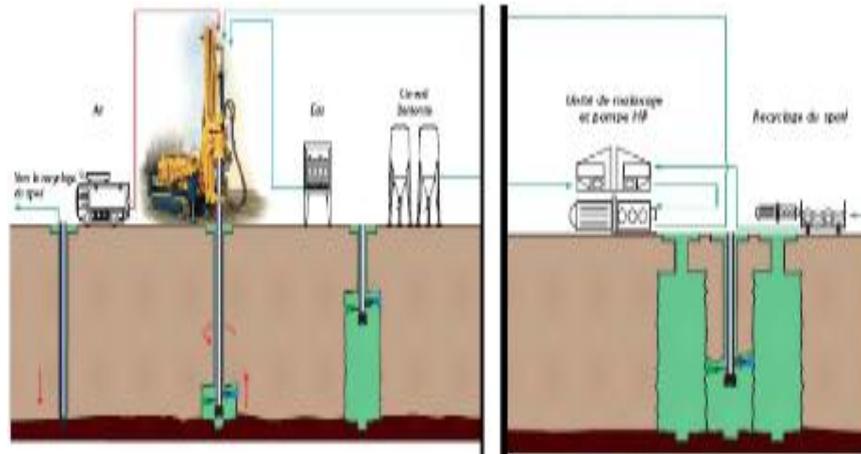


Figure 1.13 : Les colonnes en sol stabilisé

1.3.2.3. Les micro-pieux :

Cette technique consiste à mettre en place dans le sol de petits pieux injectés. Chaque pieu est constitué d'une barre ou d'un tube de quelques centimètres de diamètre entouré de coulis sur toute sa longueur. Le diamètre total est d'environ 10 à 15 cm. Cette technique est utilisée depuis hante ans, principalement dans les sols de fondation, mais elle a aussi d'intéressantes applications pour la stabilisation des pentes, les ouvrages de soutènement et les reprises en sous-œuvre. Il s'agit d'inclusions plutôt rigides dans lesquelles les efforts mobilisés dépendent essentiellement de l'eff.et de structure du groupe de pieux. Les efforts principaux sont la traction et la compression.



Figure 1.14 : micro-pieux

1.3.2.4. Les pieux:

Un pieu est un élément de construction en béton, acier, bois ou mixte permettant de fonder un bâtiment ou un ouvrage. Ils sont utilisés lorsque le terrain ne peut pas supporter superficiellement les contraintes dues à la masse de l'ouvrage. Il est également possible d'utiliser des pieux pour renforcer des fondations existantes.

Les pieux font partie du domaine des fondations profondes ou fondations spéciales.

Dans les terrains où les couches superficielles de terrain ne sont pas aptes à recevoir des fondations classiques au vu de la descente de charge, il est nécessaire de fonder les ouvrages en profondeur. Dans le report des charges de la structure vers le sol, les pieux peuvent fonctionner selon deux modes, l'appui de sa pointe et le frottement latéral de son fût. Ces deux modes peuvent être utilisés séparément ou combinés suivant la nature des sols.

Classiquement, à la manière d'une fondation courante, le pieu peut s'appuyer sur une couche de sol résistante. Les efforts sont alors transmis par la pointe du pieu, descendue jusqu'à une couche de sol présentant une résistance mécanique suffisante.

Parallèlement, le pieu mobilise également les différentes couches de sol traversées par son fût. Suivant le mode de réalisation, un phénomène de frottement latéral se met en place à l'interface pieu/sol qui permet également de transmettre des efforts. Ce phénomène permet de se fonder dans des sols de qualité médiocre grâce à l'importante surface mobilisée, mais cet effet est annulé en cas de liquéfaction du sol lors d'un séisme.

➤ **Les types de pieux:**

a- Pieux battus façonnés à l'avance:

Les pieux ou pilots sont en bois de hêtre, sapin, chêne ou en béton armé, et l'ensemble des pieuses forme ce que l'on appelle le pilotis. Les pieux sont terminés, à la partie inférieure, par une pointe en fer forgé et leur tête garnie d'une frette également en fer, destinée à empêcher que le bois ou le béton ne se gerce, ou ne s'écrase sous les coups de mouton. Les pieux sont battus en force dans le sol ou enfoncés par vibration (Vibrofonçage). Le battage s'effectue grâce à la chute d'une masse de fonte ou en fer de 500 kilogrammes,

appelée Sonnette ou mouton, qui heurte la tête du pieux et provoque son enfoncement dans le sol. Le battage se poursuit jusqu'à obtenir un « refus », c'est-à-dire l'incapacité d'obtenir un enfoncement plus important. Une volée est une suite ininterrompue de 30 coups environ: après chaque volée on mesure l'enfoncement ; si celui-ci après plusieurs volées ne présente plus qu'une quantité négligeable, on dit que le pilot est battu à refus¹. Les pieux sont liaisonnés par le dessus par des poutres, ce que l'on nomme « radier ».

Un pilot ne doit pas être considéré comme une colonne ou une pièce isolée vu qu'il est soutenu de toute part par la terre environnante¹.

Le diamètre des pieux en bois varie de 18 à 40 cm. Jean Rondelet a déterminé que l'on pouvait charger chaque centimètre carré de leur section de 30 à 35 kilogrammes.

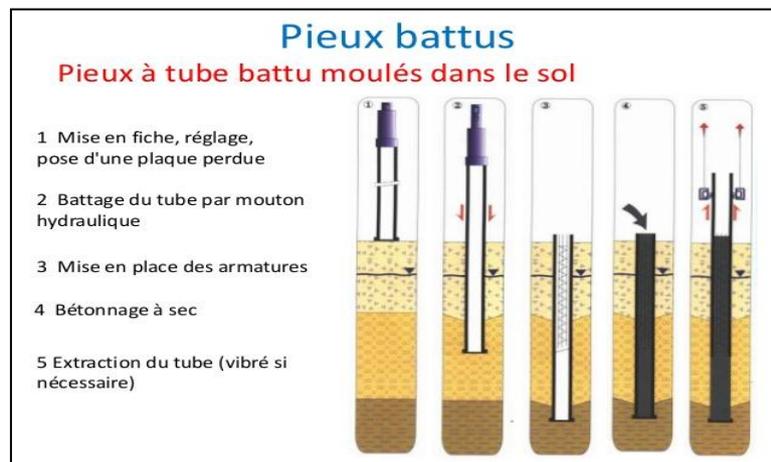


Figure 1.15 : pieux battus

b- Pieux à tube battu exécutés en place:

Les pieux à tube battu sont réalisés à l'aide d'un tube métallique creux fermé à la base, battu en force dans le sol et qui sert ensuite à couler du béton dans le sol à mesure de la remontée du tube. Ils se rapprochent des tubes battus par l'absence d'extraction de matériaux, mais le pieu lui-même est réalisé en place dans le terrain, comme dans le cas des pieux forés.

c- Pieux forés:

Les pieux forés sont réalisés par excavation de matériaux puis coulage de béton dans le sol. Suivant la nature des terrains traversés, il existe de

nombreuses techniques de forage. Différents outils sont utilisés selon la dureté des sols (tarière creuse, etc.). Dans le cas de sols de faible cohésion, un tubage ou l'utilisation de boues permet d'assurer la tenue des terres durant les opérations de forage.



Figure 1.16 : Machine à pieux ou foreuse sur un chantier de fondation spéciale.

d- les pieux foncés :

Les pieux foncés hydrauliquement sont des pieux réalisés à partir d'éléments préfabriqués, ou coulés en place à l'avancement, qui sont ensuite enfoncés dans le sol à l'aide d'un vérin. Cette technique est relativement peu utilisée du fait des importantes charges fixes nécessaires pour assurer la poussée du vérin. Elle est notamment utile dans le cas du renforcement des fondations de bâtiments existants où le poids du bâtiment lui-même peut être utilisé. Elle a l'avantage de pouvoir être mise en œuvre dans des espaces réduits.

1.3.2.5. La terre armée :

Cette technique consiste en l'association d'un matériau granulaire frottant et d'armatures linéaires flexibles de grande résistance à la traction. Le parement extérieur de l'ouvrage est relativement mince et souple; il est généralement constitué de panneaux en béton. Pour limiter la déformation de la structure on utilise des armatures en acier, relativement inextensibles vis-à-vis du sol de remblai et qui sont galvanisées pour empêcher la corrosion.



Figure 1.17: la terre armée.

1.3.2.6 Le clouage des sols :

C'est une technique de renforcement des sols in situ à l'aide de barres passives, soit scellées dans des bouts de forage, soit simplement battues dans le sol. Lorsque cette technique est utilisée pour des ouvrages de soutènement, les barres sont généralement horizontales et l'effort principal est la traction. Au contraire, quand cette technique est utilisée pour la stabilisation des pentes, les barres sont généralement verticales et les efforts principaux sont la flexion et le cisaillement.



Figure 1.18 : Le clouage des sols

1.3.2.7 Le Texsol :

Cette nouvelle technique, inventée par LEFTAIVE (1982), consiste à renforcer un matériau de remblai granulaire à l'aide d'un ou plusieurs fils continus résistants à la traction.

Parmi les techniques que nous n'avons pas classées dans le renforcement des sols, il est intéressant de citer les murs à échelles, inventés en 1926 par COYNE. Il s'agit d'un système par ancrages multiples associé à un parement de faible épaisseur soit continu, soit en panneaux de béton. Les forces de tractions sont constantes tout au long des tirants. L'interaction sol inclusion est concentrée sur les ancrages à l'extrémité des tirants. Plus récemment, il a été développé des systèmes à ancrages multiples similaires (Tene Ancrée MURRAY, 1981).



Figure 1.19 : Le Texsol

1.3.2.8. Les géosynthétique :

Un géosynthétique est un produit, dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, polyamide, polyester ou polypropylène) ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, utilisé en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

Il existe deux grandes familles de géosynthétiques :

- ❖ Les géotextiles et produits apparentés aux géotextiles qui sont des produits perméables.
- ❖ Les géomembranes et produits apparentés aux géomembranes qui sont essentiellement imperméables.
- ❖ Les produits issus de la combinaison de manière industrielle de deux ou plusieurs géosynthétiques sont dits géocomposites. Ils remplissent plusieurs fonctions dans l'ouvrage.

a- Les principales fonctions et applications des géosynthétiques sont :

- ✓ **La séparation** : pour la prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblai adjacents de nature différente.
– Applications : routes et autoroutes, voies ferrées, pistes forestières...
- ✓ **La filtration** : maintien du sol ou d'autres particules soumis(es) à des forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles.
– Applications : routes, voies ferrées, barrages, tranchées drainantes, protection de rivages et de berges...
- ✓ **Le drainage** : collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles.
– Applications : drainage sous dallage, drainage sous remblai, drainage dans ISD*, ...
- ✓ **Le renforcement** : utilisation du comportement en résistance déformation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction.

- Applications : remblai sur sols compressibles, murs de soutènement, raidissement de talus, ...
- ✓ **L'étanchéité** : utilisation d'un géosynthétique afin de prévenir ou de limiter la migration de fluides
 - Applications : Bassins, ouvrages souterrains, ...
- ✓ **La protection** : prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné en utilisant un géotextile ou un produit apparenté aux géotextiles.
 - Applications : protection des géomembranes dans les diverses applications.
- ✓ **La lutte contre l'érosion de surface** : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles, afin d'éviter ou de limiter les mouvements du sol ou d'autres particules à la surface.
 - Applications : talus de déblai ; pente naturelles, ...
- ✓ **L'anti-fissuration** : utilisation d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles pour retarder les remontées de fissures en surface.
 - Applications : chaussées, aéroports...

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

a- les géotextiles :

Les géotextiles sont des produits tissés, non tissés, ou tricotés, perméables, fabriqués à base de polymères et utilisés dans les domaines de la géotechnique et du génie civil.

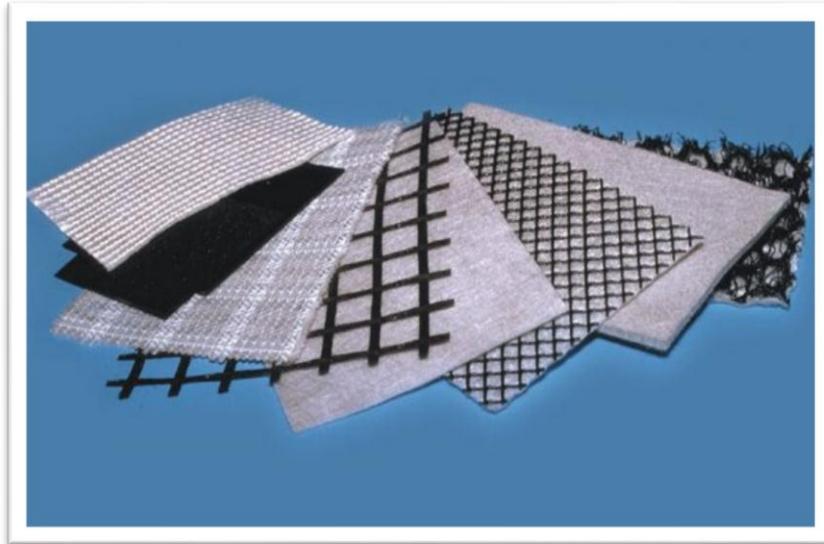


Figure 1.20: Les géotextiles

➤ **Les géotextiles non tissé :**

Ce sont des nappes 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.

Le thermo-sondage consiste à comprimer à chaud la nappe de fibres en la faisant passer entre deux rouleaux, il en résulte une soudure superficielle des fibres entre elles. La liaison chimique qui consiste à imprégner la nappe de fibre d'un liant est actuellement peu utilisée en raison de son coût.



Figure 1.21 : Les géotextiles non tissé

➤ **Les géotextiles tissés :**

Ce sont des produits par entrelacement, habituellement à angle droit, de deux ou plusieurs faisceaux de fils, de filaments, de bandelettes ou d'autres éléments. Les géotextiles tissés Sont largement utilisés avec une grande variété de sols, cohérents et non cohérents, pour contribuer à la formation d'un filtre naturel.

Cela permet la diffusion des surpressions interstitielles, de plus, grâce á ses caractéristiques de résistance et à un allongement contrôlé, ils facilitent les constructions utilisant des sols.

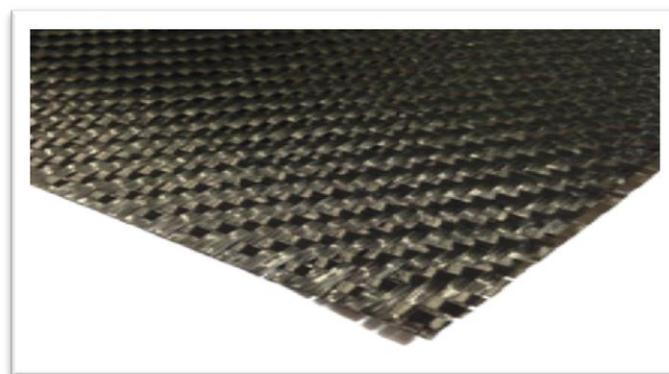


Figure 1.22 : Les géotextiles tissés

➤ **Les géotextiles tricotés :**

Ils sont constitués de mailles successives disposées en colonnes et en rangées. Ils sont très déformables. Ces produits sont très peu utilisés en génie civil.

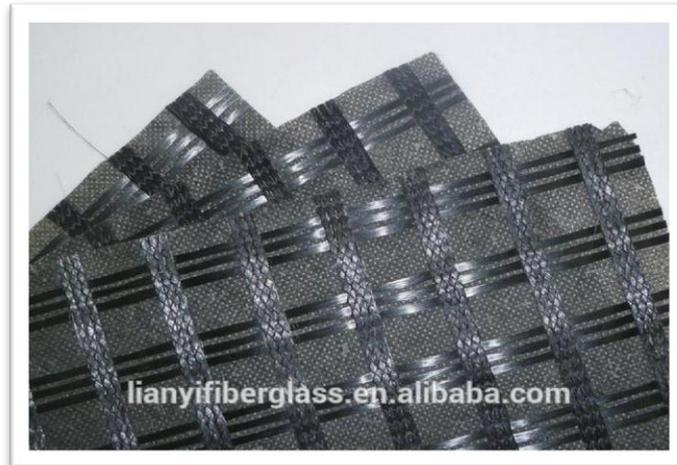


Figure 1.23 : Les géotextiles tricotés

b- les Géogrilles :

Les géogrilles sont classées parmi les produits géosynthétiques 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 Géogrilles ont une haute rigide et force plus que les autres géotextiles.



Figure 1.24: Les Géogrilles.

c- Les géomembranes :

Produit adapté au génie civil, mince, souple, continu, étanche aux liquides même sous les sollicitations de service. Dans l'état actuel des techniques, ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (< 1 mm), ni les produits dont l'étanchéité est assurée uniquement par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes.

Les géomembranes sont des produits adaptés au génie civil, minces, souples, continus, étanches aux liquides même sous des sollicitations de service.

Dans l'état actuel des techniques, ni les produits de faible épaisseur fonctionnelle (inférieure à un millimètre), ni les produits dont l'étanchéité est assurée uniquement par un matériau argileux, ne sont considérés comme des géomembranes.

Les matériaux de base utilisés sont de trois types :

- ❖ des thermoplastiques : polyéthylène haute densité (PE-HD), polyéthylène basse densité (PE-LD), very flexible polyéthylène (VFPE), polyéthylène chloré, polypropylène (PP), polychlorure de vinyle (PVC) souple...
- ❖ des élastomères : ter polymère éthylène-propylène-diène (EPDM), copolymère d'iso butylène et d'isoprène, polyéthylène chlorosulfoné, mélange PP+EPDM.
- ❖ des bitumes modifiés aux polymères (copolymère styrène-butadiène, copolymère éthylène-acétate de vinyle) ou non.

Les géomembranes sont généralement stockées sous forme de rouleaux de longueurs et largeurs différentes, pouvant varier de 1 m par 10 m pour les géomembranes bitumineuses à 7,5 m par 200 m pour les géomembranes en polyéthylène par exemple. Elles sont utilisées en génie civil, bâtiment, agriculture, environnement et industries.

Les utilisations les plus répandues sont :

- ❖ étanchéité des bassins d'eau .
- ❖ étanchéité des retenues collinaires .
- ❖ étanchéité des bassins de rétention anti-pollution .
- ❖ étanchéité de murs enterrés .

- ❖ barrière active des casiers de stockage de déchets .
- ❖ confinement de déchets liquides.

Lors de la réalisation d'un ouvrage nécessitant une géomembrane, le choix du matériau et de l'épaisseur de cette dernière dépend de plusieurs critères tels que la nature du support (béton, terrain argileux, etc.), le type de produit en contact (eau, hydrocarbure, produits chimiques, etc.) ainsi que la vocation de l'ouvrage (confinement, rétention permanente ou temporaire, etc.).

Elles sont souvent thermo-soudables pour réaliser les joints dans des conditions de qualité et de fiabilité optimales.

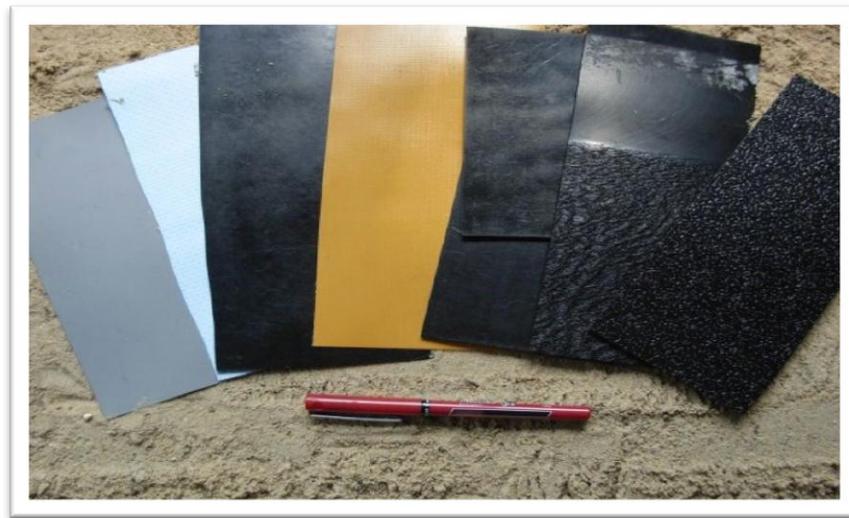


Figure 1.25 : Les géomembranes.

1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré les différents types de glissement qui existent dans la nature.

Les glissements de terrain sont des phénomènes hétéroclites, parfois difficiles à caractériser, pouvant avoir des conséquences humaines et économiques importantes.

Pour cela, il faut compte tenu de ces phénomènes et leur danger, et de prendre les précautions convenables pour détecter les zones instables afin de choisir les bonnes méthodes de stabilités et les meilleurs technique de confortements qui sont très nombreuses et variées

Chapitre 2

PRESENTATION DU CAS ETUDIÉ

2.1. Introduction :

La wilaya de Souk Ahras se situe à l'extrême est du pays, près de la frontière tunisienne, à 640 kilomètres d'Alger.

Elle est considérée comme l'une des plus importantes wilayas frontalières. Issue des wilayas de Tébessa et de Guelma, Souk Ahras s'est hissé au rang de wilaya, en vertu du découpage administratif de 1984.

Elle est limitée :



- ❖ Au nord-est par la wilaya de Tarf,
- ❖ Au nord-ouest par la wilaya de Guelma,
- ❖ Au sud par la wilaya de Tébessa,
- ❖ Au sud-ouest par la wilaya d'Oum El-Bouaghi,
- ❖ À l'est par la république tunisienne.

La wilaya de Souk Ahras occupe une superficie de 4360 km² et un périmètre de 413.5 km. Elle se subdivise en 10 daïras et 26 communes qui regroupent près de 454 000 habitants. Souk Ahras est distante de 97 km de l'aéroport international et du port de Annaba, elle est également à 40km de la frontière tunisienne par le poste frontalier d'El-Hadada.

D'après la carte de situation géographique de la wilaya de Souk Ahras elle est limité en longitude entre, $x_1= 7,282368999^\circ$, $x_2= 8,410148004^\circ$ et en altitude entre $y_1= 35,80545000^\circ$, $y_2= 36,46985200^\circ$.

2.2. Géologie régionale :

La feuille de Souk Ahras comprend une région accidentée où la complexité des phénomènes géologiques (notamment le diapirisme triasique) a contribué à la formation d'une topographie confuse d'où les grandes lignes sont absentes. Il en résulte une certaine difficulté à dégager et définir des unités géographiques nettes.

On peut cependant y reconnaître les régions naturelles suivantes :

- ❖ Au nord, le massif gréseux du Mahabouba qui s'étend depuis la région de la verdure, à l'ouest jusqu'à la limite orientale de la carte. Ce massif culmine à 1.303 m. au djebel el Madjène. Plus au sud, deux autres massifs gréseux de moindre importance, détachés du précédent par l'érosion, possèdent encore des sommets dépassant 1.200 m. ce sont au nord de Souk Ahras, le massif de djebel Bakhouch (1.207 m) et à l'W.N.W. de cette ville le massif plus étendu de djebel Rezgoum, djebel kelaia (1.286 mètres).
- ❖ Toute la partie N.W. de la feuille est occupée par le dôme triasique de la verdure dont les dépôts chaotiques (clac. Dolomitiques, gypse, cargneules, argiles bigarrés et psammites) constituent une région de faible relief où les oueds s'entaillent de profondes vallées (O.- Ranem).
- ❖ Symétrique, dans la partie S.W. de la feuille, s'étend le dôme triasique de Souk Ahras. Là encore les vallées encaissées, aux versants fréquemment gypseux (O.-Madjereda, O. Mengoub, O.-elhammem, O.-Djedra, O.-elAchrek), contribuent seules à accidenter le paysage.
- ❖ Les grès numidiens et les dépôts triasiques qui constituent les régions que nous venons de citer recouvrent à eux seuls à peu près les 3/5 de la feuille de Souk-Ahras laminés par le mouvement ascensionnel des sédiments de Trias où masqués par ceux transgressifs du Numidien, les dépôts crétaqués *et*

éocènes de la région n'occupent plus que d'assez faibles surfaces isolées les une des autre.

- ❖ Les grés numidiens et les dépôts triasiques qui constituent les régions que nous venons de citer recouvrent à eux seuls à peu près les 3/5 de la feuille de Souk-Ahras laminés par le mouvement ascensionnel des sédiments de Trias où masqués par ceux transgressifs du Numidien, les dépôts créacés et éocènes de la région n'occupent plus que d'assez faibles surfaces isolées les une des autre.
- ❖ Dans la région S.-W, de la feuille cependant, où le Trias et le numidien sont absent, les dépôts sénoniens s'étalent très largement. Ils constituent, grâce aux plis imbriqués qui les ont accidentés lors des mouvements Pyrénées, une série de chainons parallèles formés par les calcaires à Incérâmes du sénonien supérieur. Ce sont, du Nord au Sud, les chainons du Kef Sed Bennouir – Kef-El-Hammam, celui du Koudiat-el-Hadria – KoudiatMhaït-el-Adjerat – Djebel.-Bou-Arous – Kef-el-Guerguit, celui du Djebel.-Tebaga – Kef-Senebsa et celui de Djebel.-Garboussa – Kef.-Djeffara – Kef-el-taïr.
- ❖ Au Nord de ce dernier, et surmontant en concordance les dépôts sénoniens, s'étalent les sédiments de l'Eocène inférieur qui constituent le massif calcaire du Djebel.-Salfat-el-Aoueid, du Djebel.-el-Koutz et du KoudiatGulia.
- ❖ Dans le prolongement des chainons sénoniens sur-cités, mais séparés d'eux par 15 km de dépôts numidiens, on retrouve, dans-le coin N.-E.de la feuille, le même type de structure s'appliquant ici aux dépôts marneux et calcaire de l'océane inférieur. Le chapitre consacré à la géologie a montré que la région étudiée présente une géologie très hétérogène, caractérisée par des formations sédimentaires dont l'âge le plus ancien est le Trias jusqu'au Quaternaire, constituée généralement par des calcaires, des grés, des marnes, des cailloutis et des alluvions. Elle représente une zone charnière entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud.

Présentation du cas étudié

Axes routiers touchés par le phénomène de glissement:

- **RN 81** représentant l'axe Est-Ouest de la limite de wilaya de Guelma à la limite territoriale Alger-Tunisienne., pk 26+000
- **RN 82** et **RN 20** au Nord- Est de la wilaya. Pk 148+000 et pk 164+000
- **RN 16** représentant l'axe Nord-Sud. , évitement Ain Synour
- **RN 81B. pk9+000**

Parmi tous ces points nous avons choisi le point de glissement sur RN16 évitements d'Ain Synour parce que ce dernier est important pour faire l'étude de notre mémoire.

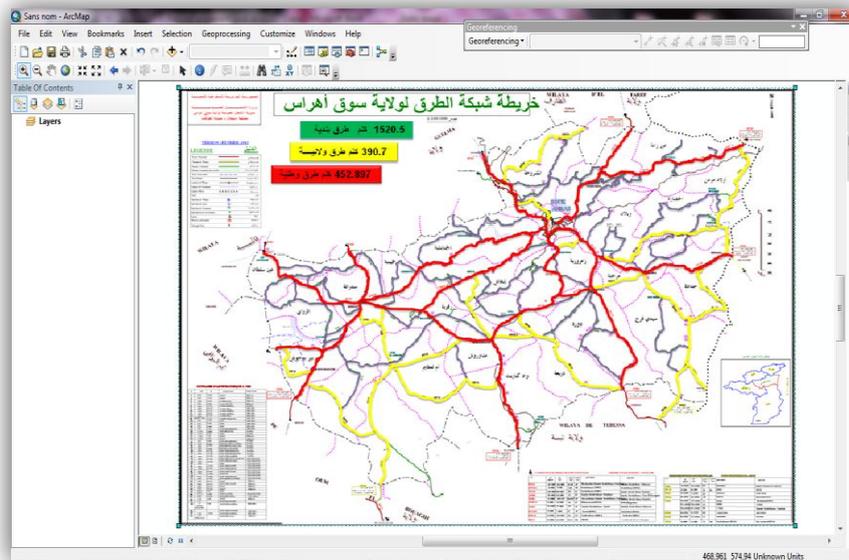


Figure 2.1 : Les routes nationales (Rn)

2.3. Localisation du site :

Le site se trouve au nord de la wilaya de Souk-Ahras au niveau du pk 02+050 de l'évitement de la ville d'Ain Synour daïra de Mechrouha

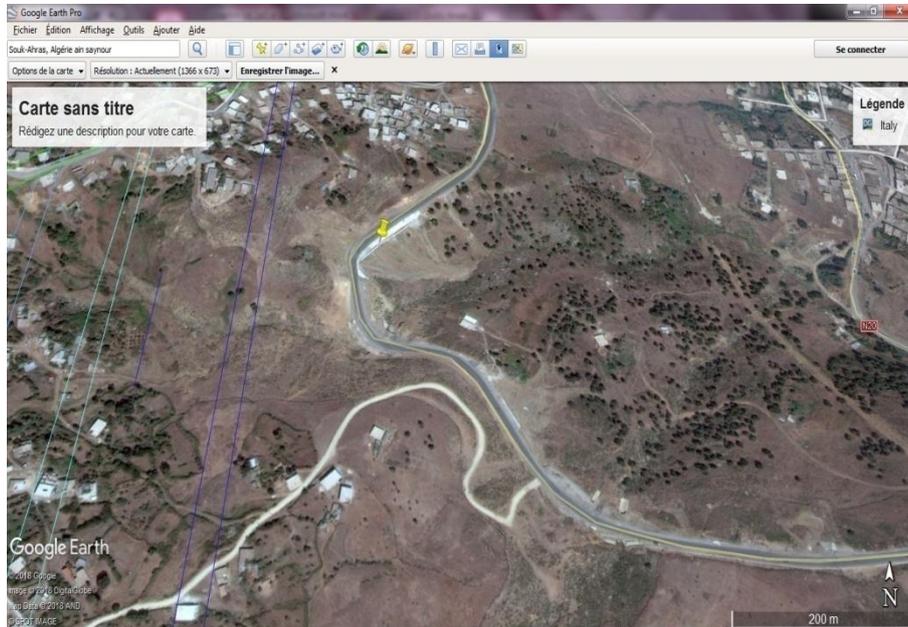


Figure.2.2 : Localisation de la zone du glissement.

2.4. Géologie locale :

La composition géologique du sol est caractérisée principalement par des formations datant du QUATRIÈME ANCIEN, ce sont des formations géologiques sédimentaires anciennes, nappes tellienne, et numidienne (oligocène supérieure, miocène inférieur) composé d'une alternance de grès argiles et marnes.

2.5. États de dégradations :

Les glissements de terrains qui affectent la zone d'Ain Synour (w) de Souk-Ahras se caractérisent par des affaissements et des décrochements au niveau de la chaussée côté, l'affaissement est sur une longueur de 40m, et une hauteur de 2,50m a engendré l'effondrement total du talus de route



Figure.2.3 : Affaissement de la chaussée.

2.6. Causes du glissement :

Les causes du glissement du terrain objet de cette étude sont dues principalement aux facteurs suivants :

- ❖ la nature géologique du terrain qui est à dominance argile marneuse très graveleuse a sableuse, ces formations sont caractérisées par une grande perméabilité.
- ❖ la présence d'un réservoir naturel d'eau (affleurement rocheux de calcaire gréseux).
- ❖ Hétérogénéité verticales de la composition lithologique du terrain, caractérisée par des formations des eaux de surface provocante ainsi les phénomènes de glissements en contre bas de route.

2.7. Début du confortement du site :

Suite au glissement, qui a engendré la coupure de route, la **DTP** de Souk-Ahras à prés plusieurs dispositions pour résoudre ce problème.

- ❖ La fermeture de la route a la circulation et mettre une signalisation adéquate afin de prévenir les usagers empruntant cet Axe.
- ❖ La DTP a sollicité les services de l'**ENGOA** qu'est une entreprise spécialisée dans le traitement et le confortement du glissement, cette dernière a travaillé en collaboration avec le laboratoire LTPEST –ANNABA afin d'effectuer une étude géotechnique approfondie, pour déterminer les causes du glissement et proposé les solutions techniques à ce phénomène.

2.7.1. Rôles des entreprises :

- ❖ Fermeture de l'axe touché par le glissement et déviation de la circulation vers l'autre route qu'est la **RN 16**.
- ❖ Faire une campagne de reconnaissance géotechnique en faisant.
- ❖ Deux (02) sondages carottés effectuer à l'aide d'une sondeuse géotechnique, qui schématisent les lithologique.
- ❖ Deux (02) piézomètres d'observations de type **CAZAGRAND** ouvert, a été installé pour suivre la variation des niveaux de la nappe.

2.7.2 Le but de l'entreprise :

L'entreprise est chargée de l'étude et de la réalisation, elle exploite le rapport géotechnique du laboratoire pour proposer les solutions adéquates à savoir :

- ❖ Reconstitution de la chaussée au niveau des sections affectées par le glissement en introduisant une nouvelle structure.

Présentation du cas étudié

- ❖ Emplacement de mur de soutènement en béton armé sur des pieux profonde jusqu'au 30m.
- ❖ Réalisation de tranché drainante en géotextile longitudinales à l'accotement amont de la route pour le drainage des eaux d'infiltration.
- ❖ Réalisation de fossés bétonnés de crête pour la collecte et le drainage des eaux de ruissellement.
- ❖ Reboisement de l'ensemble des sections en, mouvement par des plantations a longues racines qui s'adaptent aux conditions climatiques des régions.

Ces arbres permettent à la fois la protection des sols de l'érosion, le maintien et la consolidation des terres par les racines et l'absorption des eaux souterraines.

Travaux de confortement (ENGOA) :



Figure2.4 : Travaux exécutés par l'entreprise au niveau de la zone de glissement d'Ain Synour.

Dans cette partie, il nous est apparu utile de présenter quelques notions sur les systèmes d'information géographiques qui nous avons utilisé pour présenter les certes de notre projet.

2.8. Définition de système d'information géographique (SIG) :

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Un système d'information géographique est aussi un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées.

C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Un système d'information géographique, est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision.

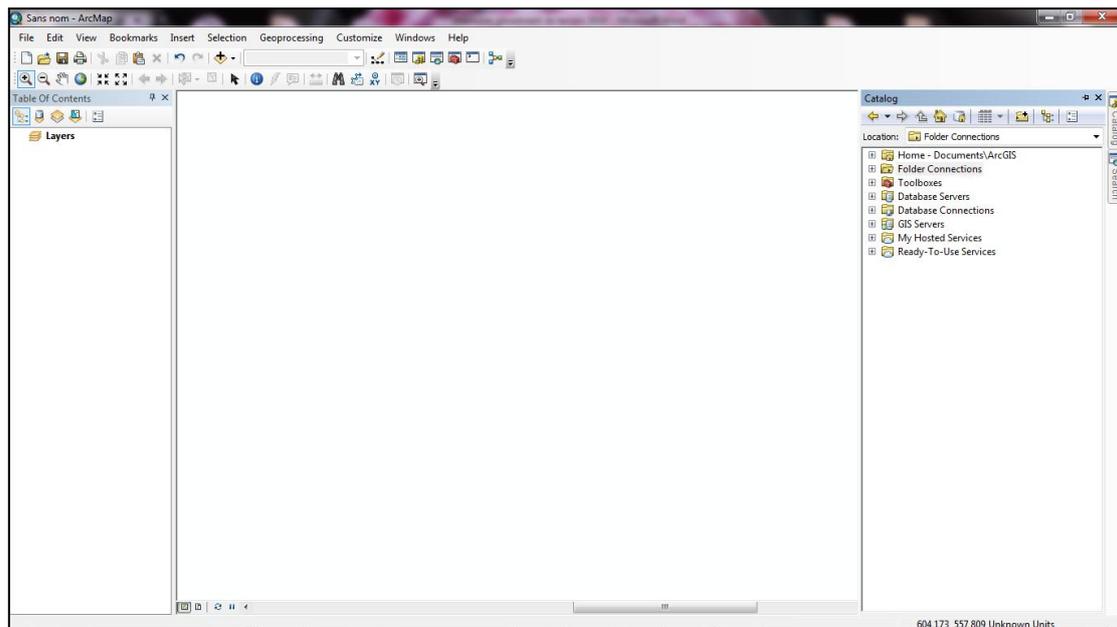


Figure2.5 : Fenêtre d'entrée des données de SIG.

Un SIG répond à 5 fonctionnalités (les 5 A) :

- ❖ Abstraction: modélisation de l'information.
- ❖ Acquisition: récupérer l'information existante, alimenter le système en données.
- ❖ Archivage: stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement.
- ❖ Analyse: réponses aux requêtes, cœur même du SIG,
- ❖ Affichage: restitution graphique.

En d'autres termes, un SIG est un environnement informatisé d'analyse d'une information spatiale numérisée.

2.8.1 Fonctionnalités d'un SIG :

Un **SIG** complet, permettra non seulement de dessiner puis tracer automatiquement le plan, mais en outre :

- ❖ De disposer les objets dans un système de référence géographique, de les convertir d'un système à un autre.
- ❖ De rapprocher entre elles deux cartes (deux plans) de sources différentes, de faciliter leur superposition.

Présentation du cas étudié

- ❖ De corriger certains contours de la moins fiable en reprenant les coordonnées correspondantes de la plus fiable.
- ❖ D'extraire tous les objets géographiques situés à une distance donnée, d'un carrefour, d'une route ou des rives d'un lac.
- ❖ D'extraire tous les objets situés dans un périmètre donné comme c'est présenté dans la figure.

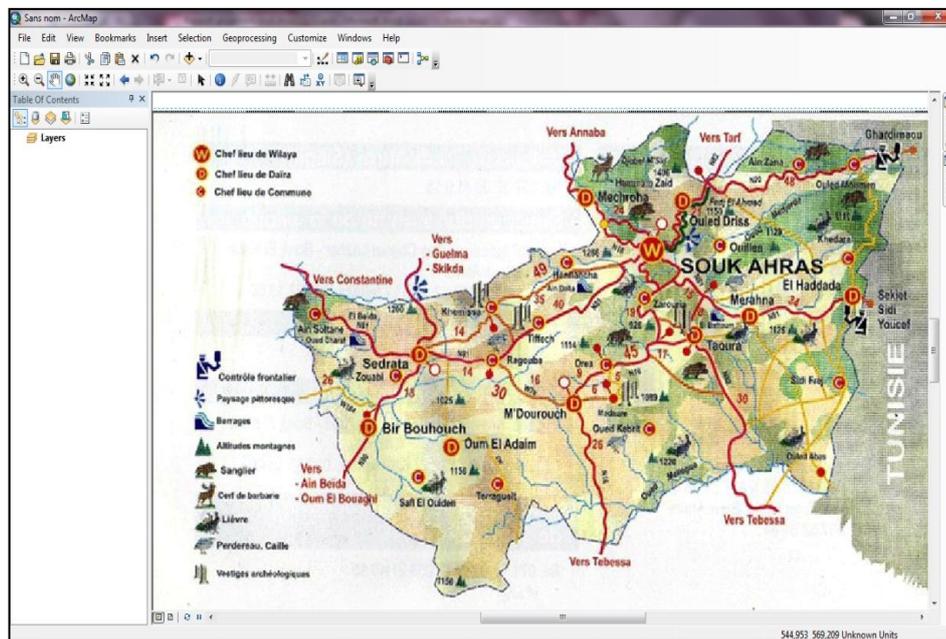


Figure .2.6 : Exemple de sélection.

Chapitre 3

DESCRIPTION DU CODE DE CALCUL

3.1. Les méthodes numériques en géotechnique :

3.1.1. Introduction :

Depuis une vingtaine d'années, encouragées par l'augmentation exponentielle de la puissance de calcul des ordinateurs et une diminution identique des coûts d'accès et de mise en œuvre, les méthodes numériques ont connu un développement très important dans les bureaux d'études et les centres de recherches en géotechnique. Leur utilisation est aujourd'hui très courante et la conception de grands projets passe forcément par des analyses de ce type afin de vérifier la stabilité des ouvrages en interaction avec leur environnement, de contrôler que les valeurs des déplacements et des contraintes soient admissibles et d'aider au dimensionnement des structures.

Il existe plusieurs types de méthodes numériques parmi lesquelles on citera :

- ❖ Les méthodes de type « éléments limites » (boundary methods), pour lesquelles l'intérieur de la masse rocheuse ou du sol est représenté mathématiquement comme un milieu continu infini ou fini suivant que la frontière est ouverte ou fermée.
- ❖ Les méthodes des domaines (Domain méthodes), pour lesquelles l'intérieur de la masse rocheuse ou du sol est divisé en éléments géométriques simples, chacun étant doté de propriétés géométriques et mécaniques. Le comportement collectif et l'interaction de ces éléments modélisent le comportement global et plus complexe de la masse.

Parmi les méthodes des domaines, les plus utilisées sont :

- ❖ La méthode des éléments finis et la méthode des différences finies, qui traitent les milieux comme un milieu continu.
- ❖ La méthode des éléments distincts, qui modélise chaque bloc du massif comme un élément unique.

3.1.2. La méthode des éléments finis :

La méthode des Eléments Finis est une technique de calcul numérique qui consiste à discrétiser en sous-ensembles un objet (ou une partie d'un objet) dont

on veut étudier certaines de ses propriétés. Ces sous-ensembles sont appelés éléments. Ces derniers sont connectés entre eux par des nœuds. La discrétisation de l'objet se nomme le maillage. Ainsi notre objet est représenté par des fonctions définies sur chaque élément. Ces fonctions locales ont l'avantage d'être plus simple que celles que l'on pourrait éventuellement utiliser pour représenter la totalité de l'objet. Ce sont en particulier des polynômes ou des fonctions harmoniques.

L'étape qui suit consiste alors à analyser la réponse mécanique associée à chaque élément en construisant des matrices de rigidité élémentaires et du vecteur chargement. Une fois cette tâche réalisée, on assemble le tout dans la matrice de rigidité globale. On dispose donc d'une équation matricielle qui relie les déplacements nodaux aux chargements nodaux pour l'intégralité de l'objet (la structure). Il ne reste ensuite qu'à appliquer les conditions aux limites.

A partir de là, on peut résoudre cette équation matricielle dont les inconnus sont les déplacements nodaux. Ce que l'on exprime parfois en des termes telles que: minimiser la fonctionnelle associée à l'équation différentielle qui gouverne le problème.

3.2. Code plaxis :

3.2.1. Aperçu historique :

Le développement du logiciel PLAXIS a commencé en 1987 à l'université technique de Delft à l'initiative du département allemand des travaux publics et gestion des eaux. L'objectif initial était réservé à développer un code d'éléments finis en 2D facile à manier permettant l'analyse des talus en sols mous implantés aux bords des rivières situées dans les plaines Hollandaises.

Quelques années plus tard, PLAXIS a été étendu pour couvrir d'autres domaines de la géotechnique. Avec l'extension des différentes activités géotechniques, une compagnie nommée PLAXIS b. v. a vu le jour en 1993. En 1998, la première version PLAXIS pour Windows a été lancée. En même temps le module kernel pour le calcul en 3D a commencé de connaître son développement. Plusieurs années de développement, il y a eu le lancement en 2001 du programme tunnel PLAXIS 3D.

Le but principal de PLAXIS est de pourvoir un outil adéquat pour une analyse pratique dans le domaine de la géotechnique pour des utilisateurs qui ne soient nécessairement des spécialistes en calcul numérique. Souvent, Les ingénieurs considèrent les calculs non-linéaires par éléments finis sont laborieux et consomment beaucoup de temps. Le groupe de recherche et de développement de PLAXIS ont, à cet effet, recherché à mettre à la disposition des utilisateurs un logiciel facile à utiliser, basé sur des procédures théoriques robuste

3.2.2. Présentation du code plaxis :

PLAXIS 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.

Conçu par des géotechniciens numériques, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo statique 2D.

Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard, avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangle à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Du point de vue pratique le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volume réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options par défaut (conditions aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à

réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné.

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) :

❖ **Input :**

Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et les conditions initiales. La génération des conditions initiales est faite dans un menu spécifique du programme Input (mode conditions initiales). La description se concentre tout d'abord sur la création d'un modèle géométrique et d'un maillage d'éléments finis (mode de création géométrique).

❖ **Calculs :**

Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis.

❖ **Output :**

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis

❖ **Curves :**

Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge-déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

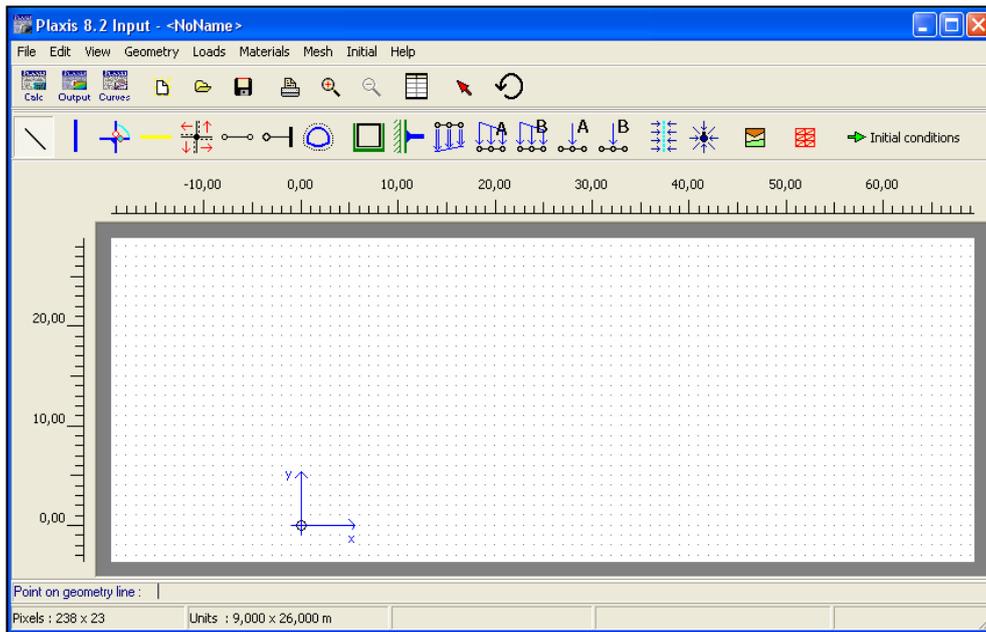


Figure 3.1 : Fenêtre d'entrée des données de Plaxis.

3.2.3. Les modèles de comportements utilisés par PLAXIS :

Un des objectifs de Plaxis est de fournir à l'utilisateur un code d'élément finis qui soit à la fois robuste et convivial, permettant de traiter des problèmes géotechniques réels, dans un délai raisonnable en utilisant des modèles de comportement de sols dont les paramètres puissent être déterminés à partir d'une étude géotechnique normale, partant du modèle élastique plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement des sol.

En ce sens, Plaxis peut apparaître comme une « règle à calculé » de l'ingénieur Géotechnicien, ou le micro-ordinateur a remplacé la règle.

C'est pourquoi les différents modèles de comportement utilisés dans Plaxis sont des modèles qui peuvent apparaître simples, voir simplistes, mais qui sont efficaces quand ils sont utilisés dans des cas adaptés.

Le but de ce texte est de présenter les caractéristiques de ces modèles du point de vue d'un utilisateur. Ce texte se veut alors un complément au « Matériel

model manuel version 8 » du manuel de référence de Plaxis, avec le but d'orienter l'utilisateur vers un modèle adéquat pour le cas de figure à traiter, et de l'aider dans la détermination des données d'entrer.

Pour traiter un problème de soutènement (parois moulées, palplanches, etc.....), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élasto-plastique et le model de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas : on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élasto-plastiques de coefficient de raideur. Mais pour traiter une construction de remblais sur sol mous, avec chargement par étape et consolidation, il faut tenir compte de l'écrouissage. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le soft-soil-model qui prends en compte Cette évolution du matériau. Pour un calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation : dans ce cas un modèle élasto-plastique peut être justifié

Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- 1) Quel est le comportement principal à modéliser ?
Utiliser un modèle qui décrivent ce comportement
- 2) Interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation.
- 3) En ce sens, la modélisation ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

3.2.3.1. Le modèle élastique linéaire :

Le modèle élastique linéaire utilisé dans Plaxis est classique, il représente la loi de Hook relative à l'élasticité linéaire isotrope. Les données à faire entrer sont : les paramètres de rigidité élastique, le module de Young E et le coefficient de Poisson ν .

La relation entre le module de Young et les autres modules est donnée par les relations qui suivent :

Le module de cisaillement G :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(1)$$

Le module de compressibilité K :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \dots\dots\dots (2)$$

Le module œnométrique E_{oed} :

$$E_{\text{oed}} = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \dots\dots\dots (3)$$

Le modèle linéaire élastique peut être utilisé surtout pour modéliser des éléments de structure en béton ou en métal en interaction avec le sol et pour certains problèmes de mécanique des roches.

3.2.3.2. Le modèle de Mohr Coulomb (MC) :

Le modèle de Mohr-Coulomb représente le comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage, il est généralement utilisé comme première approximation du comportement du sol, les données nécessaires pour ce modèle sont :

- ❖ Le module de Young E
- ❖ Le coefficient de Poisson ν
- ❖ La cohésion c
- ❖ L'angle de frottement ϕ
- ❖ L'angle de dilatance ψ

Qui sont des paramètres classiques de la géotechnique, souvent fournis par des essais de laboratoires.

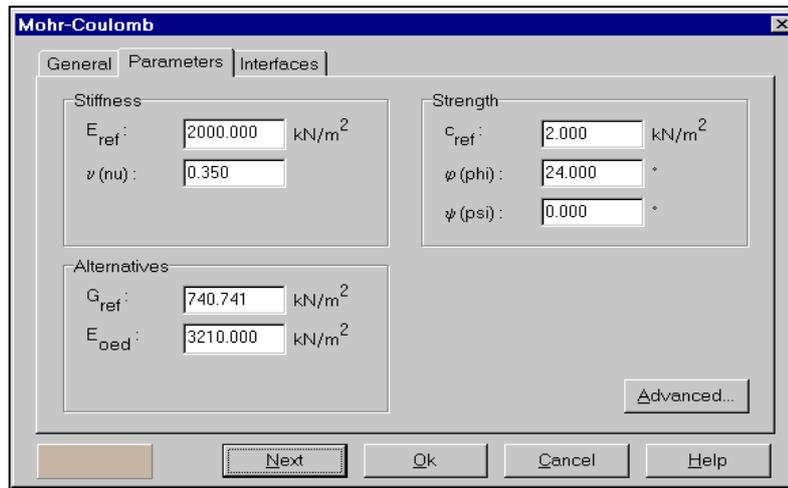


Figure 3.2 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

a) Le module de Young :

Plaxis utilise le module d'Young comme module de déformation de référence dans le modèle élastique et le modèle de Mohr-Coulomb, mais d'autres modules de déformation sont également considérés. Un module de déformation à la dimension d'une contrainte (force par unité de surface) il varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Les valeurs de raideur adoptées dans un calcul demandent une attention particulière parce que la plupart des géomatériaux présente un comportement non linéaire dès le début du chargement $|\sigma_1 - \sigma_3|$

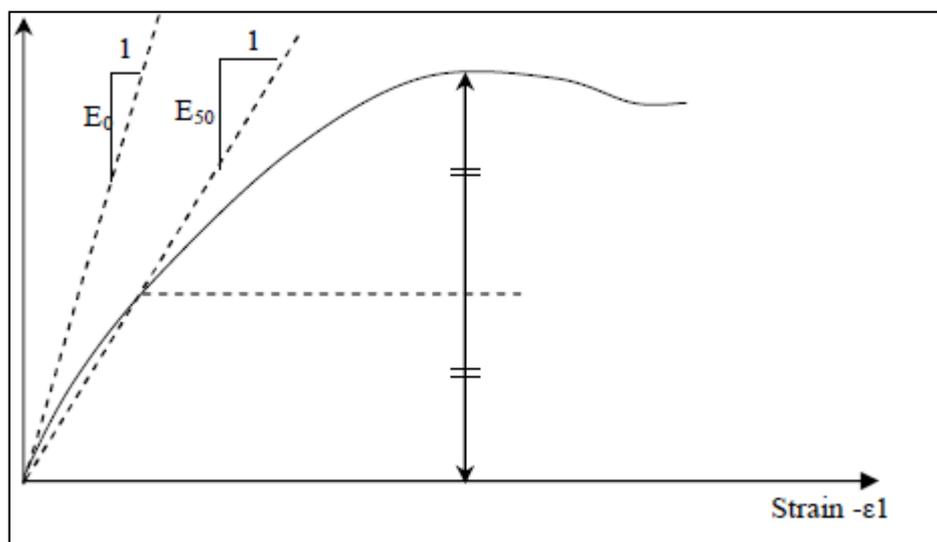


Figure.3.3 : Définition de E_0 et de E_{50} .

En mécanique des sols, la pente initiale est appelée E_0 et le module sécant à 50% de la résistance en compression est noté E_{50} (voir Fig. 3.3). Pour des argiles très sur consolidées et quelques roches avec un large domaine élastique, il est réaliste d'utiliser E_0 alors que pour les sables et les argiles normalement consolidées, il est préférable de prendre E_{50} .

b) Le coefficient de poisson :

Des essais triaxiaux standards drainés peuvent montrer une diminution significative de volume au tout début du chargement et révéler ainsi une faible valeur du coefficient de Poisson (ν_0).

Dans certains cas, comme des problèmes de déchargement particuliers, il peut être réaliste d'employer une valeur initiale aussi faible, mais en général, pour le modèle de Mohr- Coulomb, l'utilisation d'une valeur plus élevée est recommandée.

On conseille de prendre une valeur de 0.3 à 0.4 pour le coefficient de poisson. Celle-ci est assez réaliste pour l'application du poids propre dans la procédure du chargement gravitaire (K_0). Pour des sols incompressibles, le coefficient de poisson s'approche de 0.5 sans que cette valeur soit utilisable.

c) La cohésion :

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

d) l'angle de frottement interne φ :

L'angle de frottement (φ) est entré en degrés. Des angles de frottement élevés, obtenus parfois pour des sables denses, augmenteront de manière substantielle la difficulté numérique des calculs plastiques.

Le temps de calcul varie exponentiellement en fonction de l'angle de frottement. Par conséquent, les angles de frottement élevés devraient être évités lors des calculs préliminaires pour un projet. Le temps de calcul deviendra important si des angles de frottement supérieurs à 35 degrés sont utilisés.

e) L'angle de dilatance ψ :

L'angle de dilatance (ψ), est donné en degrés. Sauf pour les couches très sur consolidées, les sols argileux ne présentent aucune dilatance ($\psi = 0$). La dilatance d'un sable dépend de sa densité et de son angle de frottement. Pour des sables siliceux, un ordre de grandeur est ($\psi \approx \varphi - 30^\circ$). Dans la plupart des cas toutefois, l'angle de dilatance est nul pour des valeurs φ inférieures à 30° .

Une valeur négative faible pour ψ n'est réaliste que pour des sables extrêmement lâches.

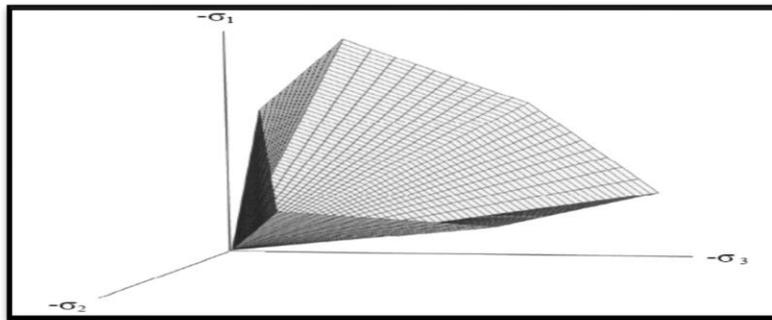


Figure3.4. : Surface de charge de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes principales ($c=0$)

f) les paramètres avancés :

Les paramètres avancés de Mohr – Coulomb concernent l'augmentation de la rigidité et de la cohésion avec la profondeur, ainsi que la suppression des tractions.

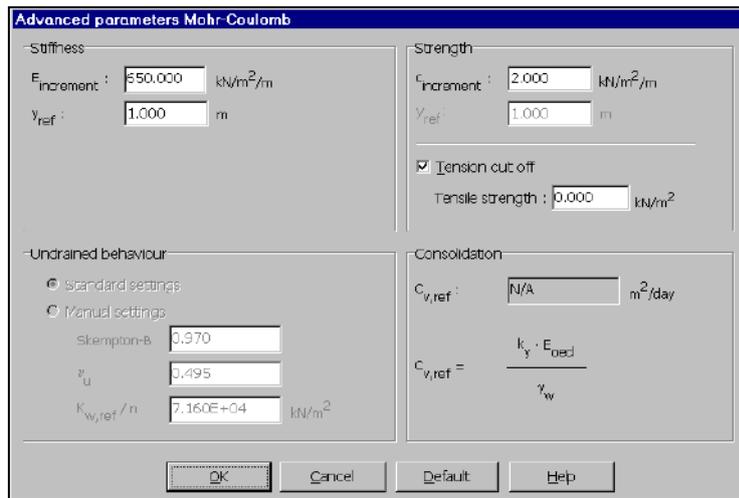


Figure .3.5 : Fenêtre des paramètres avancés de Mohr-Coulomb.

3.3. Conclusion:

L'objectif avoué dans ce chapitre était d'introduire le lecteur à la méthode numérique la plus utilisée :

L'utilisateur doit se concentrer sur deux choix : l'un est inhérent à la géotechnique en général, l'autre concerne la simulation numérique.

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans PLAXIS n'est pas différente d'un choix de paramètre de 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 des paramètres sont différents dans leurs expression, mais toujours reliés à des paramètres géotechnique classiques. Le paramètre le moins courant est vraisemblablement l'angle de dilatance.

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

Chapitre 4

*MODÉLISATION
NUMÉRIQUE*

4.1 Glissement et stabilisation du site :

4.1.1 Introduction :

Dans cette partie, seront présentés le glissement et la stabilisation du talus endommagé, déjà abordés dans le « **Chapitre 2** ».

Une présentation des évènements du site, numériquement modélisée dans logiciels : PLAXIS 2D.

La modélisation comporte plusieurs modèles propres à chaque situation du talus, cités ci-dessous :

- ❖ Avant glissement : représente l'état initial du talus, avant son glissement.
- ❖ Après glissement : application des surcharges sur le talus
- ❖ Renforcement du terrain naturel : excavation de la masse éboulée et renforcement du terrain naturel.

4.1.2. Caractéristiques :

Tableau 4.1 : Caractéristiques géotechniques des matériaux

Paramètres	Nom	remblai	alluvions	marnes	murs de soutènement	Unité
Modèle du matériau	Model	M-C	M-C	M-C	M-C	-
Type de comportement	Type	drainé	Drainé	Non drainé	Drainé	-
Poids volumique sec	γ_{unsat}	16	17	16	23	KN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	20	20	18	23	KN/m ³
Perméabilité horizontale	K_x	1	1	1,00E-03	1	m/day
Perméabilité verticale	K_y	1	1	1,00E-03	1	m/day
Module de Young	E_{ref}	8000.000	1,300E+04	2000,000	1,800E+04	KN/m ³
Coefficient de poisson	ν	0,3	0,3	0,35	0,25	-
Cohésion	C_{ref}	1	1	2,000	50	KN/m ³
Angle de frottement	ϕ	23	31	24	35	°
Angle de dilataance	Ψ	0	1	0	5	°

4.1.3. Début de la modélisation :

4.1.3.1 .avant glissement :

La géométrie du modèle étudié est représenté sur la figure 4.1. La hauteur du talus $H=6\text{ m}$, la pente $\beta=30^\circ$.

Le talus étudié se compose de trois couches de sol :

- ❖ Couche 1: Remblai
- ❖ Couche 2: Alluvion
- ❖ Couche 3: Marne

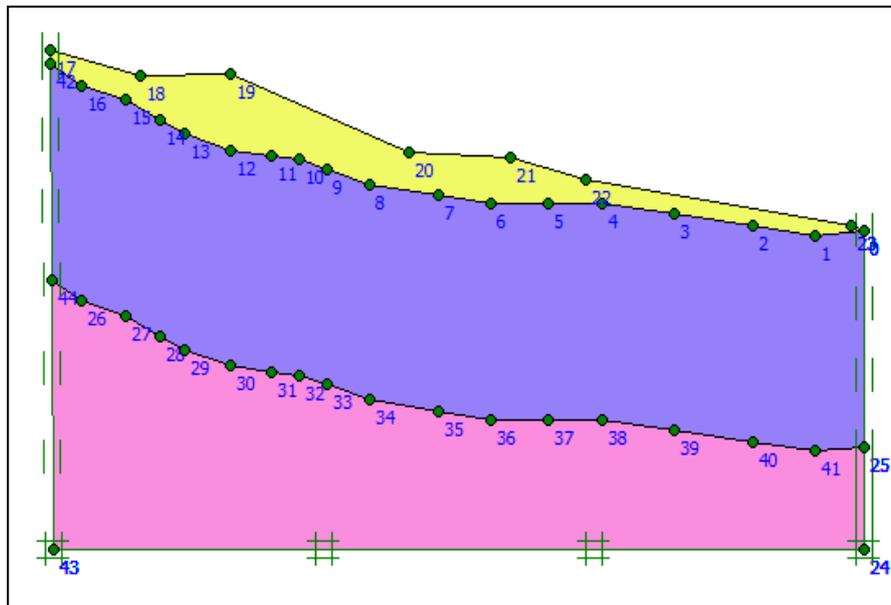


Figure 4.1 Géométrie du modèle dans plaxis 2D

On règle la finesse du maillage (Global Coarseness) sur « Coarse », le maillage est présenté sur la figure 4.2.

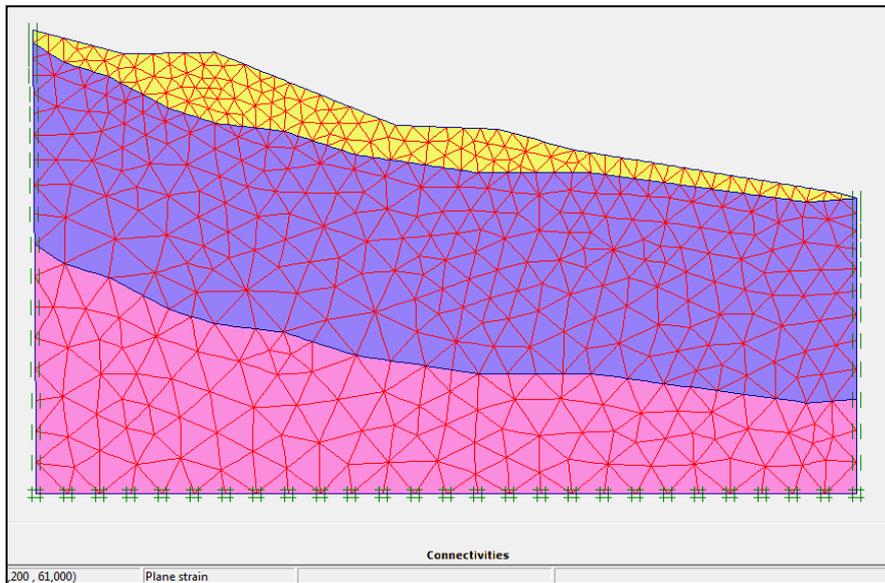


Figure 4.2 : Maillage du modèle dans plaxis 2D

La fonction initial conditions est utilisée pour définir le poids volumique de l'eau et une ligne phréatique générale.

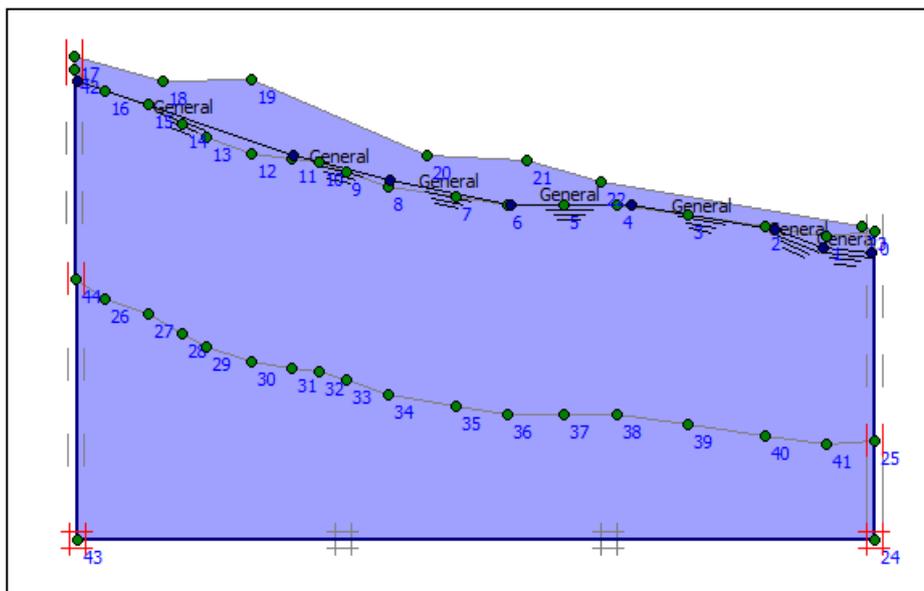


Figure 4.3 : Condition hydraulique dans plaxis 2D

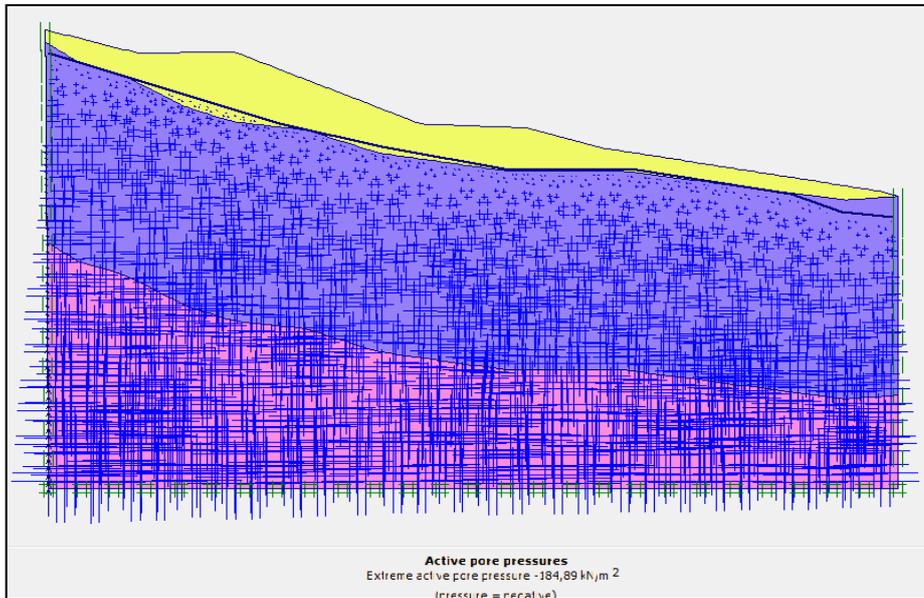


Figure 4.4 : Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D

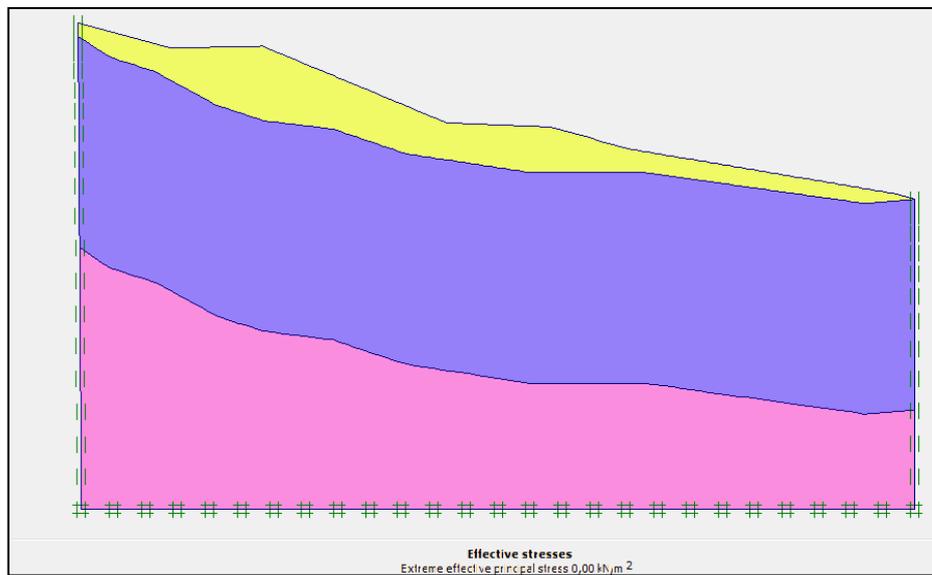


Figure 4.5 : Génération des contraintes effectives initiale dans plaxis 2D

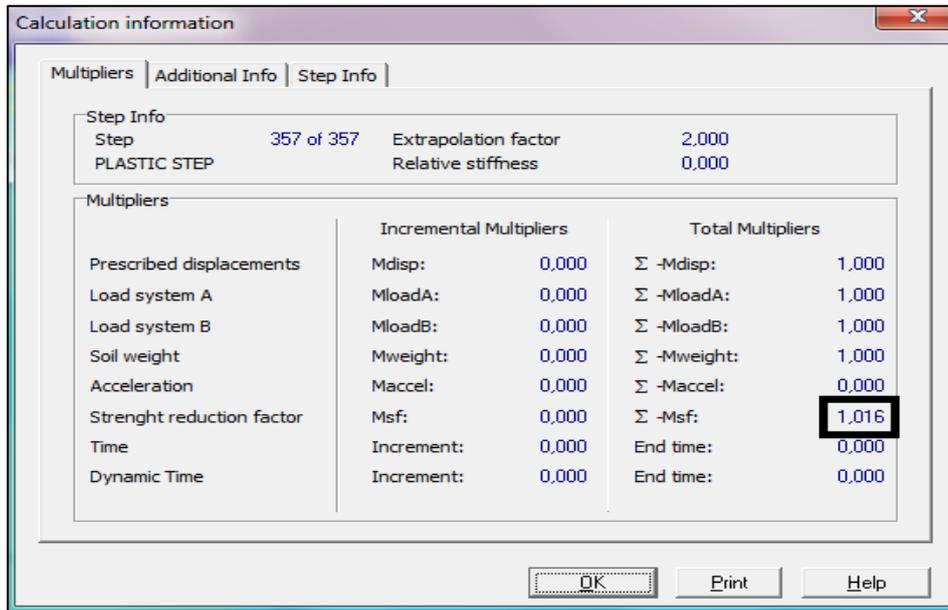


Figure 4.6 : Coefficients de sécurité dans plaxis 2D.

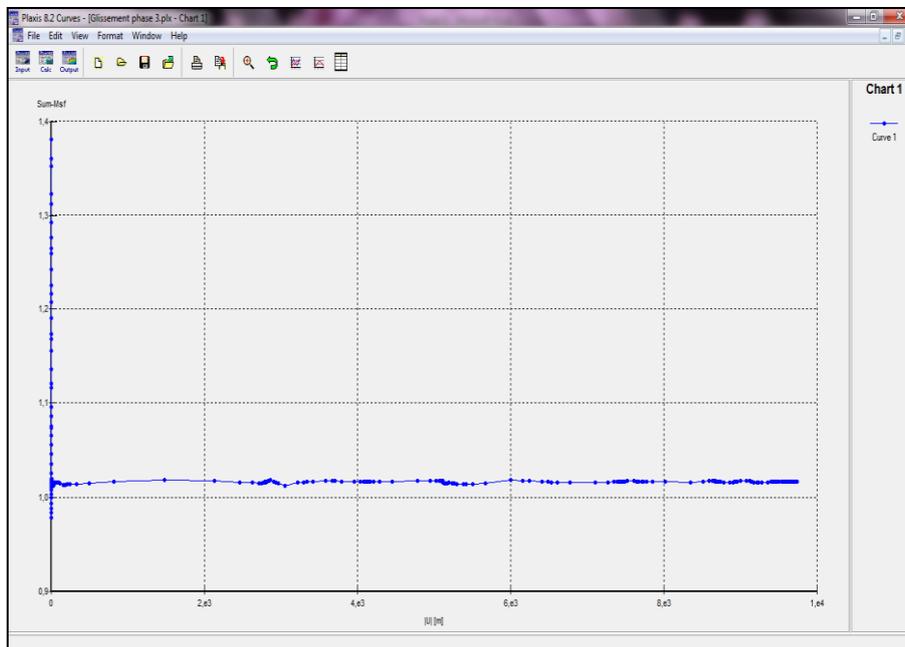


Figure 4.7 : La courbe du coefficient de sécurité

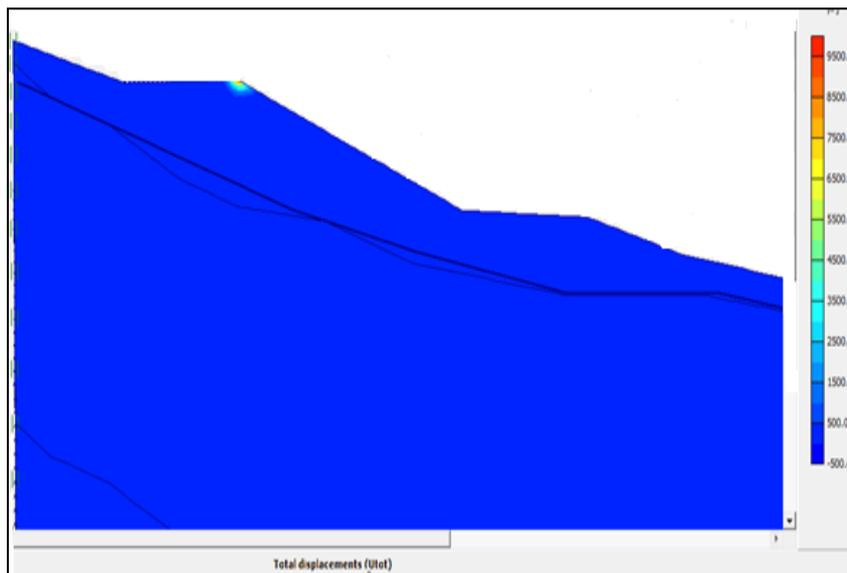


Figure 4.8 : Les déplacements totaux dans plaxis 2D.

4.1.3.2. Après glissement :

- ❖ **Application des surcharges :** dans PLAXIS, les surcharges seront représentées par des surcharges dynamiques.

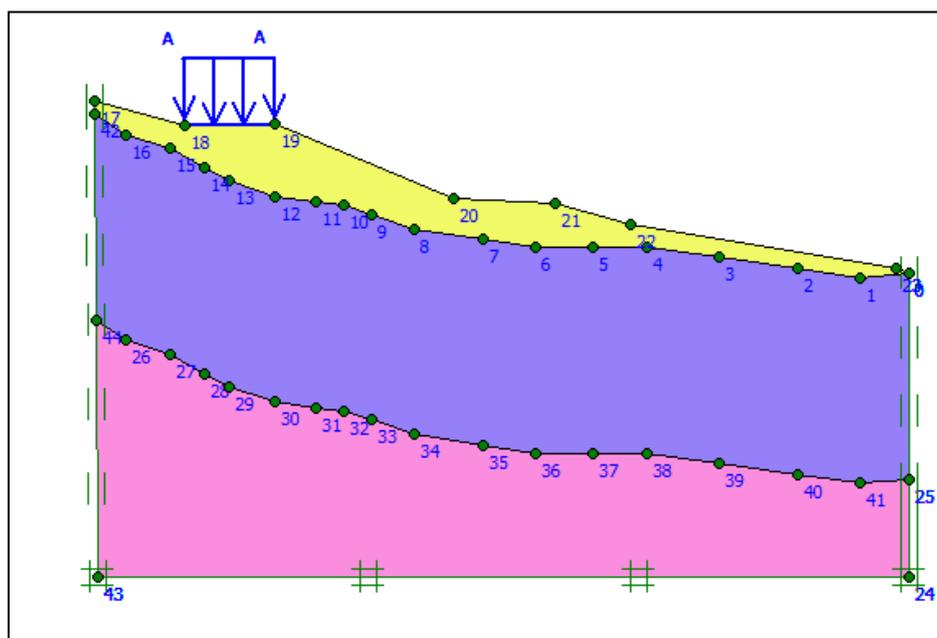


Figure 4.9 : Géométrie du modèle dans plaxis 2D.

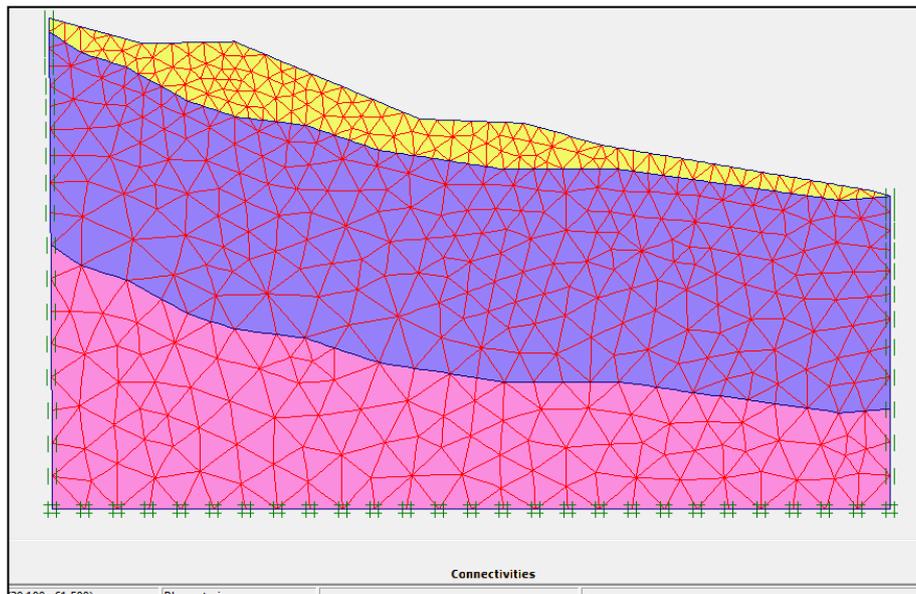


Figure 4.10 : Maillage du modèle dans plaxis 2D.

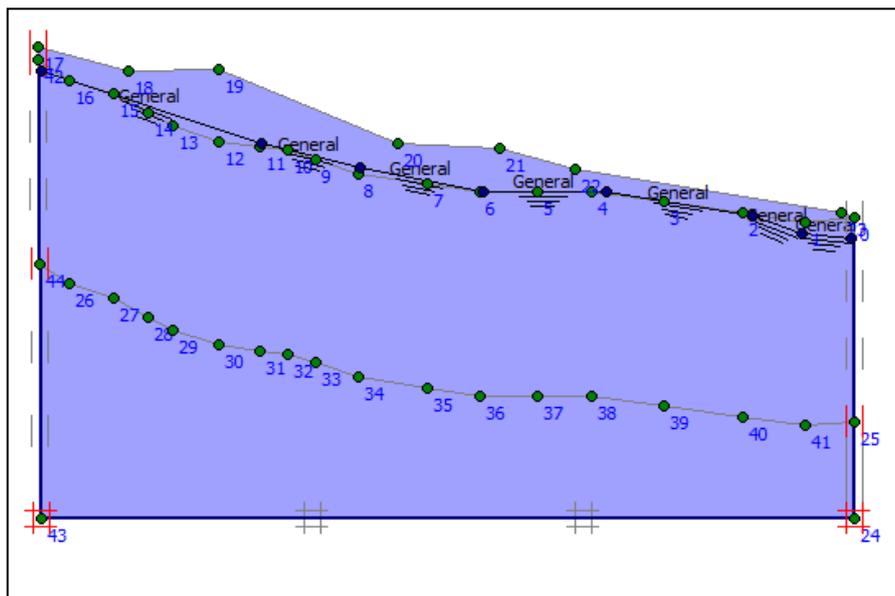


Figure 4.11 : Condition hydraulique dans plaxis 2D.

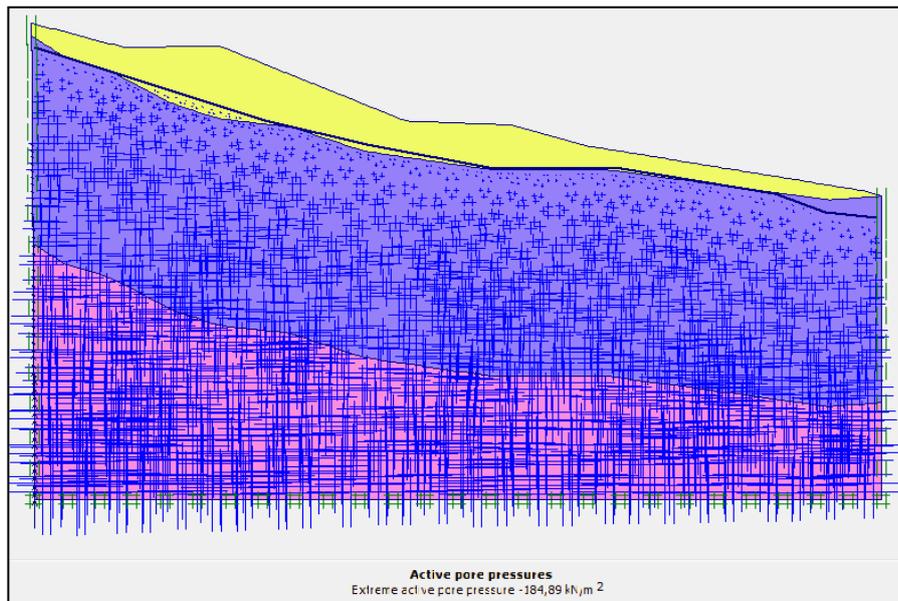


Figure 4.12 : Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D.

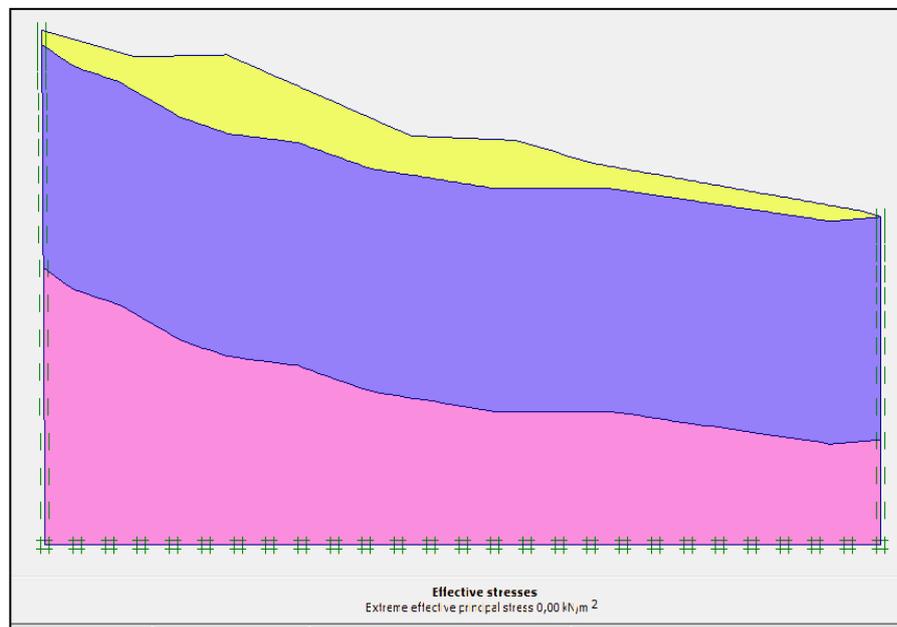


Figure 4.13 : Génération des conditions effectives dans plaxis 2D.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	Fi
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
✓ <Phase 1>	1	0	Plastic	Total multipliers	0,00 ...	0	1
✓ <Phase 2>	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 ...	0	5:
✓ <Phase 3>	3	2	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	0	5:

Figure 4.14 : Phase de calcul dans plaxis 2D

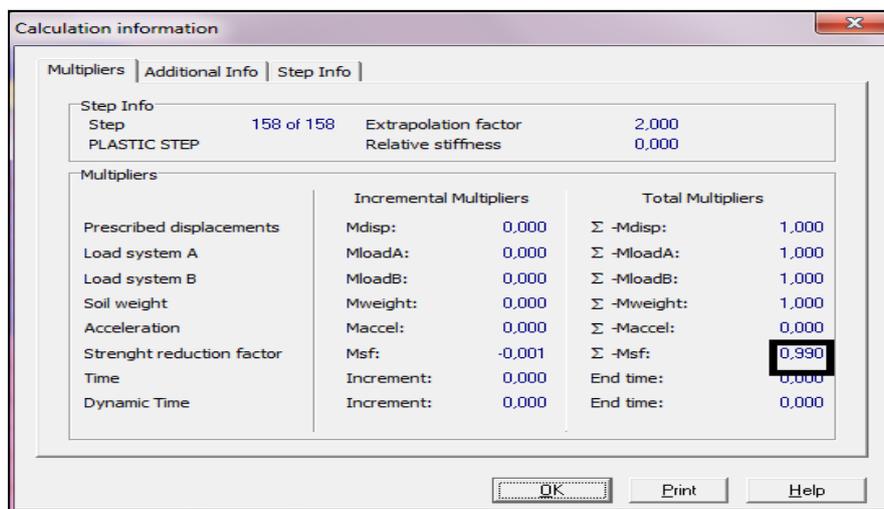


Figure 4.15 : Coefficient de sécurité dans plaxis 2D.

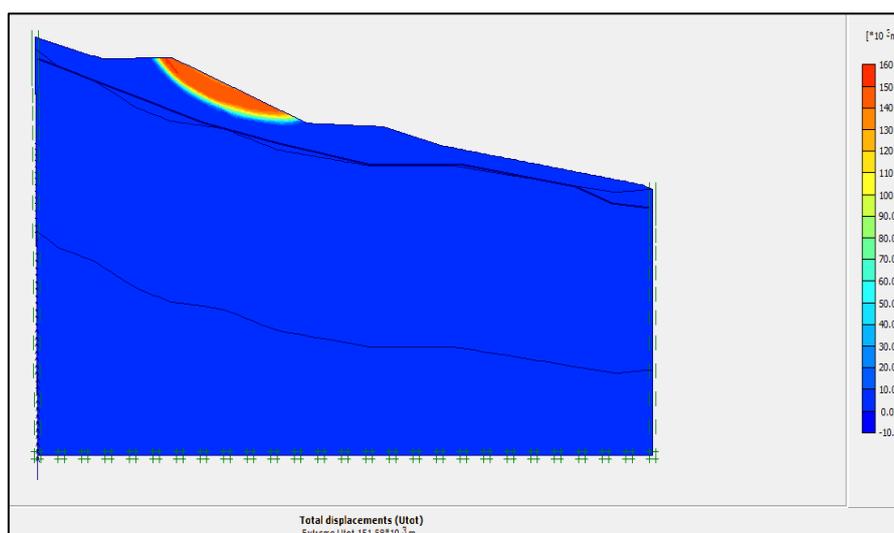


Figure 4.16 : Les déplacements totaux dans plaxis 2D.

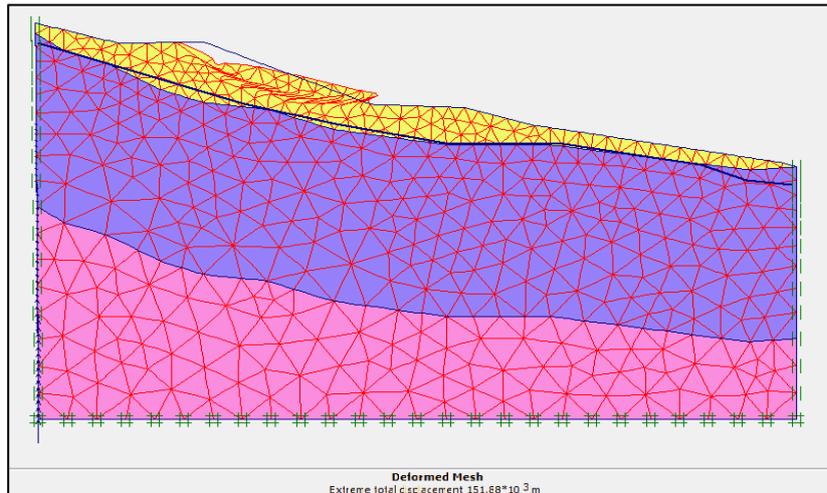


Figure 4.17 : Maillage déformé dans plaxis 2D

4.1.3.3. Renforcement du terrain naturel :

Dans ce modèle, un renforcement du terrain naturel par

- ❖ Installation des géo grilles avec des pieux.

Tableau 4.2 : Propriétés des éléments de renforcement.

Paramètres	Nom	pieux	Géogrilles	Lesson 6-fondation	lesson 6-pile toe	unité
Type de comportement	Matériel type	Elastique	Elastique	Elastique	Elastique	
Rigidité normal	EA	2,310E+07	1900,00	1,000E+09	2,000E+06	KN /m
Rigidité de flexion	EI	2,080E+06	-	1,000E+08	8000,000	KN m ² /m
Epaisseur équivalente	d	1,039	-	1,095	0,219	m
poids	w	28,274	-	25	2	KN /m/m
Coefficient de poisson	ν	0		0	0,2	-

a- Solution 1 :

- pieux :

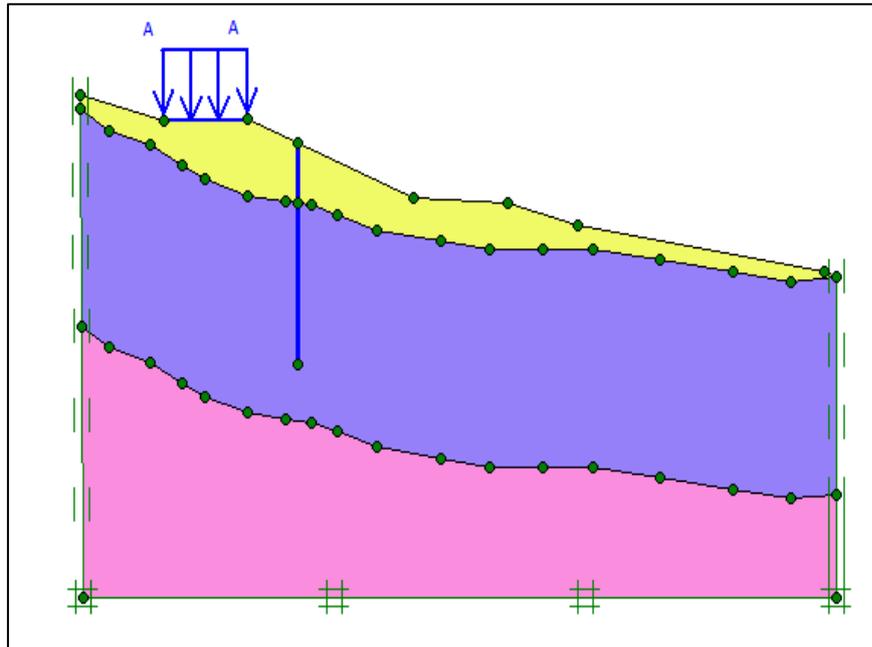


Figure 4.18 : Géométrie dans plaxis 2D

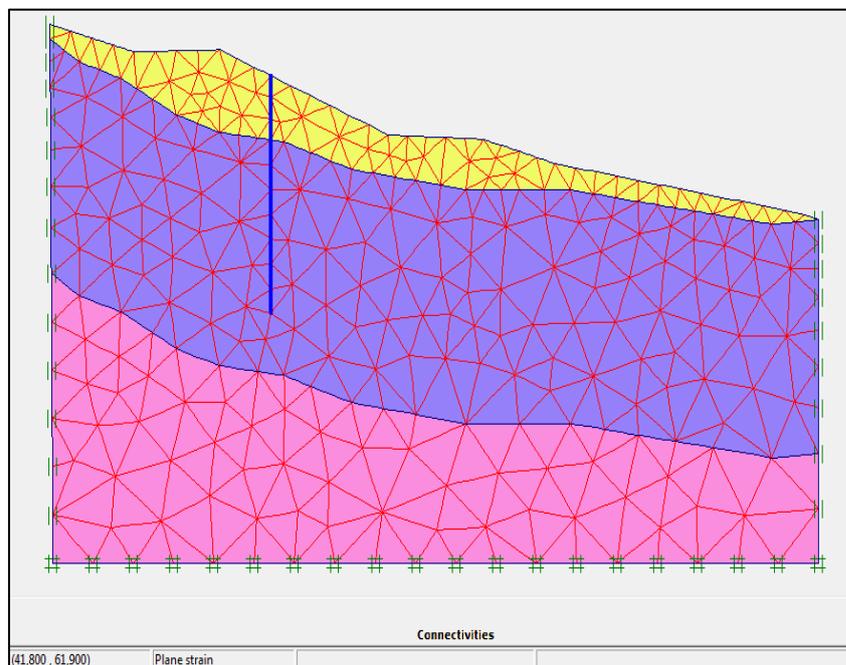


Figure 4.19 : Maillage dans plaxis 2D

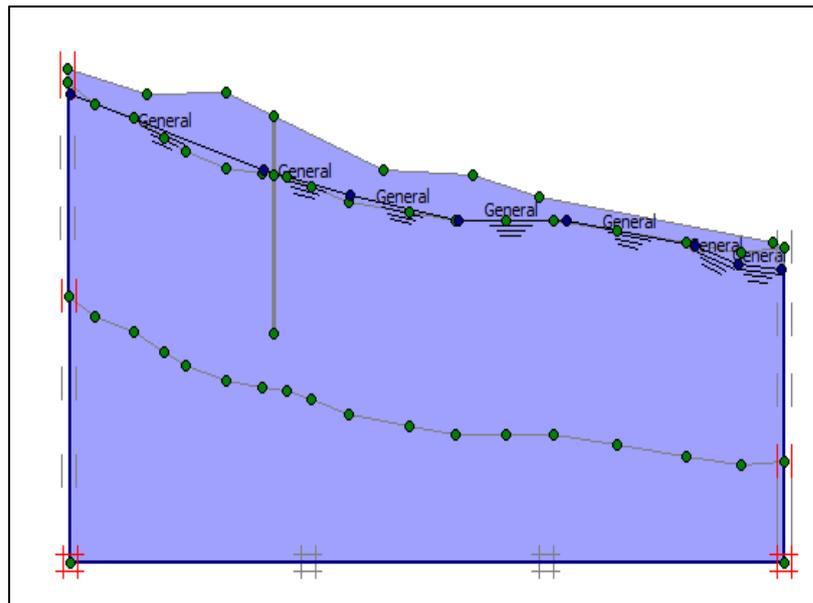


Figure 4.20 : Condition hydraulique dans plaxis 2D

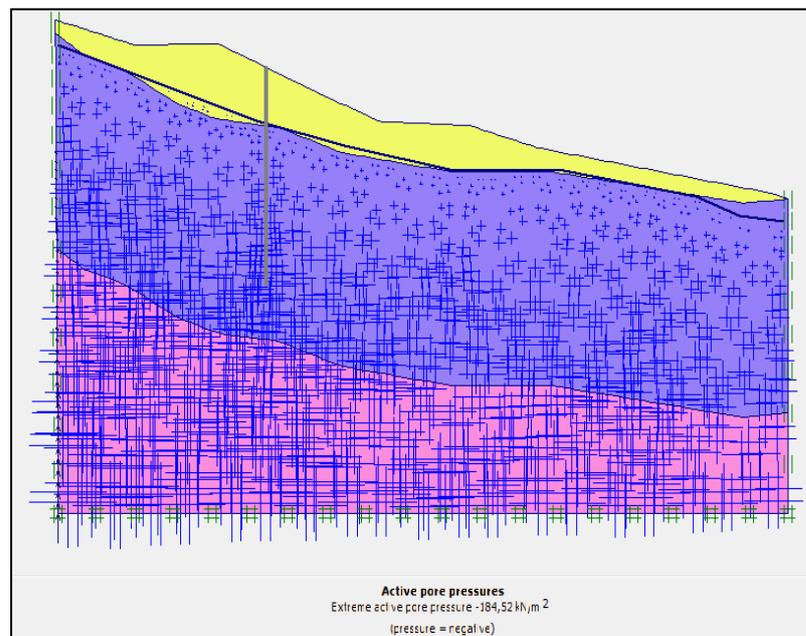


Figure 4.21 : Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D

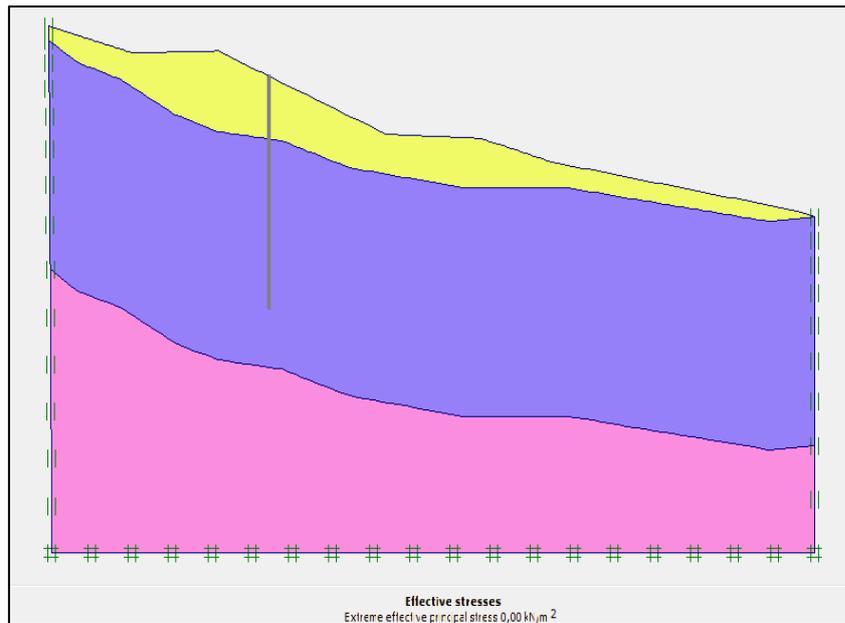


Figure 4.22 : Génération des conditions effectives dans plaxis 2D

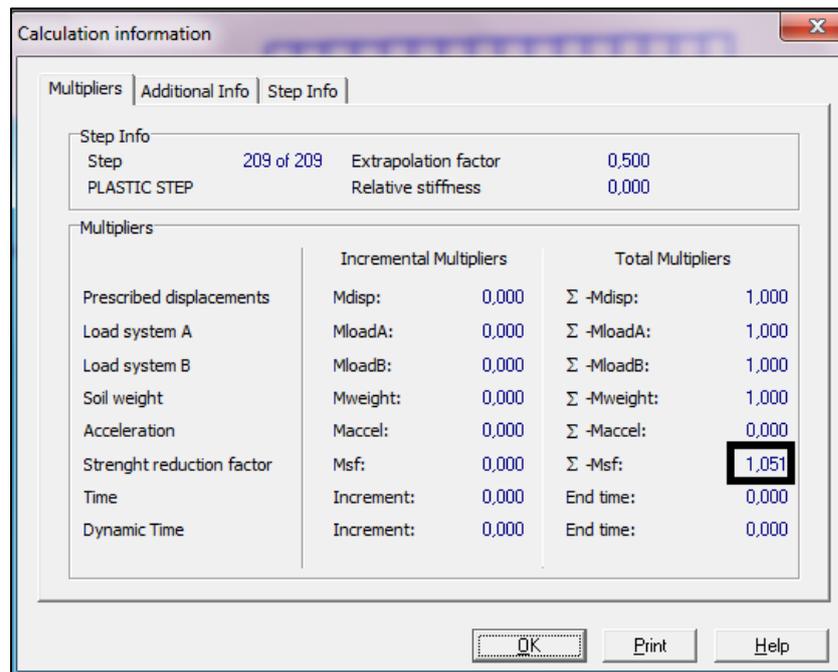


Figure 4.23 : Coefficients de sécurité dans plaxis 2D

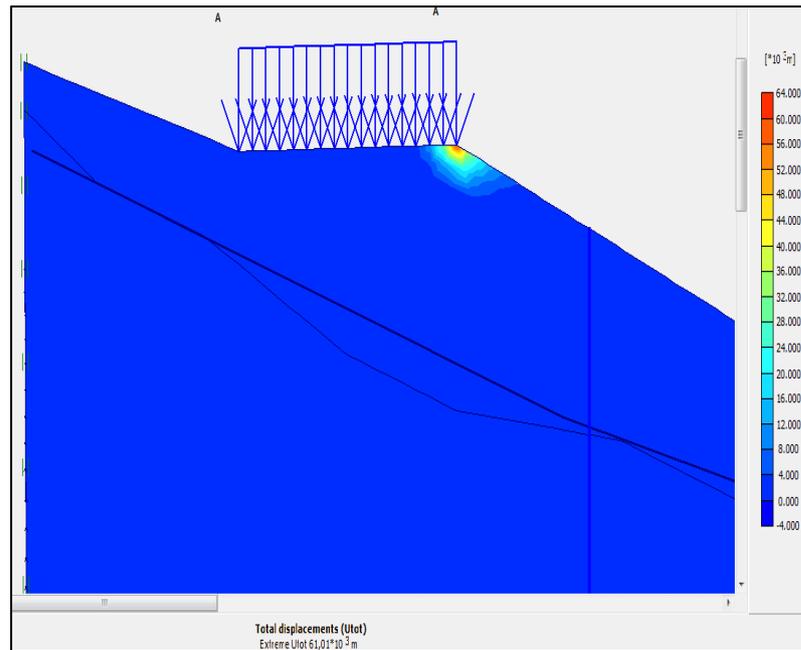


Figure 4.24 : Les déplacements totaux dans plaxis 2D

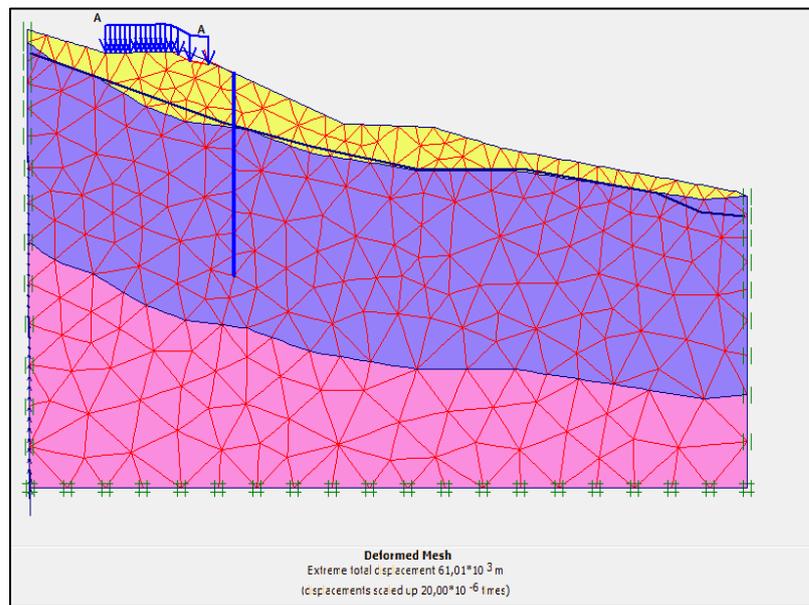


Figure 4.25 : Maillage déformé dans plaxis 2D

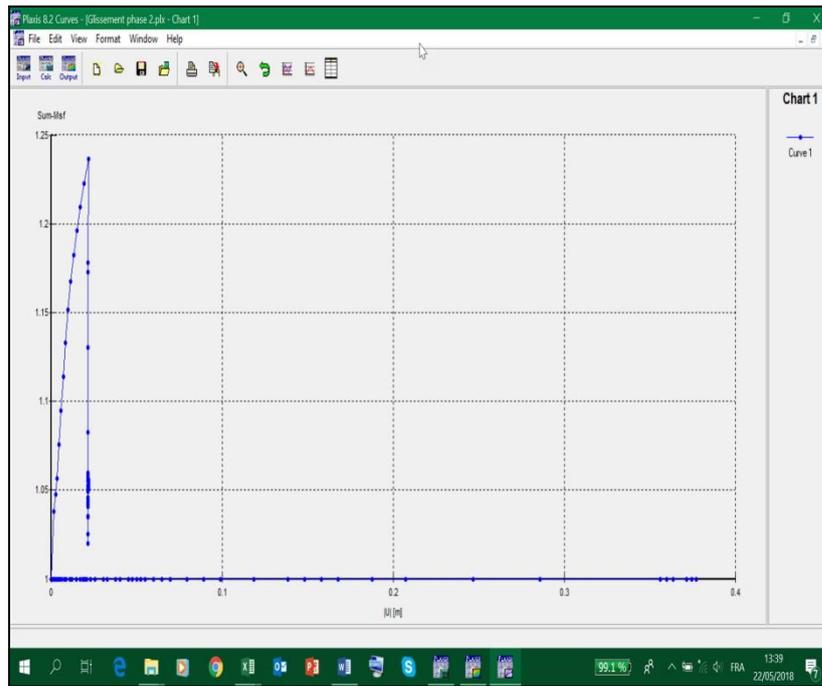


Figure 4.26 : La courbe du coefficient de sécurité dans plaxis 2D

Après la mise en place des pieux on a trouvé un $FS= 1.051$ on constate que les pieux ont un effet stabilisant faible sur le talus. Ce qui nous a ramener à une autre solution.

- Pieux + géogrilles :

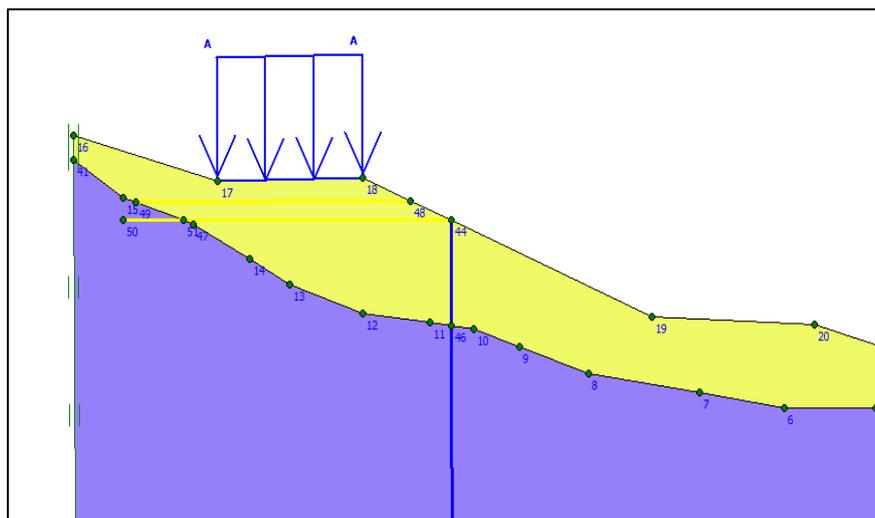


Figure 4.27 : Géométrie du modèle dans plaxis 2D.

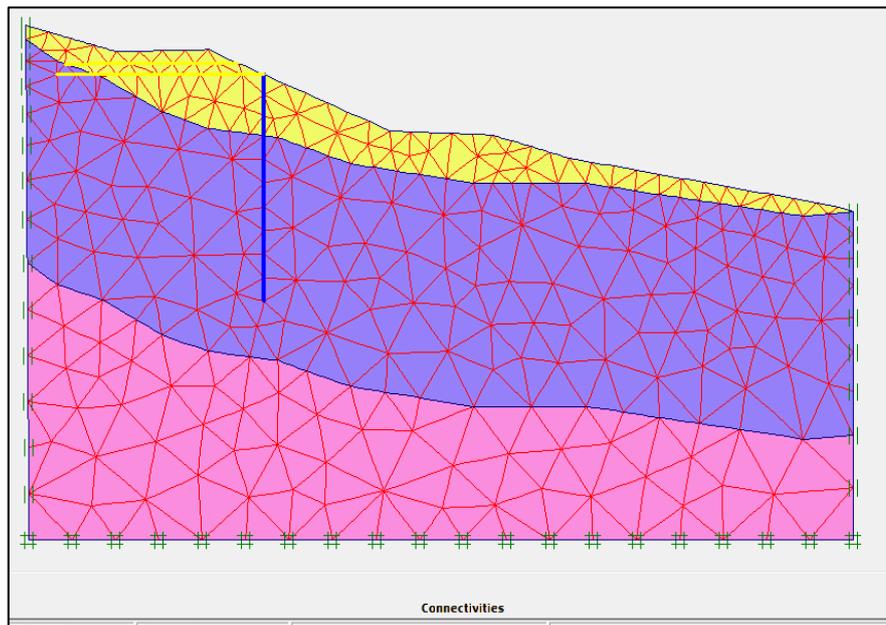


Figure 4.28 : Maillage du modèle dans plaxis 2D.

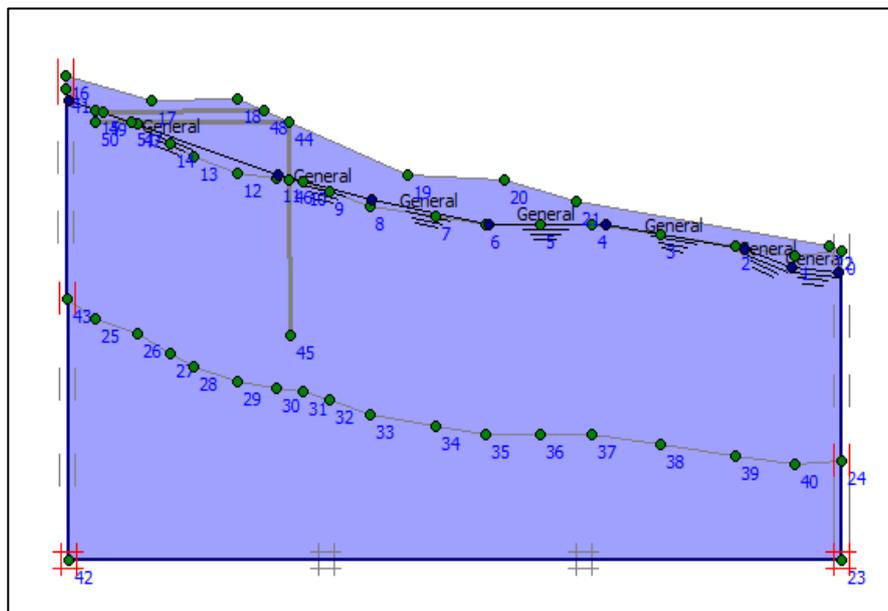


Figure 4.29 : Condition hydraulique dans plaxis 2D.

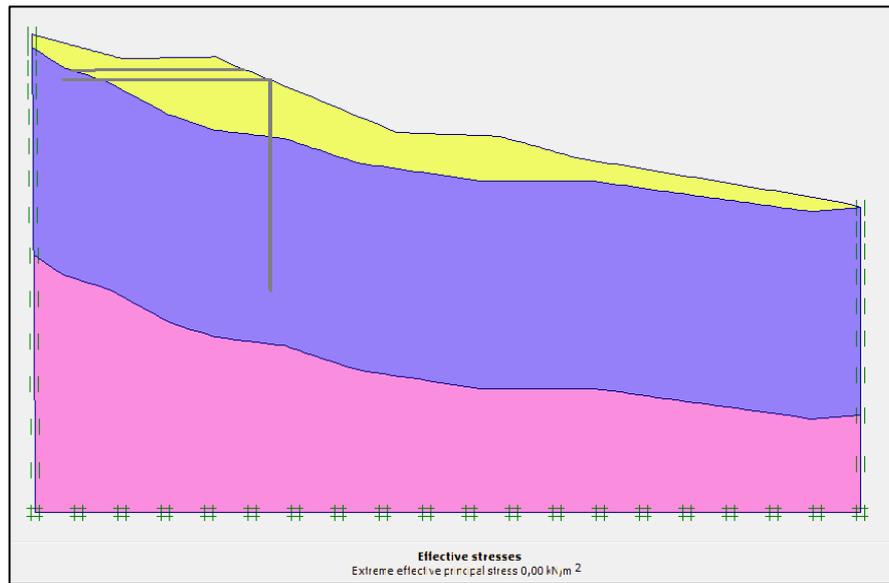


Figure 4.30 : Génération des conditions effectives dans plaxis 2D.

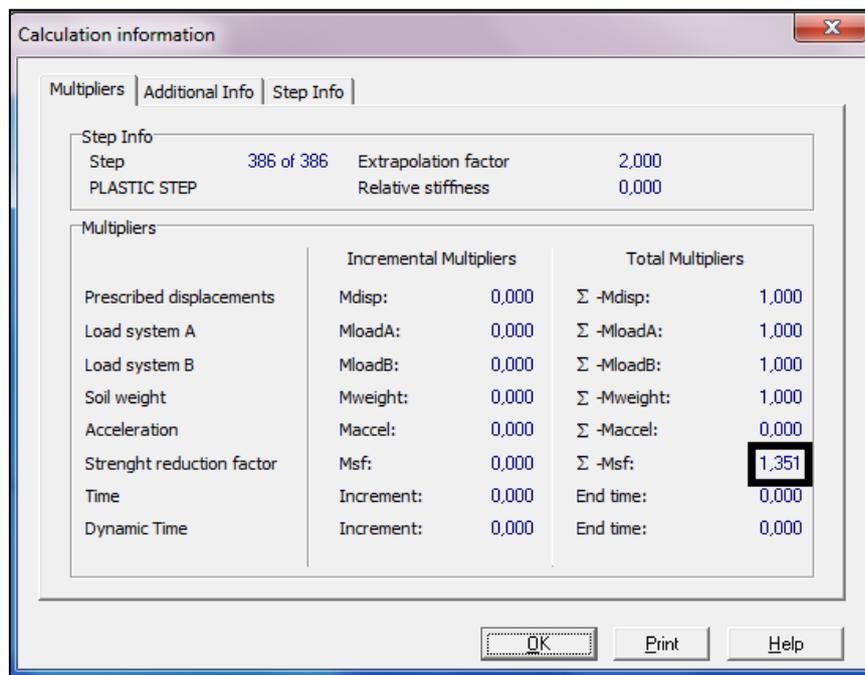


Figure 4.31 : Coefficient de sécurité dans plaxis 2D

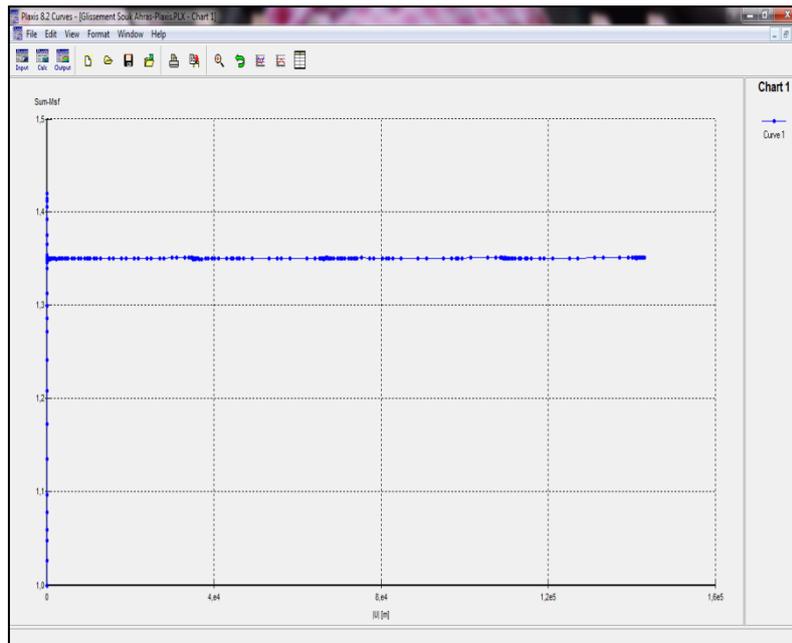


Figure 4.32 : La courbe du coefficient de sécurité dans plaxis 2D

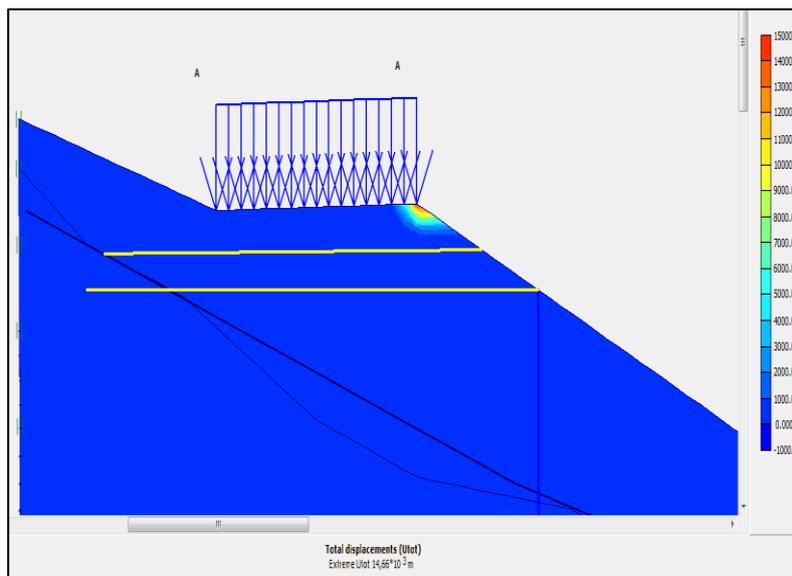


Figure 4.33 : Les déplacements totaux dans plaxis 2D.

Après avoir renforcé par pieux et géogrilles nous avons obtenu un FS de 1.351, selon l'importance de l'ouvrage, il faut acquérir un FS de 1.5 donc notre but c'est dépassé le 1.5 c'est pour cela nous avons proposé une 2eme solution.

b- solution 2 :

- Murs de soutènement :

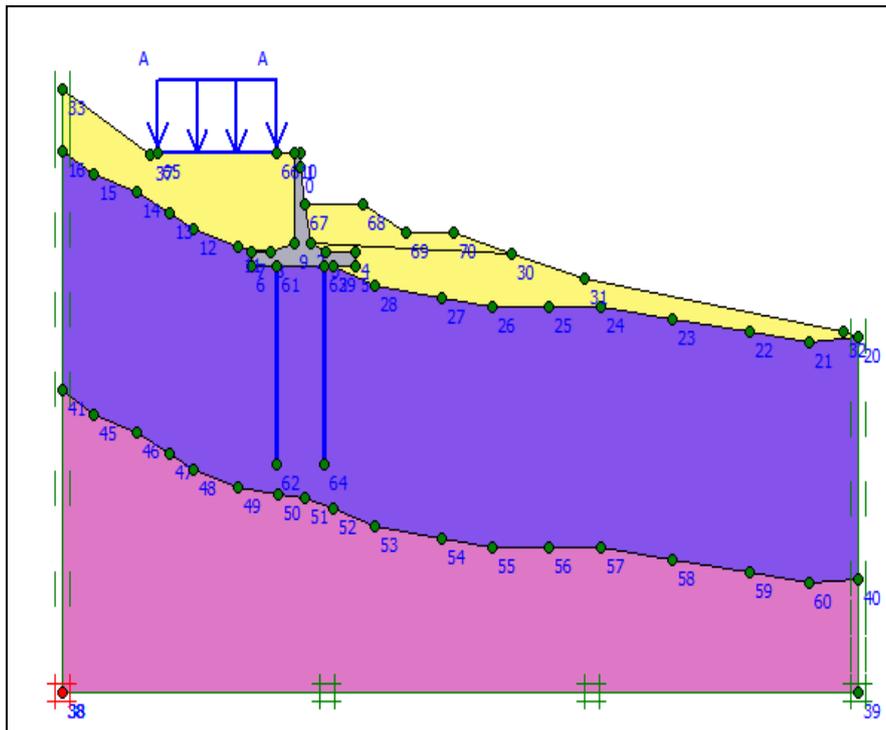


Figure 4.34 : Géométrie dans plaxis 2D

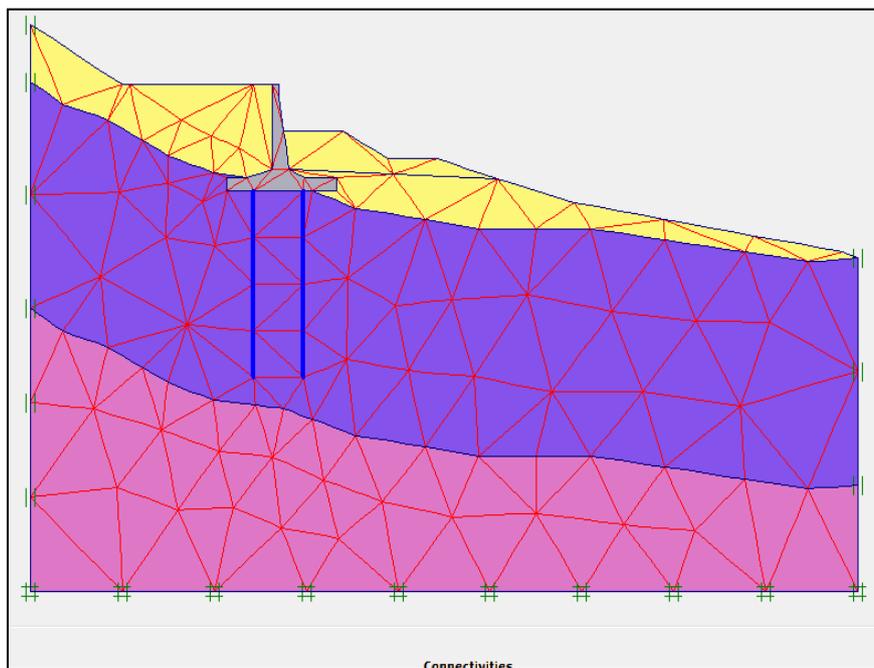


Figure 4.35 : Maillage dans plaxis 2D

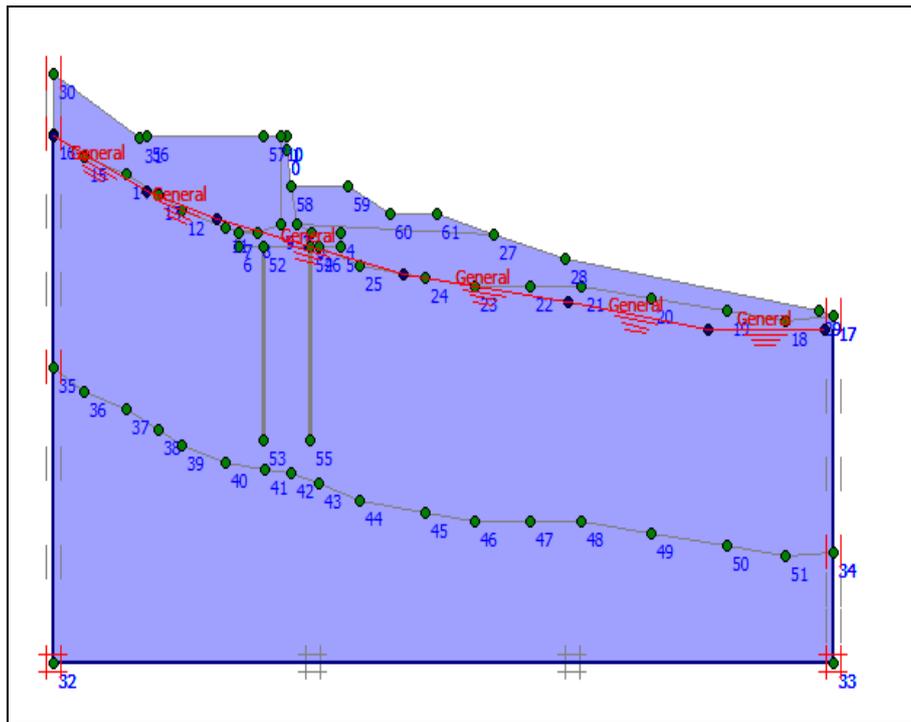


Figure 4.36 : Condition hydraulique dans plaxis 2D

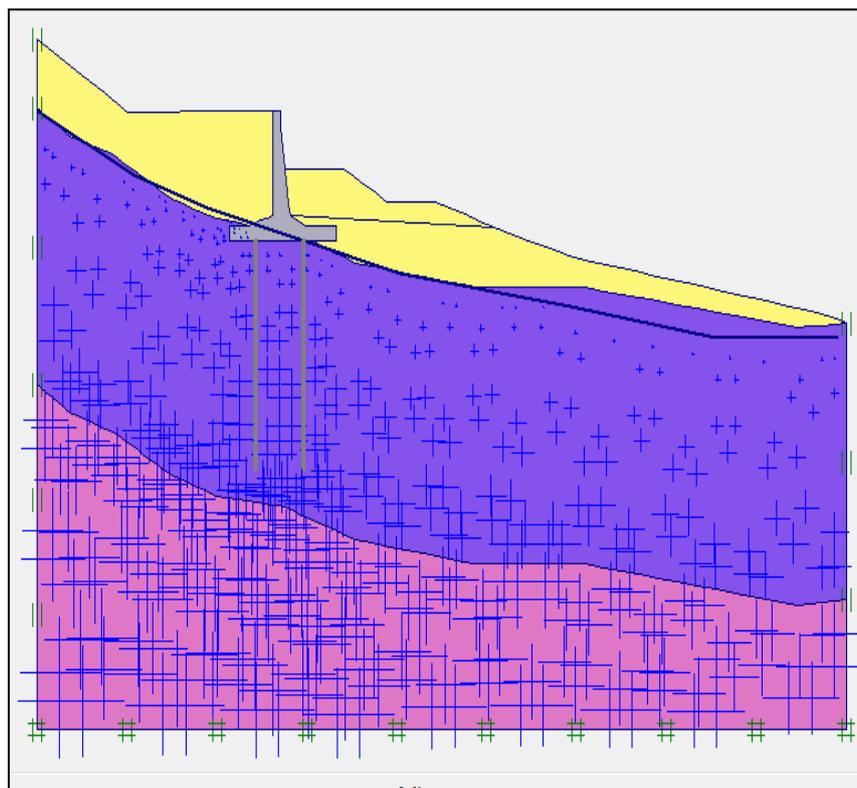


Figure 4.37 : Répartition des pressions interstitielles initiales dans plaxis 2D

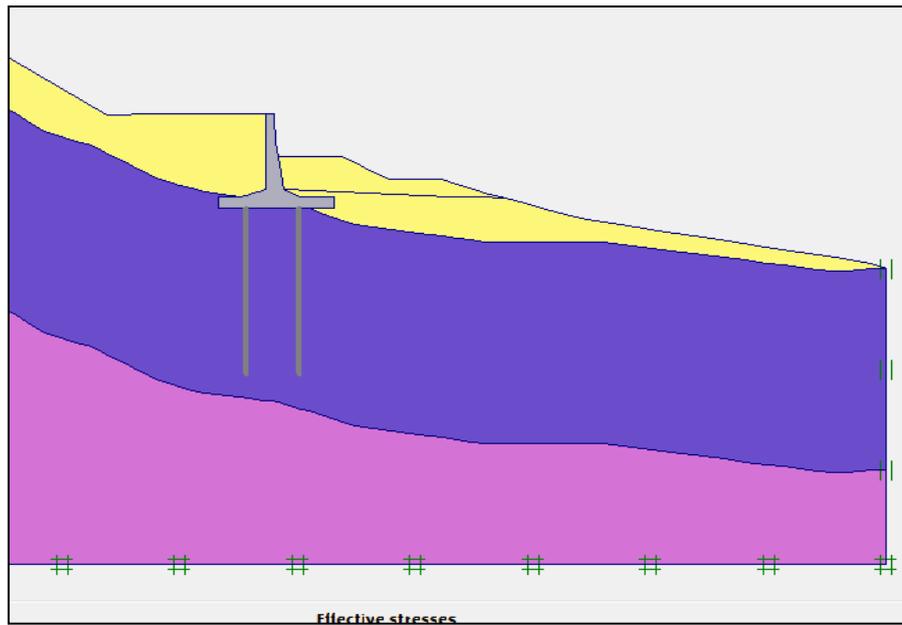


Figure 4.38 : Génération des conditions effectives dans plaxis 2D

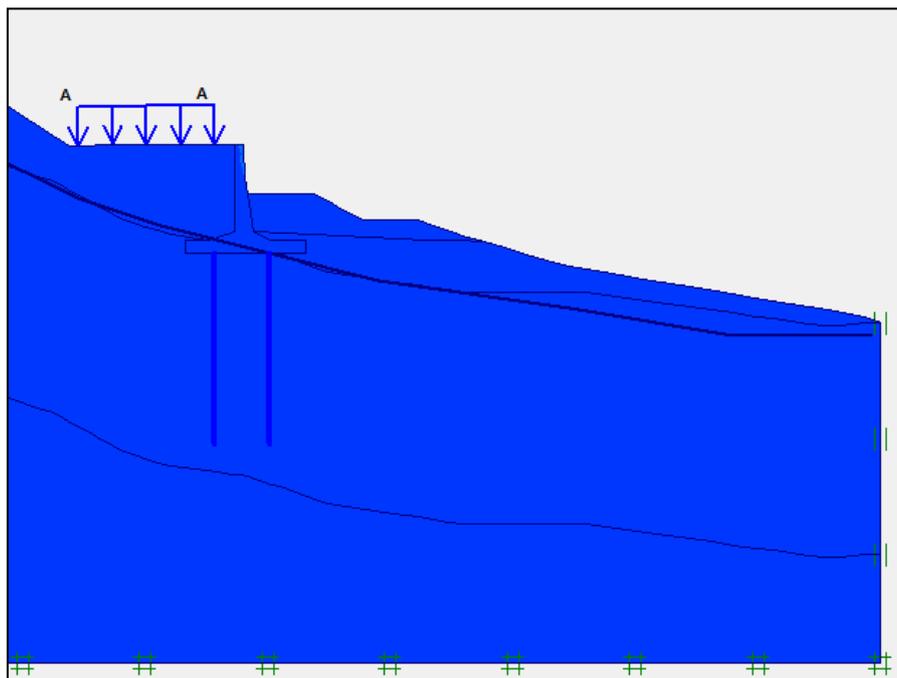


Figure 4.39 : Les déplacements totaux dans plaxis 2D

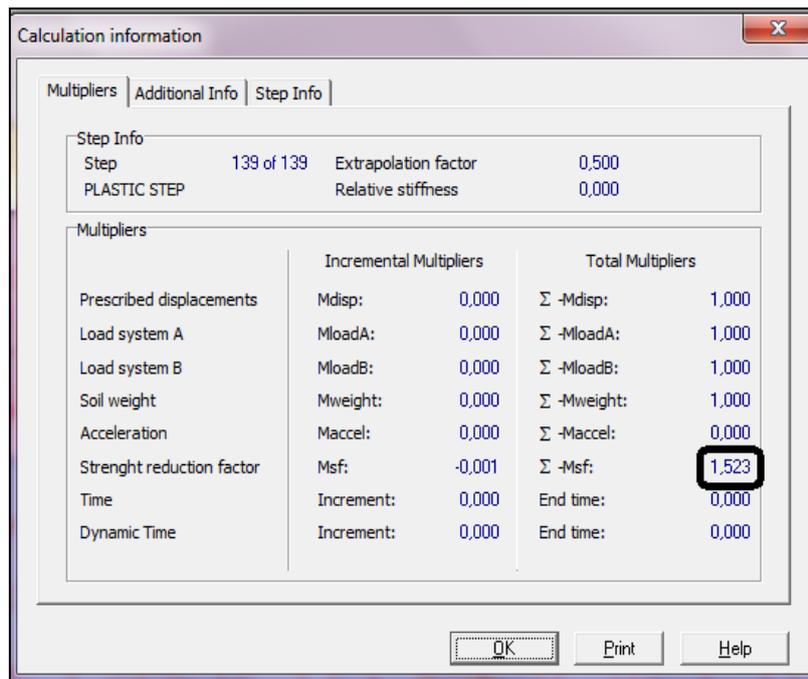


Figure 4.40 : Coefficient de sécurité dans plaxis 2D

4.1.4 Comparaison des coefficients de sécurité:

Les résultats présentés sur la figure 4.41 montrent que le renforcement par pieux offre un coefficient de sécurité moyen .bien que celui des pieux et géogrilles offre un FS élevé. Mais sans doute le meilleure coefficient de sécurité est celui des pieux et mur de soutènement.

Ceci est le résultat de notre expérience et des expériences passées a la zone de Souk Ahras qui indiquent que la meilleure solution pour glissement c'est bien le mur de soutènement.

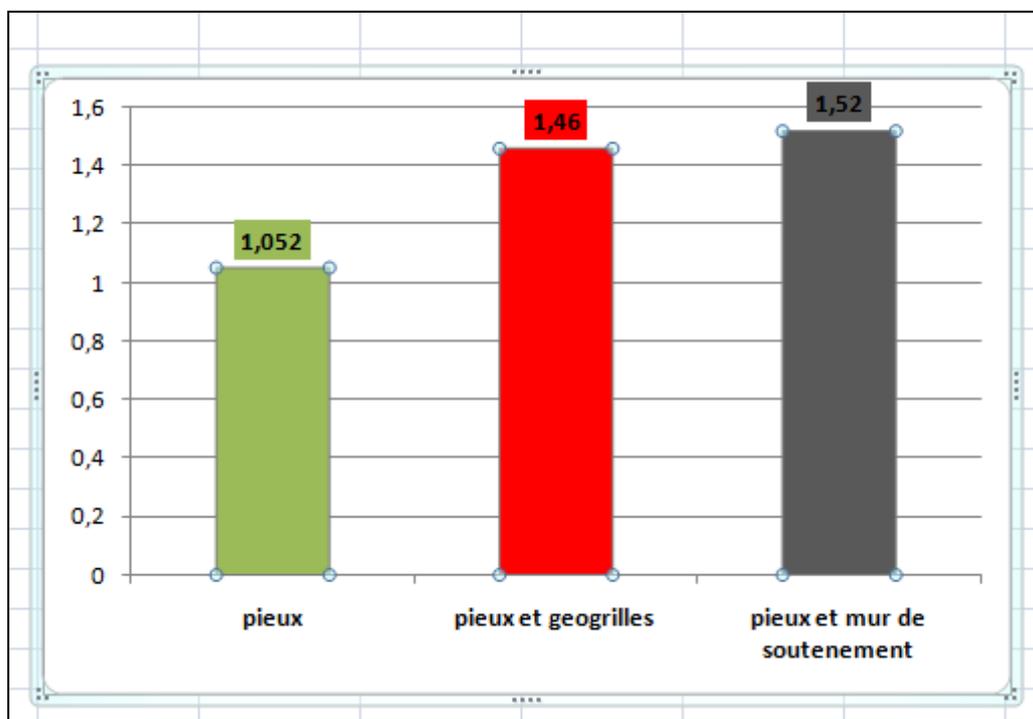


Figure 4.41 : Comparaison des coefficients de sécurité entre les solutions

*CONCLUSION
GÉNÉRALE ET
PERSPECTIVE*

Conclusion générale

L'analyse de la stabilité des pentes a pour but de comprendre le mécanisme de rupture en profondeur afin de choisir la bonne méthode de confortation. Pour cela une étude précise fait le sujet de chaque étude de stabilité.

Dans ce mémoire, une modélisation numérique d'un cas réel de glissement de terrain, celui du Ain Synour de la ville de Souk Ahras.

Cette modélisation a été faite en utilisant la méthode des éléments finis exploitée par le logiciel plaxis.

- ❖ Les calculs ont montré l'instabilité du talus avant confortement.
- ❖ Grace au calcul par éléments finis nous avons pu distinguer les zones de sollicitation et les forts déplacements où on doit viser le confortement.
- ❖ Plaxis2D offre plus de facilités pour la modélisation, notamment lors de la construction du modèle et de l'introduction des données et cela grâce à son interface graphique. Ce qui permet de bénéficier d'un gain de temps important surtout pour des modèles présentant des géométries complexes comme c'est le cas.
- ❖ La génération automatique des contraintes effectives et des pressions interstitielles (pratiquée par Plaxis) est plus simple et plus fiable qu'un calcul manuel des contraintes initiales, surtout pour des couches de sol ayant des surfaces irrégulières.
- ❖ un renforcement par pieux et géogrilles n'est certes pas aussi stabilisant qu'un renforcement par mur de soutènement et pieux.

- ❖ Ceci est le résultat de notre expérience et des expériences passées à la zone de Souk Ahras qui indiquent que la meilleure solution pour glissement c'est bien le mur de soutènement.

Perspectives

- ❖ Effectuer une modélisation numérique en 3D et comparer les résultats avec ceux en 2D
- ❖ Effectuer une modélisation numérique avec d'autre logiciel citant: Flac, Slide et faire une étude comparative des résultats obtenues par les 3 logiciels.
- ❖ la mise en relief de l'influence combinée de plusieurs paramètres, ou étudier l'influence des variations de paramètres sur d'autres résultats.

RÉFÉRENCES

- [1] Mr. Ilyes Ouzaid « stabilisation des pentes par inclusion rigides » université Mohamed khider Biskra 2014.
- [2] Mr. Aouari Nedjemedine « étude d'un glissement de terrain sur site serkina (01) w Constantine école nationale supérieure des mines et métallurgie ENSM –Annaba.
- [3] Boubaker Ghanini
- [4] Halima Doumi « étude comparative des méthodes analytiques et numériques en stabilité des pentes » université Mohamed Boudiaf M'sila-faculté de technologie.
- [5] Mohamed khemisa « méthode d'analyse de la stabilité et techniques des stabilisations des pentes » université de M'sila 2006.
- [6] Akram bouras « modélisation numérique du glissement et stabilisation du CW 15 du PK01 + 300 Au PK01 + 700 – sidi aissa – Annaba.
- [7] Renforcement « revue française de géotechnique »
- [8] Boulfoul Khalifa « étude numérique sur l'effet de l'espacement des géogrilles sur les mécanismes de rupture des murs »
- [9] Rapport de la direction des travaux publique de Souk-Ahras.
- [10] Antoine DENIS .Université de Liège (ULG) Arlon Campus Environnement. Département des Sciences et Gestion de l'environnement Unité Eau Environnement Développement (EED)
- [11] Mme Medjitna Nasri Lamia « Les glissements de terrains en 2D et 3D Etude Comparative entre Flac et Plaxis » UNIVERSITE 20 AOUT 1955 DE SKIKDA.2008
- [12] Bendjeddou Azzedine « Etude des glissements routiers Au Nord Est de l'Algérie » Université Mohamed Khider – Biskra 2015

Web graphie

<http://www.encyclopedie-environnement.org>
<http://www.encyclopedie-environnement.org>
<http://www.estp-btp.com>
<http://mf3a.com>
<https://fr.m.wikipedia.org>
www.urgencequebec.growv.qcca.fr