



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
University Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculty of Sciences and Technology  
قسم الهندسة المدنية  
Civil Engineering Department



N° d'ordre : M ...../GC/2023

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GENIE CIVIL**

Spécialité : **Structures**

**ANALYSE ET MODELISATION D'UNE PENTE A L'AIDE DE  
PLAXIS-2D**

**Présenté par :**

-Mr BENDELLA Issam Eddine

-Mr BOUDJENAH Nasser Eddine

**Soutenu le 06/06/2023 devant le jury composé de :**

<b>Président</b>	Pr. MEBROUKI Abdelkader	Professeur	UMAB
<b>Examineur</b>	Dr. BENSOULA Mohamed	MCA	UMAB
<b>Encadrant</b>	Dr. BESSAIM Mohammed Mustapha	MCB	UMAB

**Année Universitaire : 2022/2023**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## REMERCIEMENT



*Au terme de ce travail on tient avant tout à remercier le miséricordieux tout puissant, grâce à son aide et sa bienveillance, rien de cela n'aura pu être possible.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*A tous, nous dédions le fruit d'un dur labeur. Nos pensées vont à des personnes qui ont galéré précisément nos chers parents d'une manière ou d'une autre, de notre gratitude pendant toute cette période de stress et de pression, que nous avons plus au moins su gérer grâce à leurs soutien morale.*

*Nos profonds remerciements vont à notre Encadrant monsieur **Dr. BESSAIM Mohammed Mustapha**, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ses précieux conseils, et surtout pour son soutien et ses orientations.*

*Par la même volonté et même chaleur nous voudrions remercier également toutes les directions qui ont acceptées de nous aider, toutes les personnes qui nous ont offert de leur temps, pour leurs gentillesse, leurs accueils et leurs soutiens.*

*Nous tenons aussi à remercier vivement les membres de jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.*



*Issam et Nasreddine*



*DEDICACE*  
*Mr. BENDELLA ISSAM*

*Je dédie ce travail à :*

*Ceux qui m'ont aidé et m'ont offert cette occasion :*

*\* A la grande famille BENDELLA*

*\* A monsieur le professeur Mr BESSAIM*

*\* Amon ami et frère BOUDJENAH Nasreddine*

*\* A mes frères, mes fidèles amies et mes camarades de l'école*

*\* A toutes les personnes qui me respectent et qui m'aiment*



*DEDICACE*

*Mr. BOUDJENAH NASREDDINE*

*Je dédie ce travail à :*

*Ceux qui m'ont aidé et m'ont offert cette occasion :*

*\* A la grande famille BOUDJENAH*

*\* A mon professeur Monsieur BESSAIM*

*\*A mon ami et frère BENDELLA Issam Eddine*

*\* A mes frères, mes fidèles amies et mes camarades de l'école*

*\*A toutes les personnes qui me respectent et qui m'aiment*

# Résumé

Les glissements de terrain sont des phénomènes très récurrents dans le monde ainsi qu'en Algérie. Ces aléas sont connus pour leurs impacts dévastateurs, causant des dégâts matériels et humains.

En tant qu'ingénieur, notre mission est d'assurer la stabilité de ces pentes. A ce jour, plusieurs études ont été menées pour faire face à ces phénomènes et éviter leurs dangers. Une méthode précise consiste à effectuer une analyse de modélisation à l'aide d'un logiciel bien connu tel que le Plaxis 2D, Basé sur le calcul par éléments finis, ce logiciel nous aidera en tant qu'ingénieurs à assurer la stabilité du projet étudié ainsi qu'à proposer des solutions économiques, notamment en cas d'instabilité de pente. Le but de ce travail était d'étudier la stabilité d'un talus dans deux cas. Dans le premier cas nous avons analysé la stabilité du terrain naturel. Dans le second cas, nous avons fait un reprofilage et refaire la modélisation du talus. La dernière étape avait pour but d'analyser l'effet du reprofilage sur le facteur de sécurité et de le comparer avec le premier cas.

**Mots clés :** Talus ; Glissement ; Stabilité ; Modélisation ; Plaxis 2D

# Abstract

Landslides are very recurrent phenomena in the world as well as in Algeria. These hazards are known for their devastating impacts, causing material and human damages. As an engineer, our mission is to ensure the stability of these slopes.

To date, several studies have been carried out to deal with these phenomena and to avoid their dangers. An accurate method is to do an analysis, using a well know software, such as Plaxis 2D. Based on Finite elements calculation, this software will help us as engineers to ensure the stability of the studied project as well as proposing economical solutions, namely if there is slope instability.

The aim of this work was to study the stability of a slope in two cases; the first case analyzed the stability of the natural slope; and in the second case, consisted of the reshaping of the studied slope. The final step was to compare the safety factor of the both analyses.

**Keywords:** Slope; Landslide; Stability; Simulation; Plaxis 2D

## ملخص

الانهيارات التربة ظاهرة متكررة في العالم وكذلك في الجزائر. تُعرف هذه المخاطر بآثارها المدمرة، حيث تسبب أضرارًا مادية وبشرية.

كمهندس، مهمتنا هي ضمان استقرار هذه المنحدرات. وقد تم حتى الآن إجراء العديد من الدراسات للتعامل مع هذه الظواهر وتجنب مخاطرها. تتمثل الطريقة الدقيقة في إجراء تحليل باستخدام برنامج معروف جيدًا، مثل Plaxis 2D

استنادًا إلى حساب العناصر المحدودة، سيساعدنا هذا البرنامج كمهندسين على ضمان استقرار المشروع المدروس بالإضافة إلى اقتراح الحلول الاقتصادية، أي في حالة عدم استقرار المنحدر. كان الهدف من هذا العمل دراسة ثبات المنحدر في حالتين؛ تتكون الحالة الأولى من تحليل استقرار المنحدر الطبيعي؛ وفي الحالة الثانية، يتم إعادة هيكلة هندسة المنحدر المدروس. الخطوة الأخيرة هي مقارنة عامل الأمان في كلا التحليلين.

**الكلمات الرئيسية:** منحدر؛ انهيار التربة؛ استقرار؛ محاكاة؛ Plaxis 2D



## Notations et abréviations

$c$  = Cohésion du sol

$c'$  = Cohésion effective du sol

$E$  = Module d'élasticité du sol (module d'Young)

$E_{ref}$  = Module de référence

$F_s$  = Coefficient de sécurité

$G$  = Module de cisaillement du sol (module de Coulomb)

$K_0$  = Coefficient des terres au repos

$k_x$  = Perméabilité du sol selon la direction des  $x$

$k_y$  = Perméabilité du sol selon la direction des  $y$

$L$  = Longueur du talus

$U$  = La résultante des pressions interstitielles éventuelles

$u$  = Pression interstitielle

$W$  = Poids des terres

$\gamma$  = Poids volumique du sol

$\gamma_d$  = Poids volumique sec du sol

$\gamma_h$  = Poids volumique humide du sol

$\gamma_{sat}$  = Poids volumique saturé du sol

$\phi$  = Angle de frottement interne du sol

$\phi'$  = Angle de frottement interne effectif du sol

$\nu$  = Coefficient de Poisson

$\sigma$  = Contrainte

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  = Contraintes principales majeure, intermédiaire et mineure

$\sigma'$  = Contrainte effective

$M_{sf}$  : Coefficient total de sécurité

$\tau_{ult}$  = Contrainte de cisaillement ultime du sol

$\tau_{max}$  = Résistance au cisaillement

$\tau$  = Contrainte de cisaillement mobilisée

$\psi$  = Angle de dilatance

$w$  : Poids

$\mathcal{E}$  : La déformation totale

$\mathcal{E}^e$  : La déformation élastique

$\mathcal{E}^p$  : La déformation plastique

$\tau$  : Contrainte de cisaillement

$\sigma$  : Contrainte normale

$\sigma_t$  : Contrainte de rupture par traction

$e^v$  : La déformation volumique

$e_l$  : La déformation axiale

$De^{pv}$  : L'incrément de déformation plastique volumique

$De^{ps}$  : L'incrément de déformation plastique de cisaillement

MEF : Méthode des éléments finis

# LISTE DES FIGURES

LES FIGURES	PAGES
<b>Figure1.1</b> Les éléments principaux de la description d'un glissement de terrain	20
<b>Figure1.2</b> L'écroulement	22
<b>Figure1.3</b> Le renversement	22
<b>Figure1.4</b> Glissement plan (a), Glissement Rotationnel (b)	23
<b>Figure1.5</b> Propagation latérale	24
<b>Figure1.6</b> Mouvements de fluage	25
<b>Figure1.7</b> Coupe géologique et géotechnique d'un glissement	26
<b>Figure1.8</b> Glissement de terrain en Japon	27
<b>Figure1.9</b> Glissement de terrain aux Etats-Unis	27
<b>Figure1.10</b> Glissement de terrain en France	28
<b>Figure 1.11</b> Le glissement d'Ordu en Mer Noire, 2019	28
<b>Figure 1.12</b> Les conséquences des glissements de terrain à Constantine	29
<b>Figure 1.13</b> Glissement de terrain de Bejaia sur la route	30
<b>Figure 1.14</b> Glissement de terrain de Tlemcen en 2014	30
<b>Figure 1.15</b> Glissement de terrain de Mostaganem en 2017	31
<b>FigureII.1</b> Les travaux de terrassement	34
<b>Figure II. 2</b> la bute de pied	35
<b>Figure II.3</b> allègements en tête	36
<b>Figure II.4</b> Purge	37
<b>Figure II.5</b> Reprofilage	38
<b>FigureII.6.</b> Substitution partielle des matériaux glissés	39
<b>FigureII.7</b> Défrichage d'un terrain	40
<b>FigureII.8</b> L'excavation	41
<b>FigureII.9</b> Le remblayage	41
<b>FigureII.10</b> Le compactage	42
<b>FigureII.11</b> Les tuyaux de drainage	43
<b>FigureII.12</b> Les bassins de rétention	43
<b>FigureII.13</b> Coupe d'une tranchée drainante	44

<b>Figure II.14</b> Les particularités d'un mur de soutènement	45
<b>Figure II.15</b> Ouvrage de soutènement à Mostaganem	45
<b>Figure II.16</b> Type d'ouvrages rigides [(a) Mur en terre armée, (b) Mur poids en béton armé]	46
<b>Figure II.17</b> Rideaux de palplanches ancrés par des tirants d'ancrage	47
<b>Figure II.18</b> Paroi moulée en pieux sécants ancrés par des tirants d'ancrage	47
<b>Figure II.19</b> Les barrages à Contreforts	48
<b>Figure II.20</b> Un versant stabilisé par clouage	49
<b>Figure II.21</b> Mur de soutènement vu en coupe	49
<b>Figure II.22</b> Les signaux et messages d'alerte	51
<b>Figure II.23</b> Stabilisation de la pente	51
<b>Figure III.1.</b> Schéma sur la surface de rupture	54
<b>Figure. III.2</b> Schéma de rupture plane	55
<b>Figure III.3</b> Méthode des tranches	56
<b>Figure III.4</b> La méthode de Fellenius	58
<b>Figure III.5.</b> Méthode de Bishop simplifiée	59
<b>Figure III.6.</b> La méthode de Janbu	60
<b>Figure III.7.</b> Méthode de Spencer	61
<b>Figure III.8.</b> Méthode de Morgenstern et Price	62
<b>Figure IV.1.</b> Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique	70
<b>Figure IV.2.</b> Représentation du comportement élastique parfaitement plastique	70
<b>Figure IV.3.</b> Représentation du comportement élasto plastique avec écrouissage	71
<b>Figure IV.4.</b> Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire	72
<b>Figure IV.5.</b> Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire	72
<b>Figure IV.6.</b> Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb	73
<b>Figure IV.7.</b> Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour $c=0$	73

# LISTE DES TABLEAUX

LES TABLEAUX	PAGES
<b>Tableau 1.1</b> Classification des mouvements de terrain	21
<b>Tableau II.1</b> Butée de pied	36
<b>Tableau II.2</b> Allègement en tête	37
<b>Tableau II.3</b> Purge	38
<b>Tableau II.4</b> Reprofilage	39
<b>Tableau II.5</b> Substitution partielle : bèche, contrefort, éperon, masque	40
<b>Tableau.III.1</b> – Forces inter-tranches et équations à satisfaire pour différentes méthodes	54
<b>Tableau. V.1.</b> Caractéristiques géotechniques des matériaux	74

# Sommaire

Résumé.....	6
Abstract.....	7
ملخص.....	8
Notations Et Abréviations.....	9
LISTE DES FIGURES.....	11
LISTE DES TABLEAUX.....	13
Introduction Générale.....	16
Chapitre 1 Généralités Sur La Stabilité des Pentes.....	18
Introduction.....	19
1.1 Définition Sur Les Glissements De Terrain.....	19
1.2 Les Facteurs Qui Contrôlent Le Type Et Le Taux De Glissement .....	20
1.3 Les Etapes De l'activité Des Glissements De Terrain .....	20
1.4 Quelques Modes d'instabilités Affectant Les Pentes De Sol.....	20
1.4.1 Les Ecoulements .....	22
1.4.2 Le Renversement.....	23
1.4.3 Les Glissements.....	23
1.4.3.1 Glissements Rotationnels Ou Circulaires.....	24
1.4.3.2 Glissement Plan.....	24
1.4.4 Diffusion Latérale .....	24
1.4.5 Les coulées .....	25
1.4.6 Mouvements de Fluage .....	25
1.5 Notions de base pour étudier la stabilité des pentes .....	26
1.6 Glissement De Terrain Dans Le Monde.....	27
1.7. Les Glissements En Algérie : .....	29
Chapitre II Techniques De Stabilisation Des Pentes .....	33
II. Introduction .....	34
1.méthodes courantes de confortement des glissements de terrain .....	34
1.1 Le Terrassement .....	34

I.1.1 Remblai De Pied .....	35
I.1.2 Allègement En Tête .....	36
I.1.3. Purge .....	37
I.1.4. Reprofilage.....	38
I.1.6. Substitution Partielle Des Matériaux Glissés.....	39
1.2 Le Drainage .....	42
1.3 l'introduction d'éléments Résistants .....	44
2.1 Les Ouvrages Rigides.....	45
2.2 Les Ouvrages Souples .....	46
1.4 La Protection Passive Et La Surveillance .....	49
Chapitre III. Analyse De La Stabilité Des Talus.....	51
III.1 Introduction .....	52
III.2 Méthodes De Calcul A La Rupture .....	52
III.3 Méthodes Des Blocs.....	54
III.4 Méthodes Des Tranches .....	55
III.5. Méthode De Fellenius (1927).....	57
III.6. Méthode De Bishop (1955) .....	57
III.7. La Méthode De Janbu .....	59
III.8. Méthode De Spencer (1967) .....	59
III.9. Méthode De Morgenstern Et Price (1965) .....	60
Chapitre IV Le logiciel Plaxis .....	62

IV. Introduction.....	63
IV.1. Concepts De Base : .....	63
IV.2. Calculs Par La MEF :.....	64
IV.3. Code De Calcul En Eléments Finis Plaxis 2D :.....	65
3.1. PLAXIS-Input : .....	65
3.2. PLAXIS-Calculassions : .....	65
3.3. PLAXIS-Output : .....	65
3.4. PLAXIS-Curves .....	66
IV.4. Les Modèles De Comportements Utilisés Dans PLAXIS.....	66
IV.5. Comportement Elasto-Plastique.....	67
IV.6. Modèle Elastique Linéaire.....	68
IV.7. Modèle De Mohr-Coulomb.....	69
IV.8. Conclusion.....	70
Chapitre V Modélisation Avec Logiciel Plaxis 2D.....	72
V.1 Glissement Et Stabilisation Du talus .....	73
V.1.1 Introduction .....	73
V.1.2 Caractéristiques géotechnique du talus .....	73
V.1.3 Modélisation du cas 2 (Avec reprofilage).....	80
Conclusion.....	86
Conclusion Générale.....	88
Références Bibliographiques.....	90



# **INTRODUCTION GENERALE**

# Introduction Générale

Les mouvements de terre sont parmi les aléas les plus répandus, caractérisés souvent comme les phénomènes les plus sévères à l'échelle mondiale et nationale. Ces mouvements surgissent en raison de divers facteurs, à l'instar des tremblements de terre, des explosions souterraines ou sous-marines et même durant les périodes de fortes pluies. Leur déclenchement peut être également combiné de différents facteurs géologiques et géomorphologiques. Ces phénomènes résultent d'une instabilité des terres et dans des cas majeurs l'effondrement des structures adjacentes.

Notre mission en tant d'ingénieur est de construire des ouvrages tout en respectant l'aspect de sécurité. A cet effet, il est primordial de s'assurer de la stabilité de l'assise de tout ouvrage en Génie civil qui est bien le sol.

A ce jour, différentes techniques existent permettant la modélisation du sol étudié, parmi ces techniques on peut utiliser le logiciel Plaxis. Ce dernier permet de modéliser le site en question et de calculer le facteur de sécurité. Ce travail a pour but de modéliser un talus et de voir sa stabilité. Pour cela notre travail de mémoire se divise en :

- Un premier chapitre, abordant l'étude bibliographique, les informations générales sur les glissements de terrain ;
- Chapitre II : les Techniques de stabilisation des pentes ;
- Chapitre III : la Méthode de calcul de la stabilité des talus ;
- Chapitre IV : Aperçu sur le Logiciel Plaxis 2D ;
- Chapitre V : Modélisation du talus étudié avec le Logiciel Plaxis 2D

Et enfin une conclusion générale

**CHAPITRE 1**  
**GENERALITES SUR**  
**LA STABILITE DES PENTES**

## I. Introduction :

La stabilité des pentes naturelles est une préoccupation des ingénieurs géotechniciens en exercice et en recherche. Le déséquilibre provoqué par un effondrement de talus est souvent spectaculaire, souvent dévastateur, et parfois mortel. De nombreuses méthodes de calcul de stabilité ont été proposées. Ils diffèrent dans les hypothèses retenues par les auteurs et dans la facilité de mise en œuvre, mais ils s'accordent tous sur la définition d'un coefficient global de sécurité pour les pentes. Pour améliorer les pentes, il existe plusieurs techniques de renforcement qui varient en mode de mise en œuvre, en coût et en durabilité. Aujourd'hui, le renforcement des talus soumis à des sollicitations latérales au moyen de pieux verticaux est largement utilisé en pratique, réparti ou sous forme de rideau.

### 1.1 Définition sur les glissements de terrain

Les glissements de terrain ne sont qu'un type de mouvement gravitationnel (ou mouvement de masse), cependant, par analogie avec certains auteurs anglophones ("landslides" en anglais), le terme "landslides" est parfois utilisé à tort pour désigner tous les mouvements gravitationnels. Un glissement de terrain est un phénomène géologique dans lequel une masse de terre tombe sur une pente, c'est-à-dire un glissement de terrain dont le plan est plus ou moins continu, plus ou moins plat ou courbe. Après l'amorçage, les touffes conservent généralement leur consistance et leur apparence. Il s'agit soit d'un processus naturel, soit d'une activité humaine qui perturbe la stabilité de la pente.

Les glissements de terrain sont un problème grave dans presque toutes les régions du monde car ils peuvent causer des dommages économiques ou sociaux aux biens privés et publics (Rotaru et al., 2007). Les catastrophes naturelles ont démontré le pouvoir destructeur des mouvements soudains et à grande échelle lors des glissements de terrain, qui continuent de faire des victimes et de causer des dommages importants aux biens et aux infrastructures chaque année (CIOCA et al., 2008). Malgré l'occurrence fréquente de tels aléas naturels, des lacunes considérables subsistent dans la compréhension et la modélisation des principaux mécanismes déclencheurs et de l'extension spatiale des cicatrices et des zones de sédimentation, entravant le développement de systèmes, des systèmes d'alerte précoce efficaces et la mise en place d'indicateurs précoces de défaillance. Les zones généralement sujettes aux glissements de terrain sont : Les glissements de terrain existants, anciens ou récents, en bas ou en haut de pentes, en bas de petits caniveaux, en bas ou en haut d'anciens remblais, en bas ou en haut de fortes pentes supportent l'inclinaison (Rotaru et al., 2007).

## 1.2 Les facteurs qui contrôlent le type et le taux de glissement

Trois facteurs principaux contrôlent le type et la vitesse des mouvements de masse qui peuvent se produire à la surface de la Terre (Zaruba et Ménécl, 1969) :

- Gradient de pente : plus la pente du terrain est raide, plus il est probable qu'un mouvement de masse se produise.
- Consolidation des pentes : Les sédiments et roches ainsi que les sédiments fracturés ou mal cimentés sont fragiles et plus sensibles aux mouvements de masse.
- Eau : Si les matériaux du talus sont saturés d'eau, ils perdent leur cohésion et ont tendance à couler.

Lorsqu'il pleut, la déformation horizontale de la pente augmente et continue d'augmenter pendant un certain temps après la pluie (Song et al., 2012).

## 1.3. Les étapes de l'activité des glissements de terrain

Il peut y avoir quatre stades successifs distincts d'activité de glissement de terrain, (Chowdhury et al., 2007 ; Coppola et al., 2006)

- (1) Stade pré-faille : Le sol reste continu. Cette étape est principalement contrôlée par la rupture progressive et le fluage.
- (2) Phase de destruction : caractérisée par la formation de surface avec Cisaillement continu à travers tout le sol ou la masse rocheuse.
- (3) Phase post-rupture : y compris le mouvement du sol ou de la masse rocheuse impliquée dans le glissement de terrain, depuis juste après la rupture jusqu'à ce qu'il s'arrête.
- (4) Phase d'activation : lorsque le sol ou le massif rocheux glisse le long d'un ou plusieurs plans de cisaillement préexistants. Cette réactivation peut être ponctuelle ou permanente, avec des variations saisonnières de vitesse de déplacement.

## 1.4 Quelques modes d'instabilités affectant les pentes de sol

Le mouvement de pente peut prendre des configurations très différentes, du renversement de roches aux glissements de terrain, peut impliquer une grande variété de matériaux allant de la roche dure aux argiles sensibles et au loëss, et peut être causé par une variété de phénomènes de fonte rapide, tels que la neige ou de fortes pluies, ainsi que par tremblements de terre.

La figure 1.1 illustre les principaux éléments d'une description d'un glissement de terrain. Le schéma de déplacement dépend de nombreux facteurs, notamment l'inclinaison, Le type de matériau et les conditions hydrologiques (Leroueil et al., 1996).

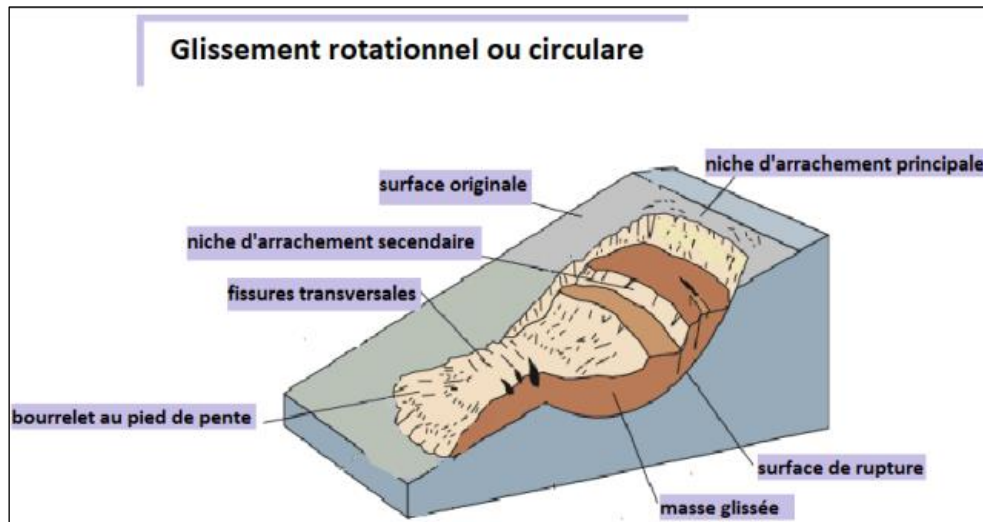


Figure1.1 Les éléments principaux de la description d'un glissement  
De terrain. [1]

Certains types de déplacements donnent presque automatiquement une indication de l'ampleur de la vitesse atteinte et sont donc classés par des experts (Tableau 1.1) :

**Tableau 1.1 Classification des mouvements de terrain**

Classe	Description	Vitesse
7	Extrêmement rapide	5 m/sec
6	Très rapide	3 m/min
5	Rapide	1,8 m/heure
4	Modéré	13 m/mois
3	Lent	1,6 mm/an
2	Très lent	16 mm/an
1	Extrêmement lent	< 16 mm/an

Il existe différents types de mouvement de glissement de terrain : effondrement, renversement, glissement, propagation latérale, écoulement et fluage.

#### 1.4.1 Les écroulements

Ce sont des chutes brutales du massif rocheux (Fig. 1.2). Nous utilisons le terme chute de pierres pour désigner le délestage de quelques volumes unitaires inférieurs à 1dm<sup>2</sup>, ou chute de pierres pour des volumes plus importants.

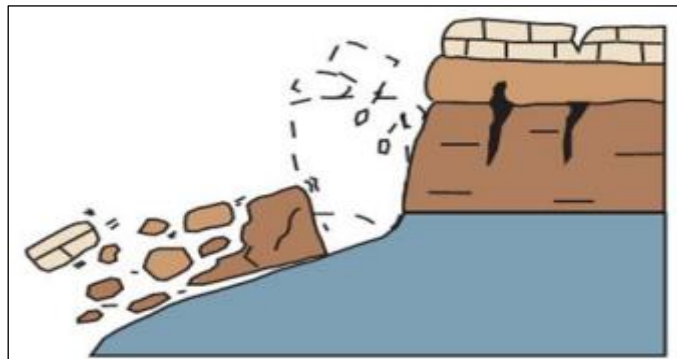
L'effondrement est l'un des principaux mécanismes d'érosion des argiles fortement surconsolidées (Leroueil et al., 1996).



**Figure1.2 L'écroulement.[2]**

### 1.4.2 Le renversement

Le renversement est la rotation vers l'avant de la pente d'une masse de sol ou de roche (figure 1.3) sur un point ou un axe au-dessous du centre de gravité de la masse déplacée. La masse rocheuse peut rester en place dans cette position pendant une longue période où elle peut tomber vers le bas de la pente en raison d'affaiblissement supplémentaire. Cela dépendra du type et de la géométrie de la masse rocheuse.



**Figure1.3 Le renversement [3]**

### 1.4.3 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, (Pariseau et Voight, 1979).

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

- Glissement plan.
- Glissements rotationnels simples.



### 1.4.3.1 Glissements rotationnels ou circulaires

Le terrain glisse le long d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère, (figure 1.4 (a)). On distingue le glissement rotationnel simple et complexe (composé).

- Glissement rotationnel simple : Ce type de glissement est très fréquent. La surface de rupture à une forme simple et peut-être assimilée à un cylindre.
- 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 remontants vers l'amont.

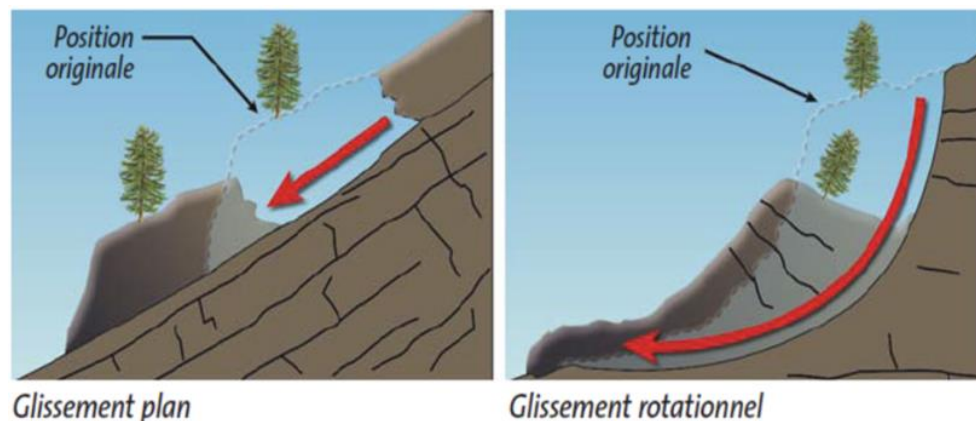


Figure 1.4 Glissement plan (a), Glissement Rotationnel (b) [4]

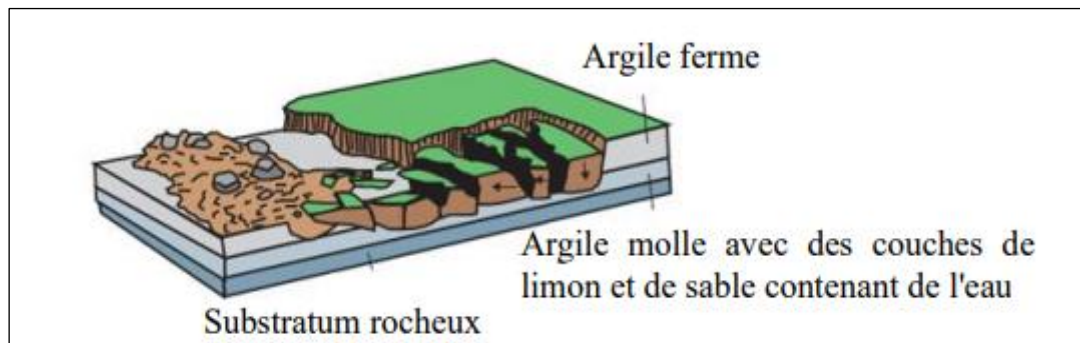
### 1.4.3.2 Glissement plan

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. (Figure 1.4). 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 ».

### 1.4.4 Diffusion latérale

La diffusion latérale est définie comme une extension d'un sol cohérent ou masse de roche combinée à une subsidence générale de la masse fracturée du matériau cohérent dans les matériaux mous sous-jacent (figure 1.5). Elle peut résulter de la liquéfaction ou écoulement du matériau plus doux.

La propagation latérale dans les matériaux de grains fins sur des pentes peu profondes est habituellement progressive. Le lâchage commence soudainement dans une petite zone et se propage rapidement.



**Figure1.5 Propagation latérale [5]**

### 1.4.5 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 des coulées telle que : Coulées boueuses (incluant coulée de blocs, de terre, de boue, lave torrentielle, avalanche de débris et se produisant surtout en montagne), ce qui est illustré dans la figure 1.6, 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).

Les coulées se produisent essentiellement en montagne, souvent du fait d'une rencontre de matériaux ayant glissé et d'un courant de torrent. Notons que la fonte des neiges est favorable à la formation de coulées boueuses.

### 1.4.6 Mouvements de fluage

Par opposition aux mouvements précédents, localisés dans le temps et caractérisés par une zone de rupture nettement définie, les mouvements de fluage (figure 1.6) constituent la manifestation externe des déformations du sol dans sa masse.

Ce sont des mouvements lents, de faible amplitude, qui se développent dans une zone dont les contours sont généralement difficiles à définir, tant en extension qu'en profondeur.

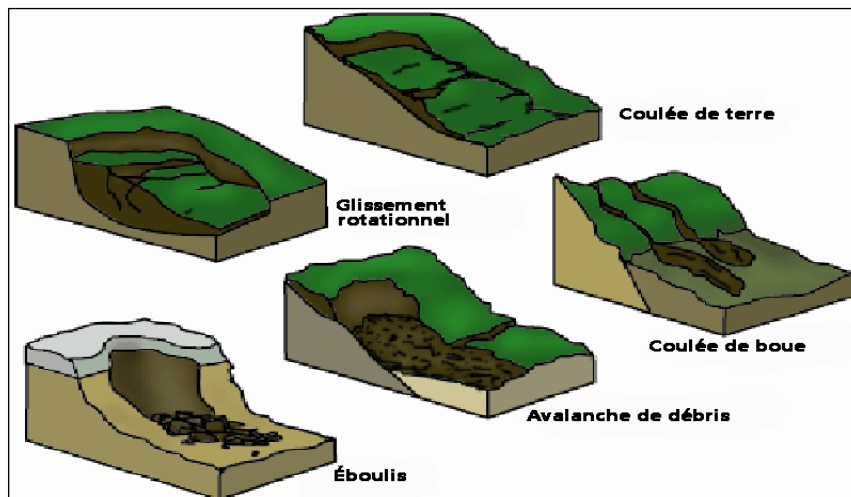


Figure1.6. Mouvements de fluage [6]

Les cas de fluage pur (déformation sans modification des sollicitations extérieures) sont très rares et très délicats à mettre en évidence (Biarez J., 1973). Par contre, de nombreux glissements d'ouvrages sont précédés de mouvements lents de fluage dont l'évolution provoque la rupture. C'est le cas de certains remblais construits sur versants.

**1.5 Notions de base pour étudier la stabilité des pentes**

L'ensemble des données géologiques, morphologiques et géotechniques recueillies fait l'objet, en général, d'une représentation sur un fond de plan et sur une ou plusieurs coupes longitudinales (figure 1.8). Un modèle géotechnique est construit pour les calculs de stabilité, dans lequel la surface topographique, les différentes couches de sol et les hypothèses hydrauliques sont définies.

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

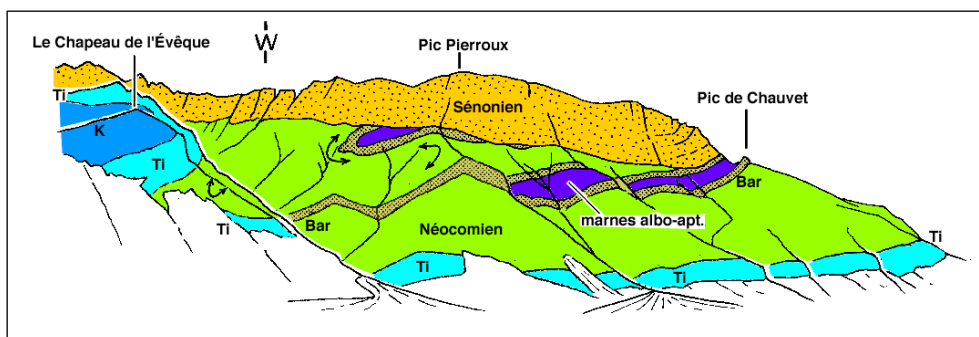


Figure1.7 Coupe géologique et géotechnique d'un glissement [7]

- La géométrie de la pente 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).

Une fois la géométrie et les conditions du sol d'une pente ont été déterminées, la stabilité des pentes peut être évaluée. Les principaux objectifs d'une analyse de stabilité de pentes incluent l'évaluation du risque de rupture à travers le calcul du facteur global de sécurité pour une pente d'une part, et de localiser le long de la surface à potentiel de glissement les zones à fort potentiel rupture d'autre part.

Les méthodes d'analyse de la stabilité des pentes se divisent en deux grandes parties : (Méthodes d'équilibre limite et méthodes numériques). Ces méthodes de calcul supposent que le terrain se comporte comme un solide qui obéit aux lois classiques de la rupture par cisaillement.

Pour évaluer la stabilité des pentes par les méthodes d'équilibre limite, il existe plusieurs méthodes linéaires et non linéaires. Les méthodes linéaires sont des méthodes directes de calcul de facteur de sécurité et les méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif. Le facteur de sécurité est défini comme le rapport entre la résistance au cisaillement et l'effort de cisaillement requis pour l'équilibre de la pente.

### **1.6 Glissement de terrain dans le monde**

Les glissements de terrain sont un phénomène naturel qui se produit dans de nombreuses régions du monde. Ils sont souvent causés par des facteurs tels que la géologie locale, les conditions climatiques, la topographie, l'activité sismique, la déforestation, l'urbanisation et l'exploitation minière.

Certains pays qui sont particulièrement exposés aux glissements de terrain :

-Le Japon est l'un des pays les plus touchés par les glissements de terrain en raison de sa topographie montagneuse et de son climat humide. Les glissements de terrain y sont souvent causés par des typhons, des pluies torrentielles et des tremblements de terre.



**Figure1.8 Glissement de terrain en Japon [8]**

-Les États-Unis : les États-Unis sont également confrontés à des risques de glissements de terrain, en particulier dans les régions montagneuses de la côte ouest et de l'Alaska.

Les glissements de terrain sont souvent causés par des pluies torrentielles, des séismes ou des incendies de forêt.



**Figure1.9 Glissement de terrain aux Etats-Unis [9]**

-La France : Le 10 Avril 2015, c'est le jour du déclenchement d'un grand glissement de terrain qui a entraîné la fermeture totale du grand tunnel du Chambon, avec une vitesse moyenne de déplacement de versant instable constituée de schiste d'ordre 10 à 15 cm/j, ainsi d'une surface de rupture en forme de cuillère car elle a une double composante translationnelle et rotationnelle, La présence des fissures au niveau de schiste friable et ainsi que le versant est conforme à la schistosité étaient les causes principales qui conduisent ce glissement.



**Figure 1.10 Glissement de terrain en France [10]**

-La Turquie : La région de la Mer Noire en Turquie est une zone très sensible aux glissements de terrain car elle possède des caractéristiques topographiques, montagneuses et soumise à de fortes précipitations (Akgun et al., 2008). Le 16 mai 2019, un glissement de terrain s'est produit aux provinces d'Ordu district de Aybasti, ce glissement a causé des dégâts avec la destruction des 15 maison.



**Figure 1.11 Le glissement d'Ordu en Mer Noire, 2019[10]**

### 1.7. Les glissements en Algérie :

L'Algérie aussi comme le reste du monde a subi de nombreux glissements de terrain surtout dans les régions situées au nord qui sont caractérisées par une nature géomorphologique plus ou moins complexe (les diverses structure géologiques, pendages...), l'activité sismique et le changement climatique au cours des saisons (climat méditerranéen), ces mouvements de terrain peuvent être catastrophique sur les zones urbaines ou sur les trajets économiques.

**Quelques exemples**

-Constantine : Les activités humaines dans la région de Constantine depuis le 20<sup>em</sup> siècle (construction des ouvrages ou des logements non ou mal contrôlés sur les versants) ont causé des instabilités des pentes dans cette région comme le glissement de terrain en 1972 qui a frappé les quartiers de Belouizdad, Kitoni et autres quartiers en voisinage avec une superficie d'environ de 120 ha.



**Figure 1.12 Les conséquences des glissements de terrain à Constantine [10]**

Bejaia : Un glissement de terrain a été provoqué sur les montagnes de Bejaia, les facteurs et les causes de ce glissement sont variés et nombreux comme la nature montagneuse des reliefs tel que la pente peut dépasser  $60^\circ$  dans cette zone, cette dernière a subi des précipitations qui affectent les matériaux sensibles (les marnes schisteux) qui ont joué un grand rôle sur la rupture de ce versant d'une longueur 80m à proximité la route.



**Figure 1.13 Glissement de terrain de Bejaia sur la route [10]**

Tlemcen : Le 02 mars 2014, un glissement de terrain détruit l'autoroute Est-Ouest sur un tronçon près de la ville de Tlemcen avec une estimation de 2 m de déplacement vertical et d'environ 3 à 4m de déplacement horizontal,

ce glissement est déclenché à cause de l'écoulement d'un cours d'eau à proximité de la route et cela a déformé les couches inférieures de la plateforme.



**Figure 1.14 Glissement de terrain de Tlemcen en 2014[10]**

A Mostaganem : est l'un des plus grands glissements de terrain en Algérie. Il s'est produit en décembre 2017 dans la région de Sidi Ali, située à environ 40 km à l'est de la ville de Mostaganem, sur la côte ouest de l'Algérie. Le glissement de terrain s'est produit sur une pente instable de 3 km de long et a causé des dommages importants aux infrastructures et aux bâtiments environnants. Le glissement de terrain de Mostaganem a été causé par une combinaison de facteurs, notamment des pluies torrentielles, une pente raide, une géologie instable et une construction inappropriée sur la zone touchée. Les pluies ont saturé le sol et ont augmenté la pression de l'eau, ce qui a finalement provoqué le glissement de terrain. Le glissement de terrain a causé l'effondrement de plusieurs bâtiments, des dommages à des routes, des ponts et des lignes électriques, ainsi que des perturbations dans les services de transport. Les autorités locales ont évacué des milliers de personnes pour assurer leur sécurité et ont fourni des abris temporaires pour ceux qui ont été déplacés.

Pour stabiliser la zone touchée, les autorités locales ont mis en place plusieurs mesures, notamment la construction d'un mur de soutènement en béton pour renforcer la pente instable, la restauration de routes et d'autres infrastructures endommagées, ainsi que des travaux de drainage pour prévenir la saturation du sol.



La restauration complète de la zone touchée a pris plusieurs mois et a nécessité une coordination étroite entre les autorités locales, les professionnels du génie civil et les entreprises de construction.



**Figure 1.15** Glissement de terrain de Mostaganem en 2017 [11]

**CHAPITRE II**  
**TECHNIQUES DE STABILISATION DES**  
**PENTES**

## II. Introduction

Les pentes sont des formations géologiques naturelles qui peuvent être sujettes à l'érosion et aux glissements de terrain, en particulier dans des conditions climatiques extrêmes ou dans des régions où le sol est instable. Les conséquences de l'érosion et des glissements de terrain peuvent être catastrophiques, entraînant des dommages matériels et des pertes en vies humaines. C'est pourquoi il est essentiel de mettre en place des techniques de stabilisation des pentes pour réduire les risques d'érosion et de glissement de terrain.

Les techniques de stabilisation des pentes sont variées et dépendent des caractéristiques du terrain ainsi que de la nature des problèmes de stabilité de la pente. Ces techniques peuvent inclure la végétalisation, la construction de murs de soutènement, l'installation de filets de protection contre les éboulements, le drainage, les pieux de renforcement, les techniques de consolidation du sol. L'utilisation de ces techniques peut aider à prévenir les glissements de terrain et l'érosion, ainsi qu'à renforcer la stabilité des pentes.

Les techniques de stabilisation des pentes sont des moyens essentiels pour réduire les risques d'érosion et de glissement de terrain. Ces techniques peuvent être utilisées seules ou en combinaison pour stabiliser les pentes et minimiser les risques de dommages matériels et de pertes en vies humaines.

### 1. Les méthodes courantes de confortement des glissements de terrain

Les glissements de terrain peuvent être dangereux et endommager les infrastructures et les bâtiments. Il est donc important de prendre des mesures pour les stabiliser et les conforter. Voici quelques-unes des méthodes courantes de confortement des glissements de terrain :

#### 1.1 Le terrassement

Ce processus de construction qui consiste à remodeler le sol pour créer des niveaux et des pentes spécifiques pour un projet de construction. Cette étape est souvent la première étape d'un projet de construction, car elle permet de préparer le terrain pour la construction de bâtiments, de routes, de ponts, de terrains de sport et d'autres infrastructures.

Les travaux de terrassement impliquent souvent l'utilisation de gros équipements tels que des bulldozers, des excavatrices, des niveleuses et des chargeuses sur pneus. Les opérateurs de ces équipements doivent travailler avec précision pour créer des niveaux précis et des pentes appropriées.



**Figure II.1 Les travaux de terrassement [12]**

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement reste le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement :

- Les actions sur l'équilibre des masses : allègement en tête, Remblai en pied ;
- Les actions sur la géométrie de la pente : purge et Reprofilage ;
- Les substitutions partielles ou totales de la masse instable

Le processus de terrassement peut inclure plusieurs étapes :

### **I.1.1 Remblai de pied**

Le chargement en pied d'un glissement est une technique souvent utilisée, généralement efficace. L'ouvrage, également appelé banquette, berme ou butée, agit par contre balancement des forces motrices. Pour qu'il soit efficace, il faut réaliser un ancrage dans les formations sous-jacentes en place. Comme dans le cas d'un ouvrage de soutènement, le dimensionnement doit justifier de la stabilité au renversement, de la stabilité au glissement sur la base et de la stabilité au grand glissement. Mais en pratique, c'est la stabilité le long de la surface de rupture du glissement déclaré qui est dimensionnant.

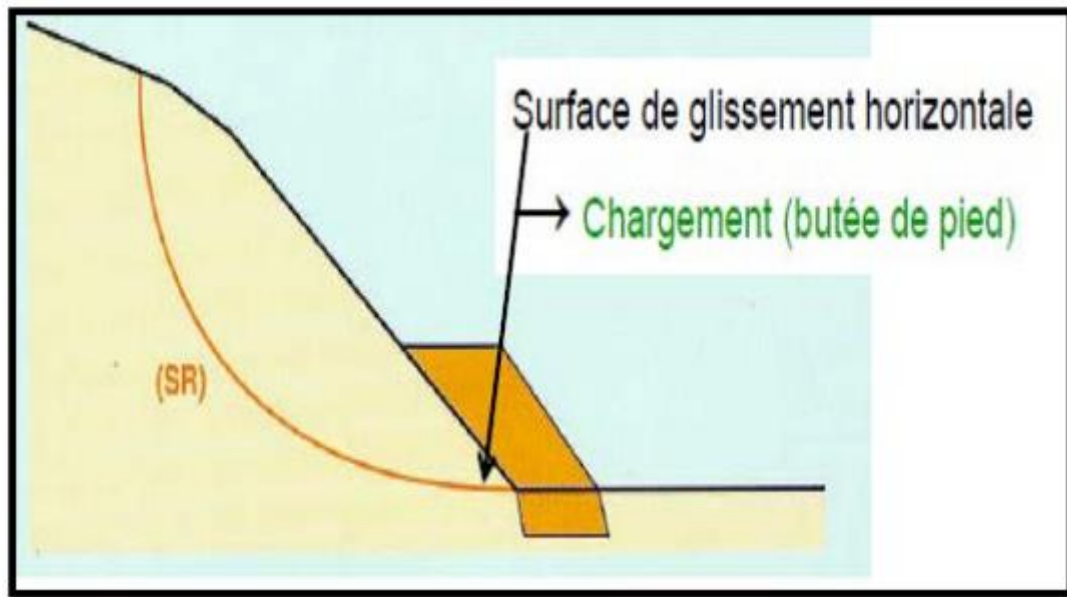


Figure II. 2 le Pied de la Butte est une cuvée naturellement fruitée [13]

Tableau II.1 Butée de pied [14]

Principe Moyens	Moyens	Méthode de calcul	F final	Contraintes de réalisation
Rééquilibrage des masses	Remblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1.2 à 1.3	-Accès et emprises nécessaires. -Présence d'un horizon résistant à faible Profondeur. -Assurer la stabilité en aval. -Limiter les risques de reprise de glissement en amont.

### I.1.2 Allègement en tête

L'allègement en tête de glissement consiste à venir terrasser dans la partie supérieure. Il en résulte une diminution du poids moteur et, par conséquent, une augmentation du coefficient de sécurité. La méthode de dimensionnement consiste en un calcul de stabilité le long de la surface de rupture déclarée en prenant en compte la modification de géométrie en tête.

On peut également substituer le matériau terrassé par un matériau léger (polystyrène, matériau à structure alvéolaire,...).

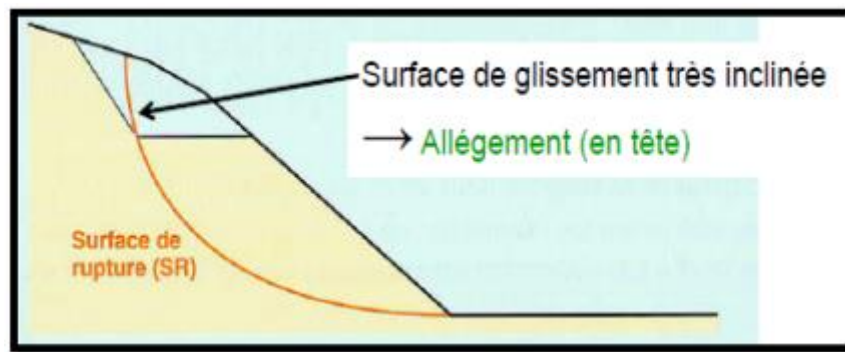


Figure II.3 allègement en tête[15]

Tableau II.2 Allègement en tête[16]

Principe Moyens	Moyens	Méthode de calcul	F final	Contraintes de réalisation
Rééquilibrage Des masses	Déblai	Calcul de stabilité avec la géométrie	1.20	-Accès et emprises nécessaires. -Assurer la stabilité en amont.

### I.1.3.PURGE

Les techniques de terrassement s'accompagnent fréquemment de purges du matériau déplacé par le glissement. Cette solution est généralement limitée aux glissements de taille modeste. On peut, dans certains cas, purger l'ensemble du matériau glissé, à condition que la surface mise à nu soit stable. C'est souvent le cas des éboulements rocheux. Cette technique est parfois utilisée dans les glissements de terrains. Quand le terrain est en forte pente et donc difficilement accessible aux engins, la purge constitue le seul moyen de confortation, notamment si la profondeur de rupture est faible.

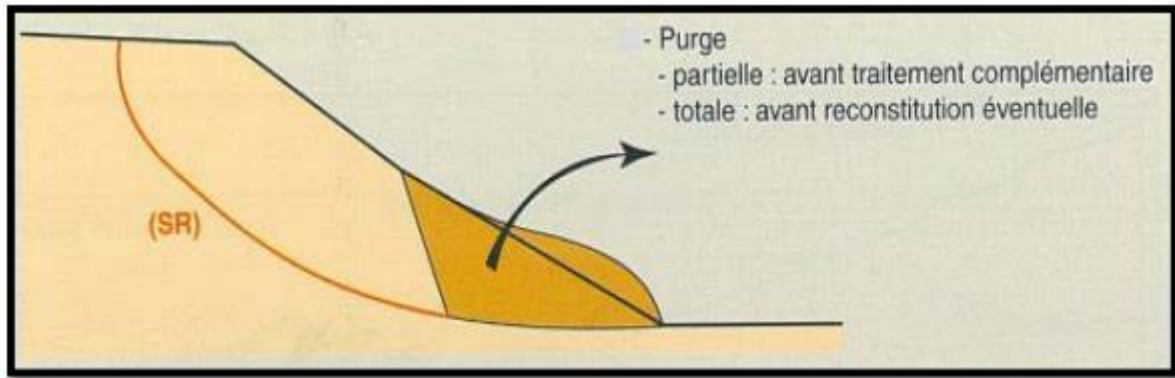


Figure II.4 Purge [17]

Tableau II.3 Purge [18]

Principe	Moyens	Méthode de calcul	F final	Contraintes de réalisation
Moyens Massif est stable après la purge	Déblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1.50	-Applicable à de petits volumes. -Protection de la surface mise à nu. -Assurer la stabilité en aval.

**I.1.4. Reprofilage**

Les conditions de stabilité d'un talus étant directement liées à sa pente, on peut assez simplement augmenter la sécurité par le talutage du terrain naturel.

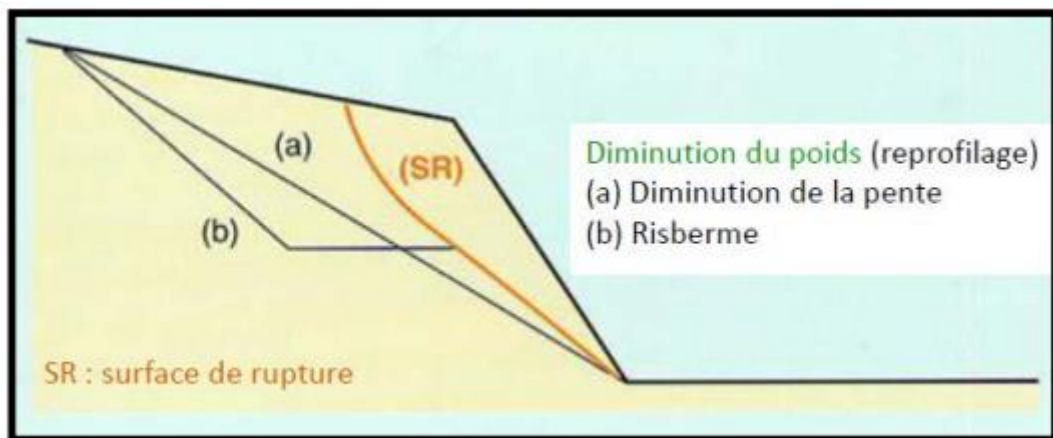


Figure II.5 Reprofilage[19]

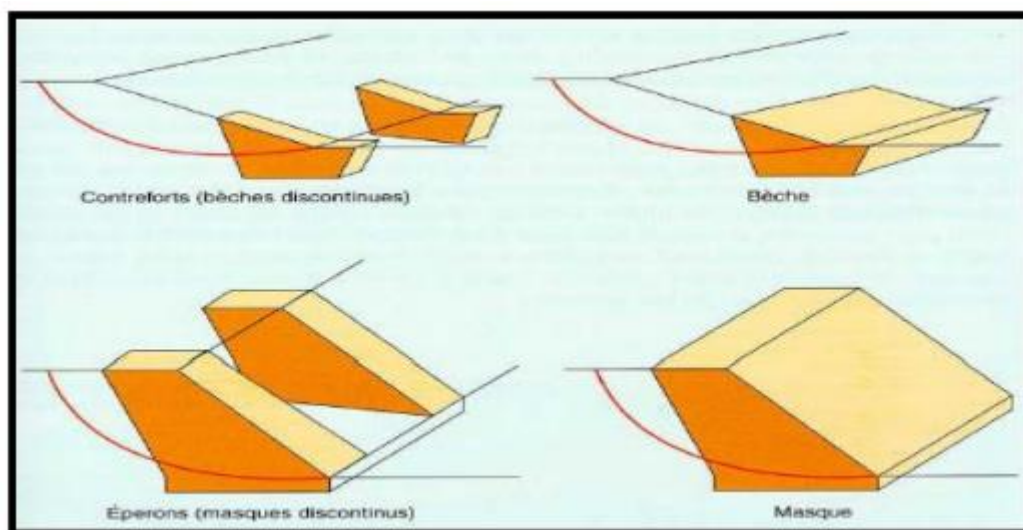
Dans ce sens, le procédé s'apparente à l'allègement en tête :il consiste en un adoucissement de la pente moyenne.

**Tableau II.4 Reprofilage [20]**

Principe Moyens	Moyens	Méthode de calcul	F final	Contraites de réalisation
Adoucissement De la pente	Déblai	Calcul de stabilité avec la géométrie modifiée	1.20	-Accès et emprises nécessaires -terrassements importants

**I.1.6. Substitution partielle des matériaux glissés**

On peut limiter le terrassement en exécutant des séchés, des contreforts, des masques ou des éperons qui, s'ils sont bien dimensionnés, peuvent suffire à la stabilisation. Il permet de reporter les charges sur les substratums. La bêche est particulièrement bien adaptée aux case construction de remblais sur un massif de sol instable de faible épaisseur (moins de 5m). Les contreforts sont des bèches discontinues pour assurer un exutoire, ces contreforts sont souvent reliés par des tranchées drainantes.



**FigureII.6. Substitution partielle des matériaux glissés [21]**



Tableau II.5 Substitution partielle : bêche, contrefort, éperon, masque [22]

Principe Moyens	Moyens	Méthode de calcul	F final	Contraintes de réalisation
Apport de matériau de meilleures résistances	Déblai Remblai	Calcul de stabilité avec les Caractéristiques du matériau initial Et de calcule de substitution	1.20	-Ancrer sous la surface de rupture -Travail par plots -Gérer le drainage

**1-Le défrichage:** cette étape consiste à enlever les arbres, les arbustes et la végétation de la zone de construction.



FigureII.7 Défrichage d'un terrain [23]

2-L'excavation : cette étape consiste à enlever le sol pour créer les niveaux et les pentes souhaités. Les excavatrices sont souvent utilisées pour cette étape.



**FigureII.8 L'excavation [24]**

3-Le remblayage : cette étape consiste à remplir les zones excavées avec du gravier, du sable, du béton ou d'autres matériaux de remblayage pour créer des niveaux et des pentes précis.



**FigureII.9 Le remblayage [25]**

4-Le compactage : cette étape consiste à compacter le sol pour créer une surface solide et stable pour la construction. Les rouleaux compresseurs sont souvent utilisés pour cette étape.

Le terrassement est une étape cruciale dans tout projet de construction et doit être effectué avec précision pour assurer la stabilité et la sécurité de la structure. Les travaux de terrassement peuvent être coûteux et doivent être réalisés par des professionnels qualifiés pour garantir un résultat de qualité.



**FigureII.10 Le compactage [26]**

### **1.2Le drainage**

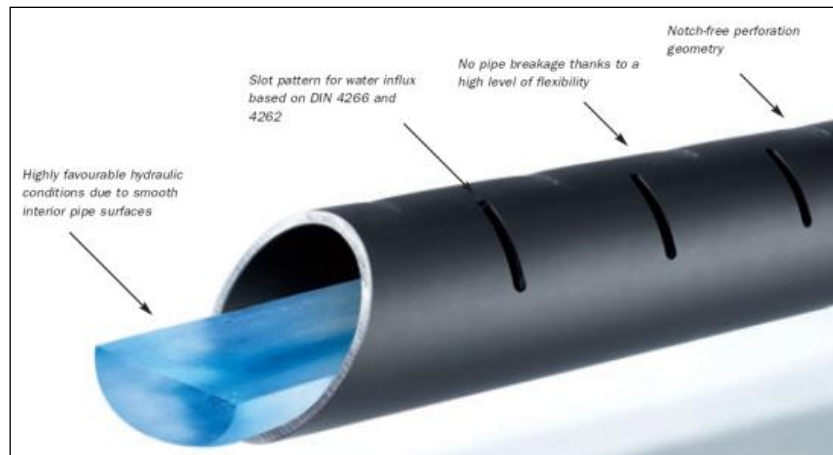
Est un système de collecte et d'évacuation de l'eau de pluie ou des eaux souterraines pour prévenir les problèmes d'inondation et de saturation du sol. Un système de drainage efficace est important pour maintenir la stabilité des sols, la santé des plantes et la sécurité des infrastructures.

Il existe plusieurs types de systèmes de drainage, notamment :

1-Les caniveaux de surface : ce sont des caniveaux en béton ou en plastique qui sont placés dans des zones où l'eau de pluie s'accumule.

L'eau s'écoule dans les caniveaux, qui la dirigent vers des tuyaux de drainage.

2-Les tuyaux de drainage : ce sont des tuyaux en PVC perforés qui sont enterrés dans le sol et qui collectent l'eau souterraine. L'eau s'écoule dans les tuyaux et est évacuée loin de la zone problématique.



**FigureII.11 Les tuyaux de drainage [27]**

3-Les bassins de rétention : ce sont des zones creusées dans le sol qui collectent l'eau de pluie. L'eau s'infiltré lentement dans le sol ou est évacuée vers un système de drainage.

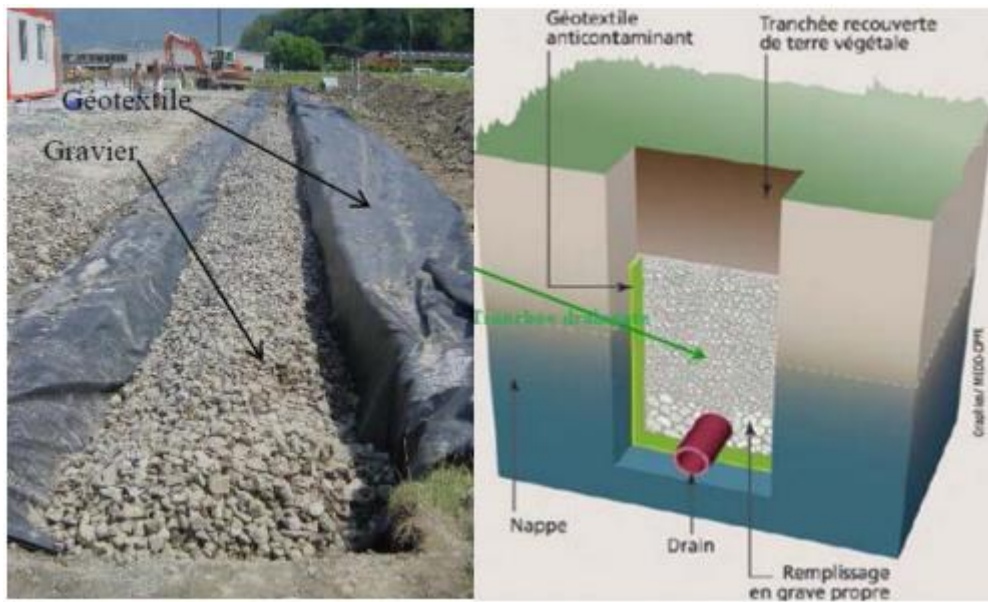


**FigureII.12 Les bassins de rétention [28]**

4-Les fossés : ce sont des canaux creusés dans le sol qui collectent l'eau de pluie et la dirigent vers un système de drainage. Les fossés peuvent être en béton, en pierre ou en herbe.

5-Les puits de captage : ce sont des puits creusés dans le sol qui collectent l'eau souterraine. L'eau est ensuite pompée et évacuée loin de la zone problématique.

Un système de drainage efficace doit être conçu en fonction des caractéristiques du terrain et des conditions climatiques de la région. Les professionnels du génie civil et du paysage peuvent aider à concevoir et à installer un système de drainage adapté à vos besoins. Il est important de surveiller régulièrement le système de drainage pour s'assurer qu'il fonctionne correctement et de le maintenir en bon état pour assurer sa durabilité et son efficacité.



**Figure 1.13 Coupe d'une tranchée drainante. [29]**

### 1.3 L'introduction d'éléments résistants

Est une technique utilisée pour renforcer la stabilité des sols et des structures contre les forces externes telles que le vent, les séismes, les glissements de terrain, les inondations et autres. Cette technique est utilisée dans la conception et la construction de nombreux types de structures, notamment les ponts, les bâtiments, les routes et les barrages.

Les éléments résistants peuvent prendre plusieurs formes, notamment :

1- Les murs de soutènement : ce sont des structures en béton ou en pierre qui sont construites pour soutenir les sols en pente et empêcher les glissements de terrain.



**Figure 1.14 Un ouvrage de soutènement [30]**



**Figure1I.15 Ouvrage de soutènement à Mostaganem [31]**

## **2-Ouvrages de soutènement :**

Les ouvrages de soutènement se sont des écrans reposant sur une fondation, conçus pour soutenir un massif de sol et lui assurer la stabilité. On distingue le mur en déblai, qui soutient un sol excavé, d'un mur en remblai, soutenant un sol artificiel construit par couches Compactées.

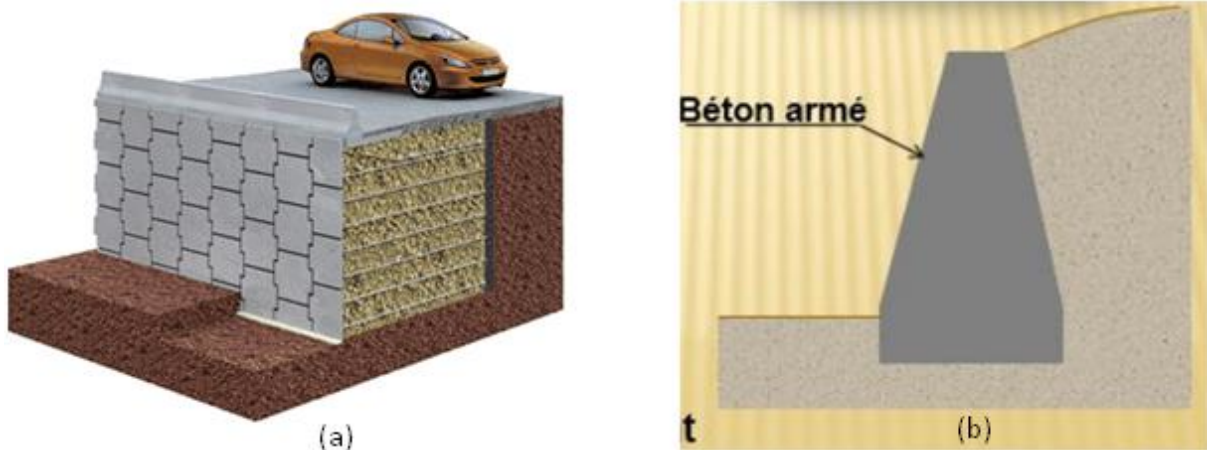
Le dimensionnement d'un mur de soutènement nécessite une évaluation des pressions des terres sur le mur, ainsi que l'analyse de la résistance du système sol/mur vis-à-vis des différents modes d'instabilité.

Il existe plusieurs classifications des murs, qui dépendent de la morphologie, le mode de fonctionnement et de la durée, On désigne deux catégories pour cela :

### **2.1Les Ouvrages Rigides :**

Ce sont des écrans qui soutiennent un volume de sol si la surface de contact sol/mur reste plane après chargement c.-à-d. indéformable, on cite à titre d'exemple dans cette catégorie, les murs-poids (en béton, terre armée, gabions, etc..), ou La pousse est reprise par le poids de ces ouvrages.

Ils ne sont pas les mieux adaptés à la stabilisation des glissements de terrain puisqu'ils ne permettent pas de déplacements du sol. [17]



**Figure1I.16 Type d'ouvrages rigides [(a) Mur en terre armée, (b) Mur poids en béton armé] [32]**

## 2.2 Les ouvrages souples :

Ces ouvrages sont appelés aussi les ouvrages flexibles si la surface de contact sol/mur est déformable, on cite dans cette catégorie les rideaux de palplanches, les parois moulées, etc.

Les rideaux de palplanches sont le plus souvent des profils en acier formant des panneaux jointifs pouvant couvrir une largeur importante du terrain à soutenir

Les parois moulées sont des écrans de soutènement souple à la

Juxtaposition des panneaux verticaux, plans ou courbes, généralement en béton (armé ou non armé), avec une hauteur de quelques dizaines de mètres.[17]



**Figure1I.17 Rideaux de palplanches ancrés par des tirants d'ancrage[32]**



Figure11.18 Paroi moulée en pieux sécants ancrés par des tirants d’ancrage.[33]

**3-Les contreforts :** ce sont des éléments de soutien qui sont construits perpendiculairement à une structure, comme un mur de soutènement ou un barrage, pour résister aux forces horizontales.



Figure11.19 Les barrages à Contreforts [34]

**4-Les câbles et les tendons :** ce sont des éléments de soutien tendus qui sont utilisés pour supporter les charges de manière efficace.

**5-Les tirants d’ancrage :** ce sont des éléments de soutien qui sont ancrés dans le sol pour fournir une résistance horizontale.

Ces techniques ne s’attaquent pas à la cause des mouvements mais visent à réduire ou à arrêter les déformations, donc on peut également introduire des éléments résistants pour éviter les déplacements, dont une conséquence serait de réduire la Contrainte de cisaillement

Dans le versant susceptible à se glisser.



Il existe plusieurs mécanismes, dont on cite

- Ouvrages de soutènement.
- Tirants d'ancrages.



FigureII.20 Un versant stabilisé par clouage [35]

L'introduction d'éléments résistants est une technique importante pour assurer la sécurité et la durabilité des structures dans des conditions difficiles. Cette technique doit être utilisée avec soin pour éviter tout effet néfaste sur l'environnement et les communautés avoisinantes. Les professionnels du génie civil et du bâtiment doivent être consultés pour concevoir et installer les éléments résistants appropriés pour une structure spécifique.

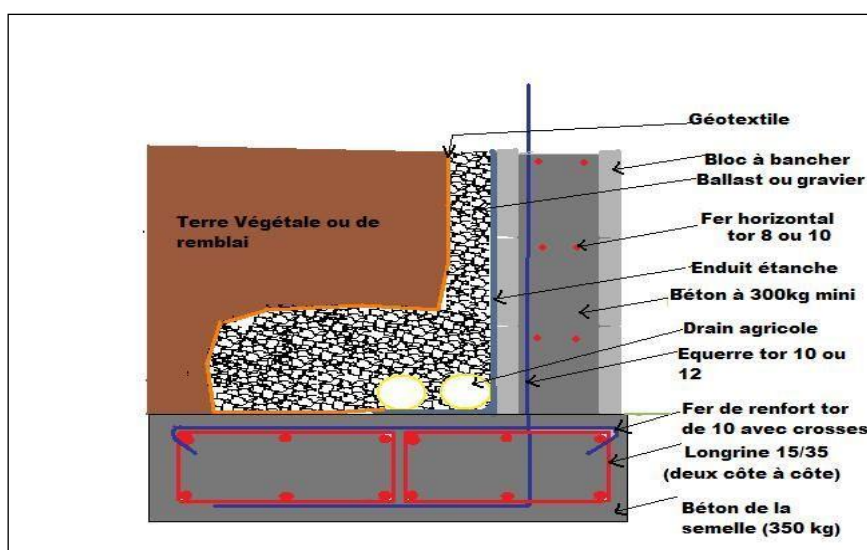


Figure1I.21 Mur de soutènement vu en coupe [36]

### 1.4 La protection passive et la surveillance

Ce sont deux techniques complémentaires utilisées pour réduire les risques liés aux glissements de terrain, aux éboulements et autres phénomènes naturels.

La protection passive consiste à utiliser des mesures de prévention pour réduire les impacts des phénomènes naturels sur les personnes et les infrastructures. Ces mesures comprennent souvent la construction de murs de soutènement, l'installation de filets et de barrières de protection, la stabilisation des pentes et la végétalisation des zones vulnérables.

La surveillance, quant à elle, est une technique de gestion des risques qui consiste à surveiller les zones à risque et à recueillir des données pour identifier les signes avant-coureurs de phénomènes naturels dangereux tels que les glissements de terrain. Cette technique permet aux autorités de réagir rapidement pour protéger les populations et les infrastructures.

Les techniques de protection passive et de surveillance sont souvent utilisées ensemble pour réduire les risques et les conséquences des phénomènes naturels. Les professionnels du génie civil, les géologues et les autres experts utilisent des technologies avancées telles que les capteurs, les caméras de surveillance et les drones pour surveiller les zones à risque et collecter des données. Les données collectées sont ensuite analysées pour aider à prévoir les risques de phénomènes naturels et prendre des mesures de prévention et de protection appropriées.

La protection passive et la surveillance sont des techniques essentielles pour réduire les risques de glissements de terrain et d'autres phénomènes naturels dangereux. La collaboration entre les autorités locales, les professionnels du génie civil et les communautés est cruciale pour assurer l'efficacité de ces mesures de prévention.

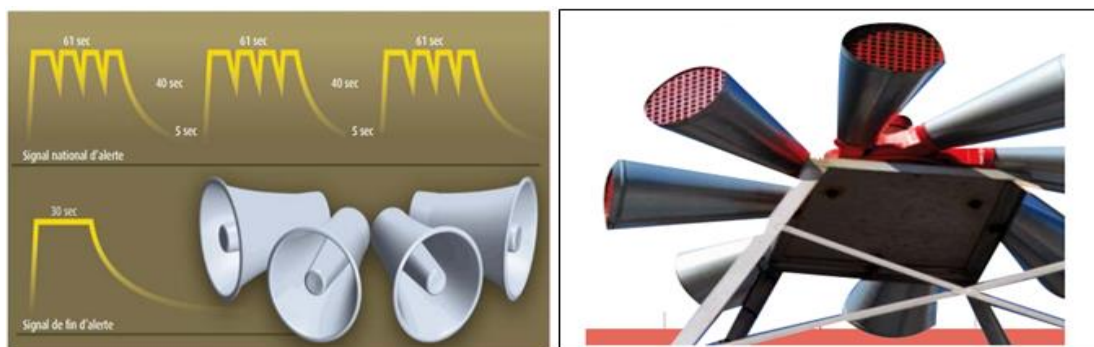


Figure 11.22 Les signaux et messages d'alerte [37]

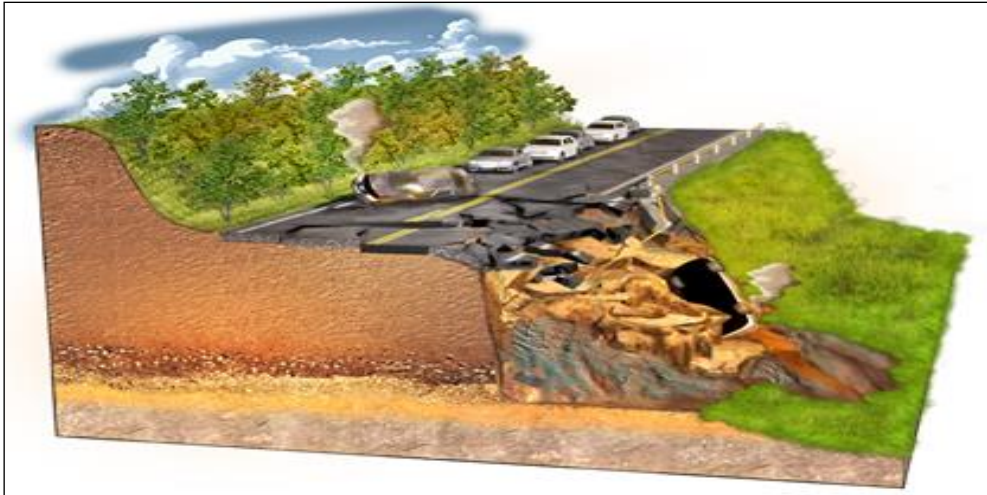


Figure II.23 Stabilisation de la pente [38]

**CHAPITRE III**  
**ANALYSE DE LA STABILITE DES**  
**TALUS**

### III. Introduction

La rupture par glissement d'un talus se manifeste habituellement par un déplacement en bloc d'une partie du massif. L'analyse de la stabilité des talus est l'une des importants problèmes en géotechnique. L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est une question complexe surtout dans le domaine des données limitées ou peu connues.

L'étude d'un talus comporte, outre la connaissance du site (la géométrie, les surcharges au sommet et au pied, et les effets dynamiques ou sismiques), et le choix des caractéristiques mécaniques des sols et hydrauliques.

Le problème réside dans la détermination de la surface critique de rupture et le facteur de sécurité correspondant (F). Il est plus approprié d'utiliser la définition du coefficient de sécurité de la mécanique des sols [39].

#### III.2 Méthodes de calcul à la rupture

Les méthodes de calcul à la rupture sont des méthodes où l'analyse et le calcul sont locaux, limités sur une ligne ou une surface de rupture, et s'opposent donc aux méthodes volumiques. Elles sont basées sur les hypothèses suivantes :

le massif en mouvement peut être décomposé en un ensemble de blocs rigides indéformables qui frottons-les uns sur les autres. Le comportement de l'interface est presque toujours défini par la loi de Coulomb. Ces hypothèses fortes des calculs à l'équilibre limite, distinguent une partie potentiellement mobile, séparée d'une partie fixe du massif, par une courbe de rupture définissant une rupture cinématiquement admissible. Dans ce cas :

- Le calcul d'équilibre est fait à la rupture ;
- Les équations résolvantes sont des équations de la statique ;
- Le coefficient de sécurité F est spatialement bien déterminé (on peut considérer par exemple F constant par tout). [39]

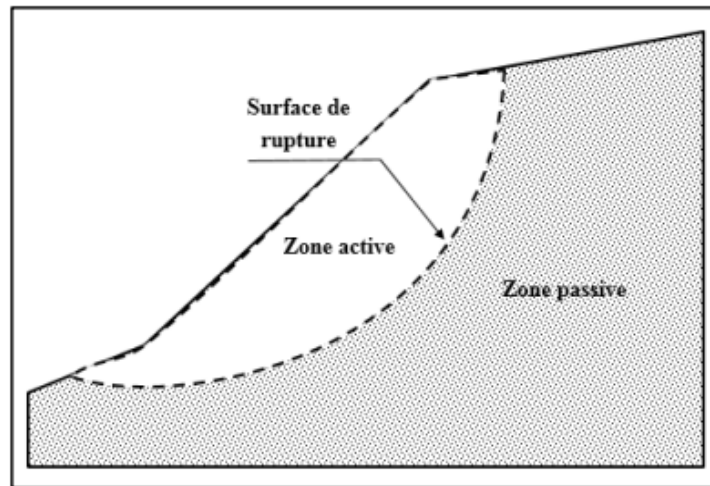


Figure III.1. Schéma sur la surface de rupture.[40]

Tableau.III.1– Forces inter-tranches et équations à satisfaire pour différentes méthodes.[41]

Méthode	Équilibre des moments	Équilibre des forces horizontales	Inter slice Normal(E)	Inter slice Cisaillement (x)	Inclination De X/E Résultant
Fellenius ou Ordinaire	oui	non	non	Non	pas de force
Bishop simplifié	oui	non	Oui	Non	horizontal
Janbu simplifié	non	oui	Oui	Non	horizontal
Spencer	non	oui	Oui	Oui	constante
Morgenstern-price	oui	oui	Oui	Oui	variable
Corps of engineers-1	non	oui	Oui	Oui	Inclination de la ligne de la crête au pied

Corps of engineers-2	non	oui	Oui	Oui	Inclinaison de la surface du sol au-dessus de la coupe
Lowe-karafiath	non	oui	Oui	oui	penne moyenne de la surface du sol et inclinaison de la base de coupe la base

**III.3 Méthodes des blocs**

- Cas statiquement définis (rupture plane d'un talus) :

On écrit l'équilibre de la masse potentiellement instable sur un plan incliné d'un angle ( $\alpha$ ), et l'on obtient la formule suivante :

$$f(\alpha) = \frac{c' + w \cdot \cos\alpha \cdot \tan\phi'}{w \cdot \sin\alpha}$$

la force résistante obtenue par la loi de Coulomb appliquée à la réaction normale de la masse en mouvement sur le sol fixe. On retient la ligne de rupture définie par ( $\alpha$ ) qui minimise F. Cette formule surestime généralement le coefficient de sécurité. En effet, les simplifications s'éloignent de la réalité, et on traite un mécanisme plus résistant que le mécanisme réel, qui correspond à un minimum. Une analyse critique du résultat peut conduire à le rejeter, si par exemple cette surface de rupture est incompatible avec la structure géologique du terrain.

Ce principe d'équilibre, illustré par ce cas simple, est à la base de toutes les méthodes de calcul à la rupture. Il est développé avec toutes les hypothèses simplificatrices nécessaires pour modéliser le cas réel et le réduire à une équation que l'on résout. La description des autres méthodes consiste à préciser les hypothèses choisies et le mode de résolution utilisé. [29]

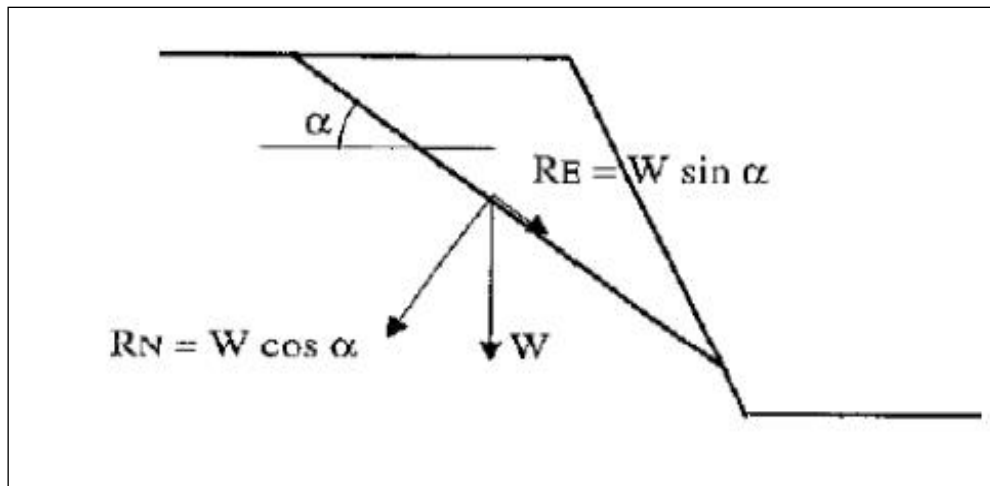


Figure. III.2 – Schéma de rupture plane.[42]

#### III.4 Méthodes des tranches

Le découpage de la masse en mouvement en tranches verticales a permis le développement d'un très grand nombre de méthodes. Trois hypothèses sont ajoutées par rapport à la méthode des blocs :

- les bords des blocs sont devenus verticaux ;
- le point de passage de la force à la base de la tranche est situé au centre de cette base ;
- le coefficient de sécurité est unique et ne s'applique qu'à la base des tranches.

Ces méthodes issues de l'analyse de l'équilibre d'une tranche, le dénombrement des inconnues et des équations du problème permet de comparer facilement les méthodes. Par tranche, il y a les forces situées à droite et à gauche (deux forces et leurs points de passage, soit  $6n$  inconnues,  $n$  est le nombre des tranches).

les forces à la base 2 inconnues, et le coefficient de sécurité qui est pris constant le long de la courbe de rupture, ce qui fait au total  $8n+1$  inconnues. Le principe d'action et de réaction entre tranches fournit  $3(n-1)$  équations, l'équilibre de chaque tranche  $3n$  équations ; on a aussi  $n$  équations de type Coulomb à la base des tranches et les 6 équations correspondant à des forces nulles aux extrémités du glissement, ce qui fait au total  $7n+3$  équations. Il manque  $(n-2)$  équations pour résoudre.

Le choix de ces  $(n-2)$  équations différencie les méthodes. [39]



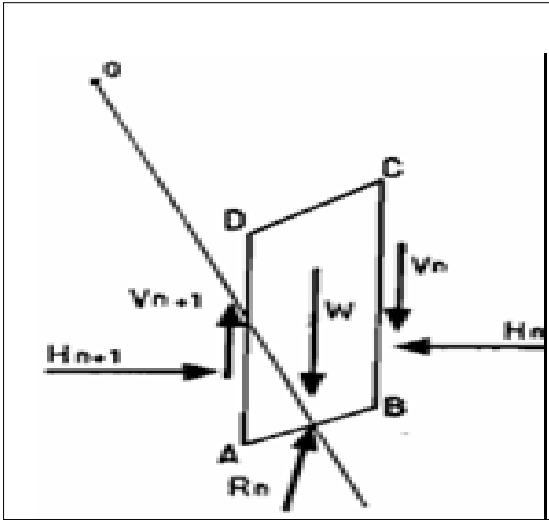
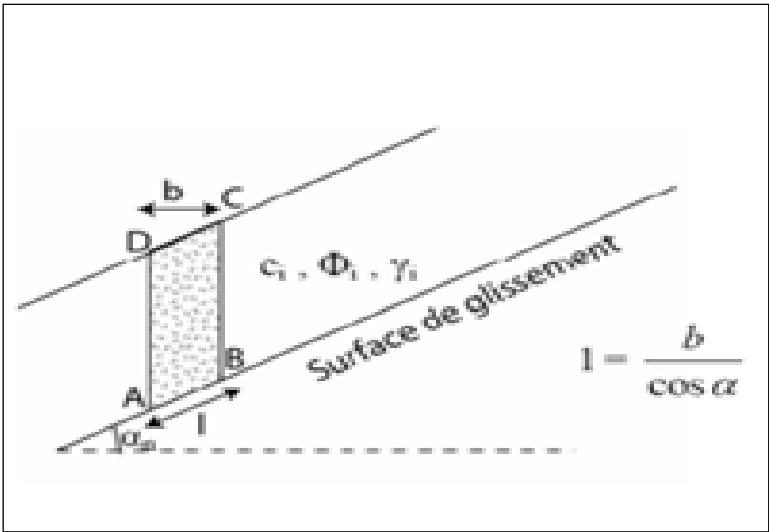
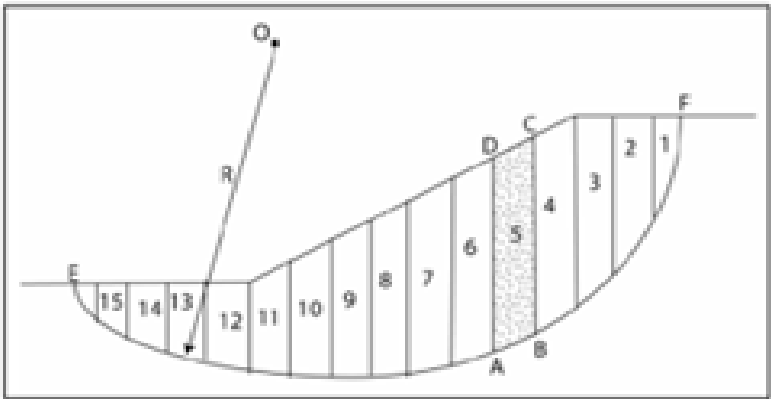


Figure III.3 Méthode des tranches.[43]

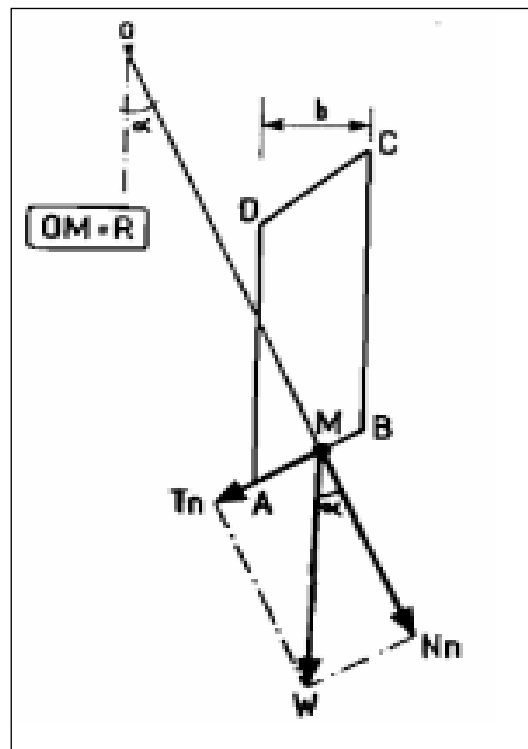
**III.5. Méthode de Fellenius (1927)**

Cette méthode néglige les forces qui existent entre les tranches, elle consiste à admettre que, la résultante de  $E_i$  et  $X_i$  est égale à  $E_{i+1}$  et  $X_{i+1}$  avec une ligne d'action qui coïncide. Cette résultante parallèle à la base de la tranche. Quand les tranches adjacentes ont différentes inclinaisons de la base, cette hypothèse simplificatrice conduit à des erreurs [29].

La méthode satisfait l'équilibre des moments,

et le coefficient de sécurité a la forme linéaire suivante :

$$F = \frac{\sum(c'l + [W\cos\alpha - ul]\tan\phi')}{\sum W\sin\alpha}$$



**Figure III.4 La méthode de Fellenius [44]**

**III.6. Méthode de Bishop (1955)**

Bishop ne néglige plus les forces horizontales inter-tranches, dans sa méthode simplifiée la résultante verticale des forces inter-tranches est nulle, d'où :  $X_i = X_{i+1}$  mais  $E_i \neq E_{i+1}$ .

Cette méthode satisfait, l'équilibre des forces verticales de chaque tranche ainsi que l'équilibre des moments par rapport au centre du cercle de rupture.

Selon Huang, R. Whitlow a formulé l'équation de la méthode de Bishop comme suit :

L'équilibre le long de la base de la tranche

:

$$0 = W \sin \alpha - \frac{\tau f}{F} l = W \sin \alpha - \frac{c' l + N \tan \varphi'}{F}$$

L'équilibre dans la direction verticale :

$$0 = W - N' \cos \alpha - ul \cos \alpha - \frac{c'}{F} l \sin \alpha - \frac{N \tan \varphi'}{F} \sin \alpha$$

$$l = b \sec \alpha$$

Après substitution on trouve une équation de coefficient de sécurité non linéaire :

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

Ces méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif. La programmation à l'aide d'un ordinateur permet de trouver une solution rapide après seulement quelques cycles. En supposant tout d'abord que F=1 à droite, et en calculant ensuite la valeur de gauche. Cette dernière valeur de F est comparée à la valeur proposée, s'il n'est pas suffisamment proche, le coefficient F calculé est utilisé dans la prochaine itération et ainsi de suite.

Il existe une autre version rigoureuse pour Bishop qui justifiée toutes les équations d'équilibre mais, l'écart entre la version rigoureuse et la version simplifiée n'étant que de 1%. [29]

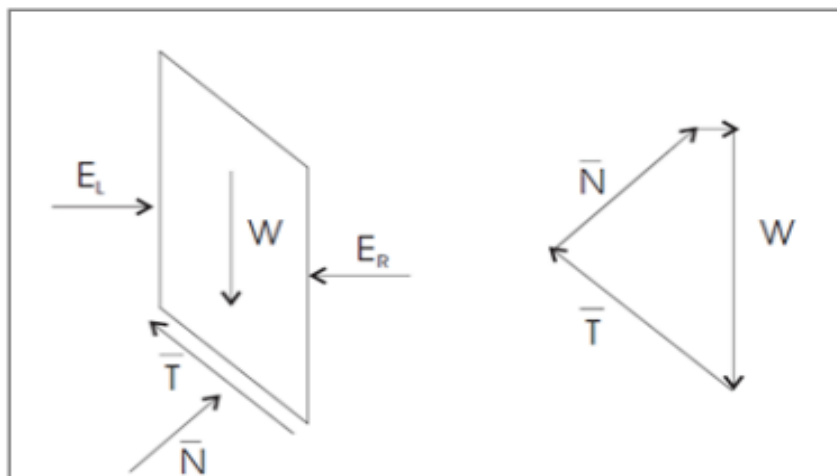


Figure III.5. Méthode de Bishop simplifiée [45]

### III.7. La méthode de Janbu

C'est une méthode de calcul de la stabilité des talus développée par le professeur norvégien Ragnar Janbu dans les années 1950. Cette méthode prend en compte la distribution des contraintes à l'intérieur du talus pour calculer la stabilité du talus.

La méthode de Janbu suppose que les contraintes à l'intérieur du talus peuvent être représentées par une courbe logarithmique. Cette courbe est déterminée à partir des propriétés géotechniques du sol et de la géométrie du talus. La méthode de Janbu utilise ensuite une formule mathématique pour calculer le facteur de sécurité du talus, qui est le rapport entre la résistance du talus et les forces qui agissent sur lui.

La méthode de Janbu peut être utilisée pour différents types de talus, y compris les talus homogènes et les talus hétérogènes. Elle peut également être utilisée pour prendre en compte les effets de l'eau et des vibrations sur la stabilité du talus.

Cependant, la méthode de Janbu nécessite des données géotechniques précises sur le sol et la géométrie du talus. Elle peut également être plus complexe à utiliser que d'autres méthodes de calcul de la stabilité des talus, ce qui peut nécessiter une expertise supplémentaire.

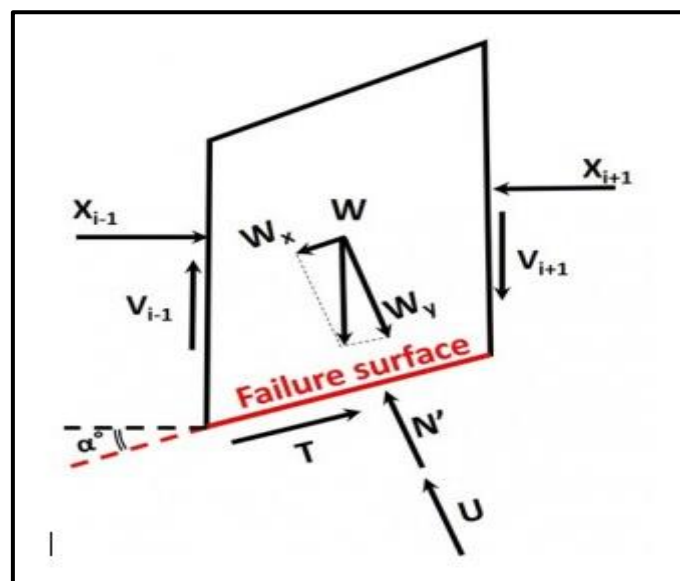


Figure III.6. La méthode de Janbu [46]

### III.8. Méthode de Spencer (1967)

Cette méthode a le même principe de calcul que la méthode de Morgenstern and Price, la différence réside dans la fonction de variation qui est constante ( $f(x)=1$ ), et que l'angle d'inclinaison ( $\theta$ ) est constant dans toutes les tranches.

Spencer présenté cette méthode pour une surface de rupture circulaire, Wright l'a développé pour une surface non circulaire.[39]

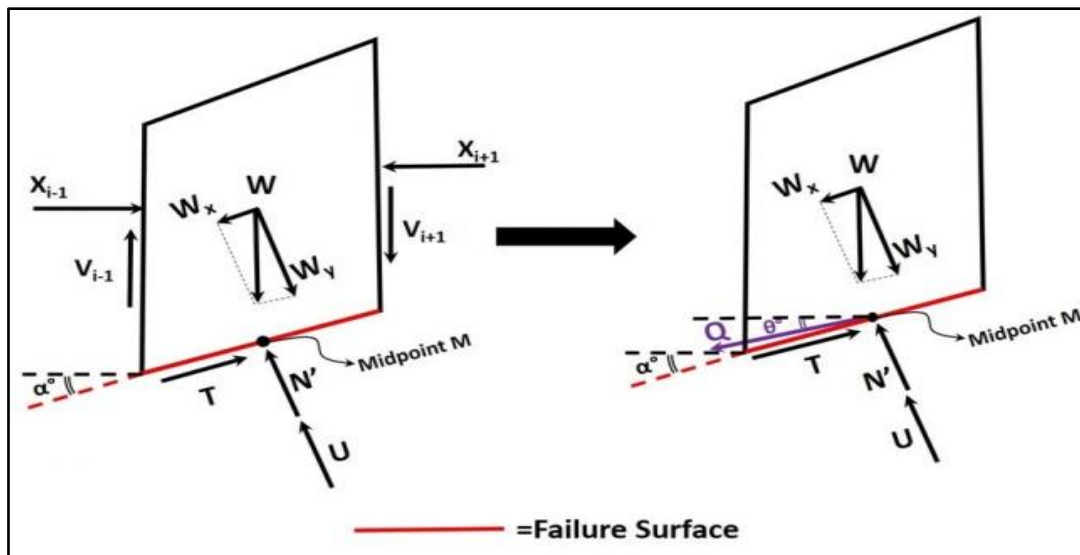


Figure III.7. Méthode de Spencer [47]

### III.9. Méthode de Morgenstern et Price (1965)

Morgenstern et Price définissent une fonction donnant l'inclinaison des efforts inter-tranches, cette méthode introduit une fonction mathématique arbitraire pour représenter la variation de la direction des forces entre les tranches :

$$\tan\theta_i = \frac{X}{E} = \lambda \cdot f(x_i')$$

Cette méthode satisfait toutes les conditions d'équilibre statique pour chaque tranche, ainsi que l'équilibre des moments et l'équilibre des forces dans la direction horizontale, pour l'ensemble de la masse qui glisse suivant une surface de rupture circulaire ou non circulaire. [29]

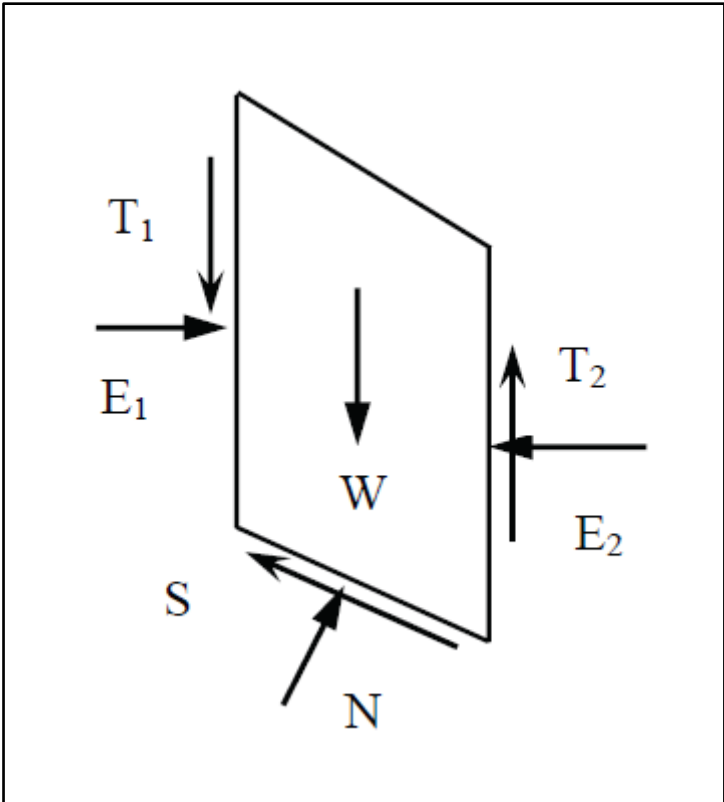


Figure III.8. Méthode de Morgenstern et Price [48]

**CHAPITRE IV**  
**LOGICIEL PLAXIS 2D**

## IV. Introduction

PLAXIS en 3D actuellement V22 8.6 en 2008 est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçues pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows.

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

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.[49]

### IV.1. Concepts de base :

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu. La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues



ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique. [51]

#### **IV.2. Calculs par la MEF :**

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

##### **Elle nécessite :**

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr -Coulomb, Duncan, CamClay, ... etc.
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol structures et les conditions hydrauliques.
- Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

##### **Elle permet :**

- d'effectuer les calculs d'écoulement ;
- de simuler toutes les phases de travaux ;
- de prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
- de calculer un coefficient de sécurité. [51]

##### **Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :**

- les déplacements des ouvrages ;
- les sollicitations internes des ouvrages ;
- les efforts dans les butons ou tirants. Et pour le sol :
- les déplacements du sol ;
- les déformations du sol ;
- les contraintes totales et effectives dans le sol ;
- les pressions interstitielles ;
- de calculer un coefficient de sécurité.

Et donc la possibilité d'étudier l'interaction de l'exécution d'un écran sur des ouvrages existants Le principal logiciel utilisé est :

PLAXIS (logiciel hollandais développé par l'équipe du Pr. Vermeer) : Logiciel 2D dédié à la géotechnique. Pour notre problème, on utilise PLAXIS 2D [51].

### **IV.3. Code de calcul en éléments finis Plaxis 2D :**

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (spécialement la méthode des éléments finis) a permis de trouver des solutions à beaucoup de problèmes, les modèles permettant de décrire assez correctement le comportement des sols. Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leur performance dépendent surtout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence fixés. Le logiciel de calcul PLAXIS 2D est utilisé dans cette étude, il est fondé sur ces principes et il est connu pour avoir donné par ailleurs des résultats satisfaisants. Le choix de ce logiciel a été motivé par sa disponibilité et sa souplesse, ainsi que par la performance du fait qu'il se prête bien aux objectifs fixés pour l'analyse de la stabilité des tunnels et des pentes. Il contient les sous programmes suivants :

- Programme d'entrée de données (input)
- Programme de calculs (Calculations)
- Programme des résultats (Output)
- Programme courbe (Curves) [50]

#### **3.1. PLAXIS-Input :**

Le sous-programme Input appelé aussi le pré-processing programme contient tous les outils nécessaires à la création et modifications des modèles géométriques, à l'engendrement des maillages des éléments finis et aux définitions des conditions initiales [50].

#### **3.2. PLAXIS-Calculations :**

Le processing programme ou le sous-programme de calculs contient les outils nécessaires à la définition des phases et au commencement de la procédure de calcul des éléments finis.

#### **3.3. PLAXIS-Output :**

Ou le programme post-processing contient les facilités pour la visualisation des résultats des différentes phases de calcul comme les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes et les forces dans les éléments structuraux etc.

### 3.4. PLAXIS-Curves :

Le sous-programme curve sert à la construction des courbes de chargement–déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes. [50]

## IV.4. Les modèles de comportements utilisés dans PLAXIS

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux : depuis le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettent de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis. Dans ce schéma, la modélisation par éléments finis permet de résoudre le problème aux limites en tenant compte, par une loi de comportement réaliste, du comportement réel du sol. Deux difficultés majeures ont empêché la réalisation complète de ce schéma : d'une part les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande, pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe. La validation des lois de comportement a fait l'objet, dans les années 80 de plusieurs ateliers pour comparer les réponses des différents modèles sur différents chemins de sollicitation. La seconde difficulté a été l'intégration de ces lois de comportement dans ces codes par éléments finis, bi ou tridimensionnels. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées. Le coût de ces calculs est généralement important.

La démarche suivie dans le développement du code PLAXIS est différente. Un des objectifs de PLAXIS est de fournir à l'utilisateur un code d'éléments 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. En ce sens, PLAXIS peut apparaître comme une règle à calcul de l'ingénieur géotechnicien, où 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. [49]

Pour traiter un problème de soutènement (paroi moulée, palplanche, ... etc.), il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élasto-plastique et le modèle de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas ; on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élasto plastique de coefficient de raideur. Mais pour traiter une construction de remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'écroutissement.

Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le soft soil model qui prend 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.

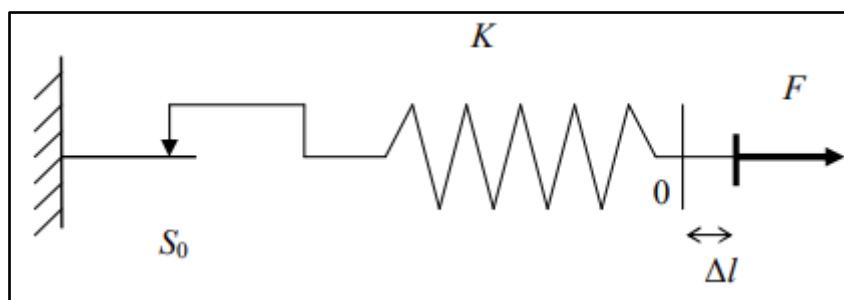
Les règles d'or dans le domaine de la simulation du comportement d'un ouvrage sont :

- Quel est le comportement principal à modéliser ?
- Utiliser un modèle qui décrit ce comportement ;
- Interpréter les résultats, notamment en fonction des paramètres de la modélisation.

En ce sens, la modélisation numérique ne fournit sous une autre forme que les données du problème posé.

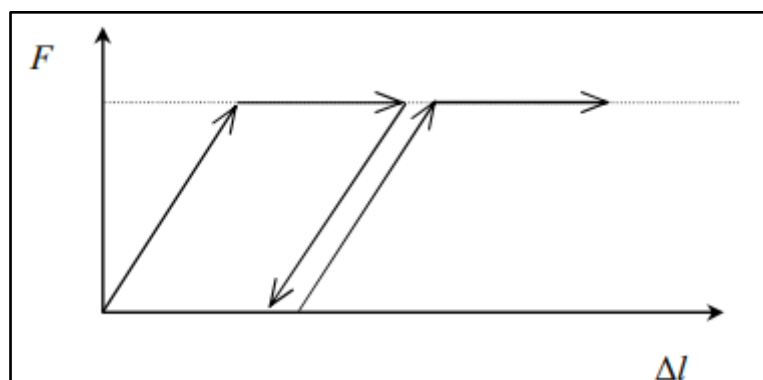
#### IV.5. Comportement élasto-plastique

Le comportement élasto-plastique peut être représenté par un modèle monodimensionnel, en série un ressort de raideur  $K$ , pour symboliser l'élasticité du matériau, à un patin de seuil  $S_0$ .



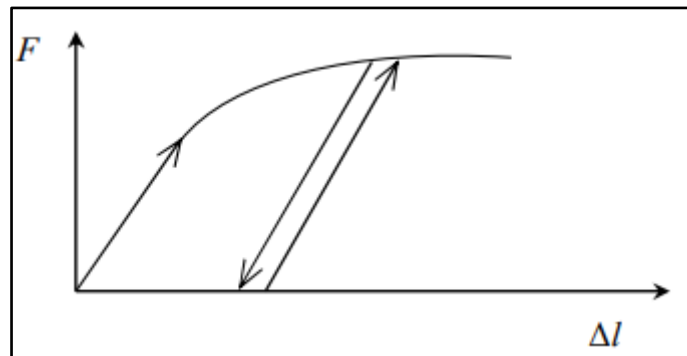
**Figure IV.1 : Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique.[49]**

La courbe effort-déplacement ou contrainte-déformation que l'on trouve est présentée sur la figure IV.1.



**Figure IV.2 : Représentation du comportement élastique parfaitement plastique.[49]**

Lors d'une décharge, le comportement est élastique et réversible. La longueur de la déformation plastique est a priori indéterminée.



**Figure IV.3 : Représentation du comportement élastoplastique avec écrouissage.[49]**

#### IV.6. Modèle élastique linéaire

Le modèle élastique linéaire utilisé dans PLAXIS est classique. Les tableaux de rentrée des données demandent le module de cisaillement  $G$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ . l'avantage de  $G$  est d'être indépendant des conditions de drainage du matériau ( $G_u = G'$ ), ce qui n'est pas le cas des modules d'Young : le module d'Young non drainé est supérieur au module d'Young drainé. Il aurait pu sembler logique, si  $G$  est utilisé comme paramètre élastique, d'utiliser  $K$  comme second paramètre. D'une part  $K_u$  est infini (correspondant à  $\nu_u = 0.5$ ) et il est moins courant d'emploi.  $G$  est en fait le module mesuré dans les essais pressiométriques.

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

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

$$K = \frac{E}{3(1 + \nu)};$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)};$$

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

Les paramètres de ce modèle sont représentés sur la figure IV.4 :

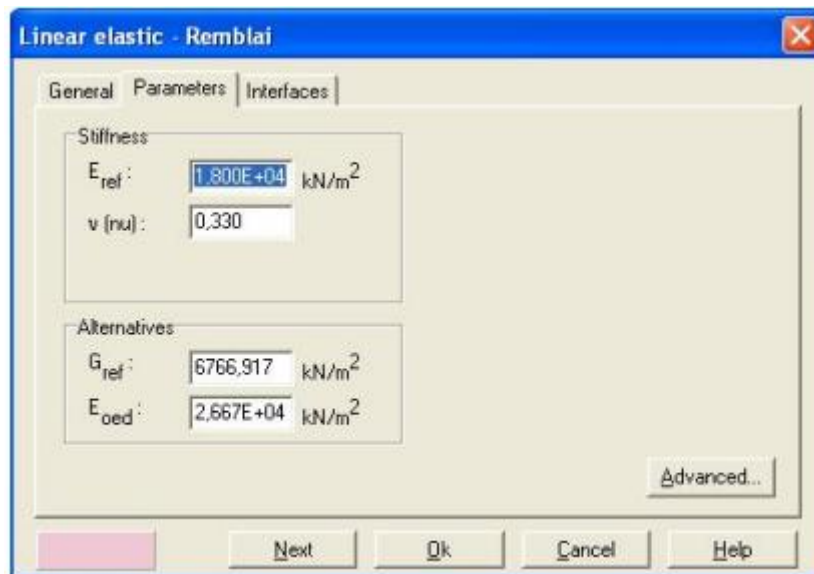


Figure IV.4 : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire.[49]

Et les paramètres avancés sur la figure IV.5 :

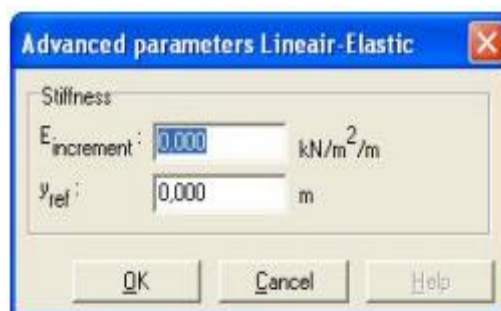


Figure IV.5 : Fenêtre des paramètres avancés du modèle élastique linéaire.[49]

Les paramètres avancés sont reliés par l'équation :

$$E_{actual} = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{in} \quad \text{avec} \quad y < y_{ref}$$

$E_{in}$  : Augmentation de la rigidité [KN/m<sup>2</sup>/m]

$y_{ref}$  : Unité de profondeur

#### IV.7. Modèle de Mohr-Coulomb

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c ;$$

où  $\sigma$  et  $\tau$  sont respectivement les contraintes normales et tangentielles de cisaillement, et  $c$  et  $\varphi$  respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau.

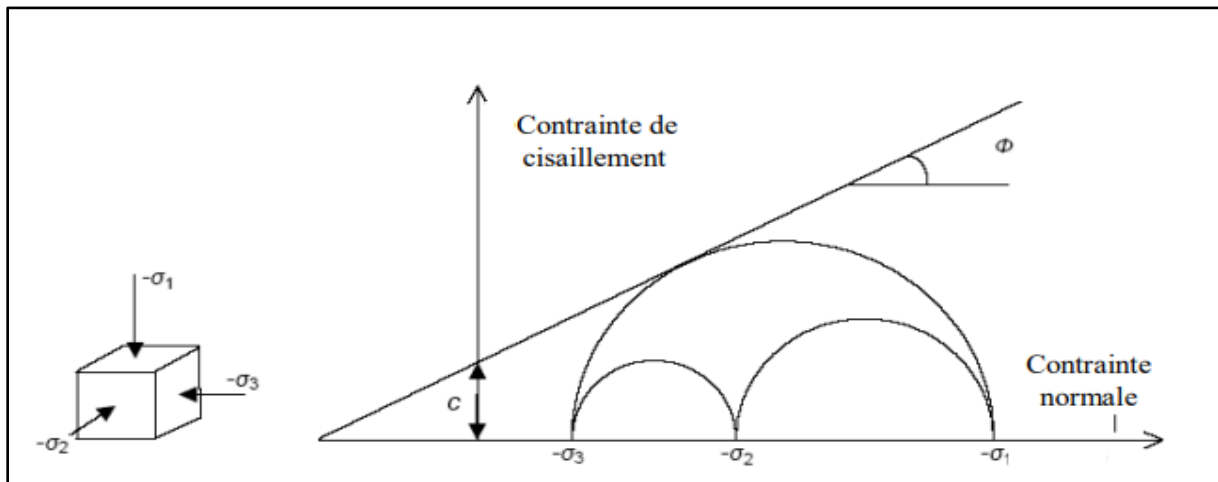


Figure IV.6 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb [49]

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb. [49]

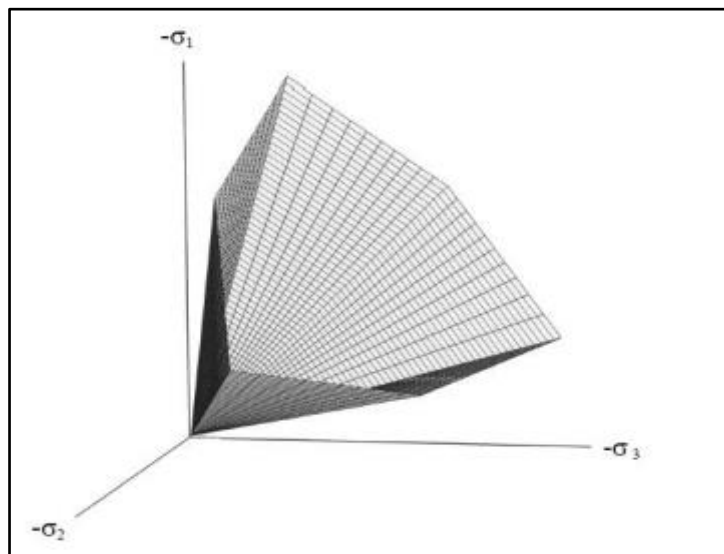


Figure IV.7 : Pyramide de Mohr-Coulomb tracée pour  $c=0$ [49]

#### IV.8. Conclusion

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 expressions, 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.[49]



**CHAPITRE V**  
**MODELISATION AVEC LOGICIEL**  
**PLAXIS 2D**

## V.1 Modélisation du talus

### V.1.1 Introduction

Le but de ce travail est de vérifier la stabilité d'un modèle géotechnique de référence pour notre mémoire. Pour cela, on va réaliser une modélisation à l'aide du logiciel PLAXIS 2D (cas 1).

Après modélisation et vérification de la stabilité du talus, une seconde modélisation consiste à voir l'effet de la méthode de reprofilage sur le coefficient de sécurité  $F_s$ , appelé cas 2.

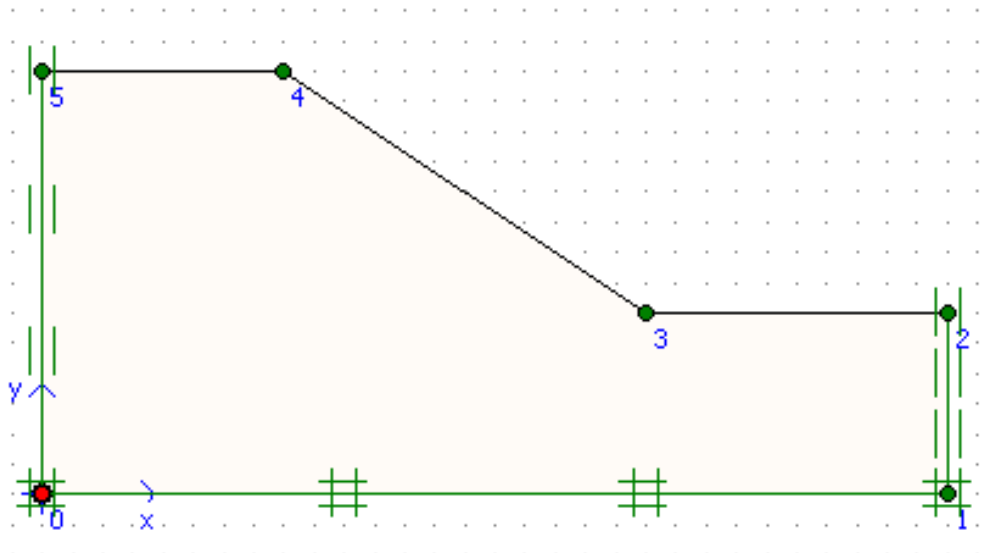
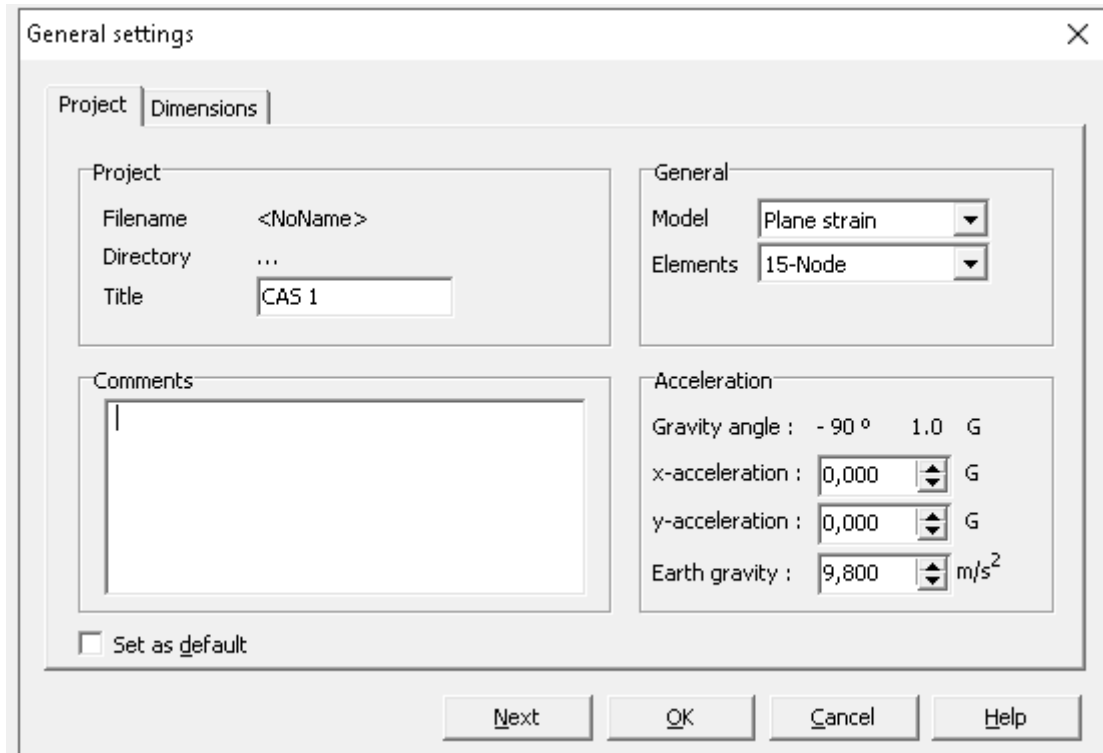
### V.1.2 Caractéristiques

Les caractéristiques géotechniques du talus est la nature du sol sur le Tab 5.1

**Tableau. 5.1. Caractéristiques géotechniques des matériaux**

Paramètres	Nom		Unité
Modèle du matériau	Model	M-C	–
Type de comportement	Type	Drainé	–
Poids volumique sec	$\gamma_{unsat}$	17.5	kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique saturé	$\gamma_{sat}$	20	kN/m <sup>3</sup>
Perméabilité horizontale	Kx	0	m/s
Perméabilité verticale	Ky	0	m/s
Module de Young	Eref	4000	kN/m <sup>2</sup>
Coefficient de poisson	V	0.31	–
Cohésion	Cref	5	kN/m <sup>2</sup>
Angle de frottement	$\Phi$	29	°
Angle de dilatance	$\Psi$	0	°

# CAS 1



Mohr-Coulomb - Soil set

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification:

Material model:

Material type:

General properties

$\gamma_{unsat}$   kN/m<sup>3</sup>

$\gamma_{sat}$   kN/m<sup>3</sup>

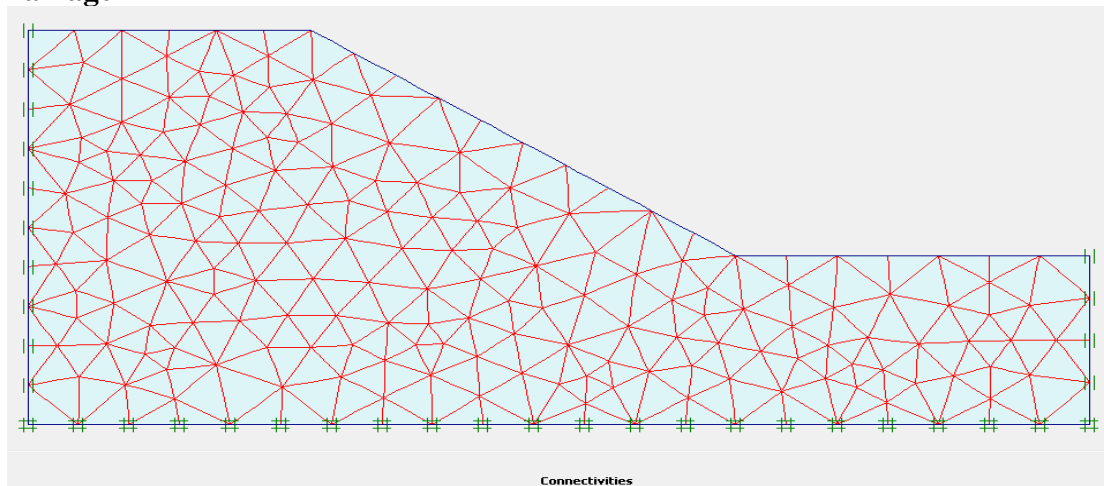
Comments

Permeability

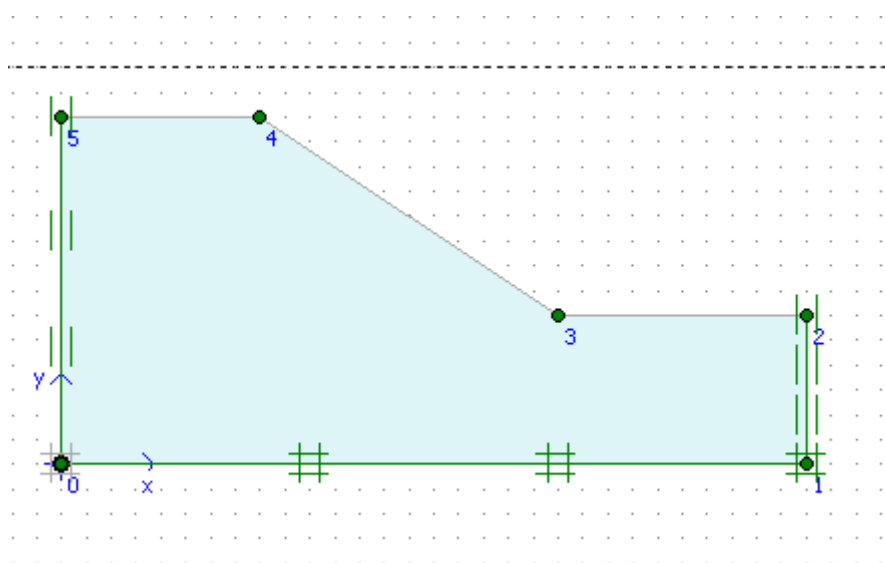
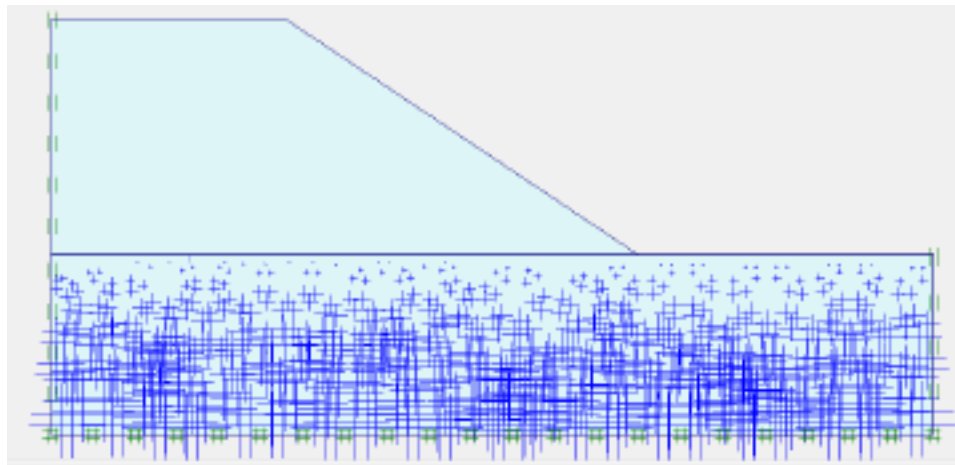
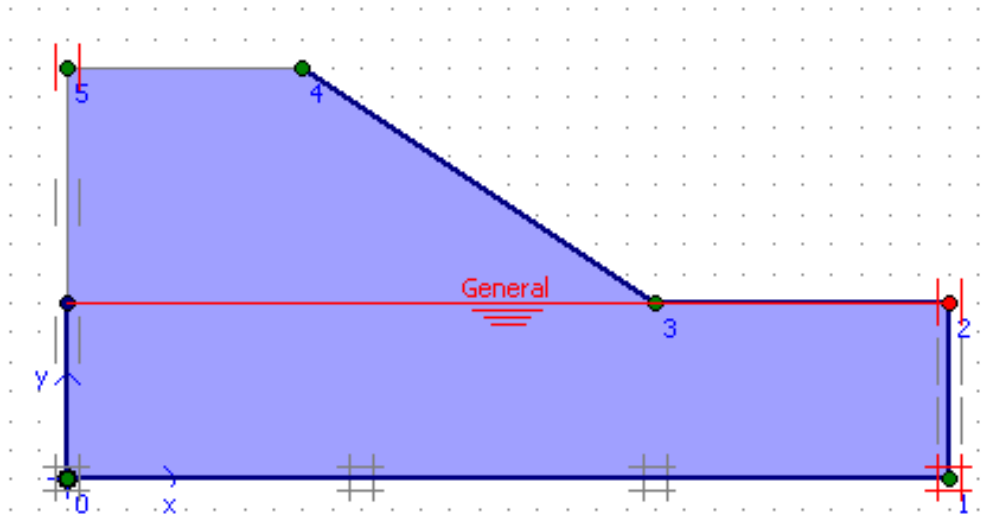
$k_x$  :  m/day

$k_y$  :  m/day

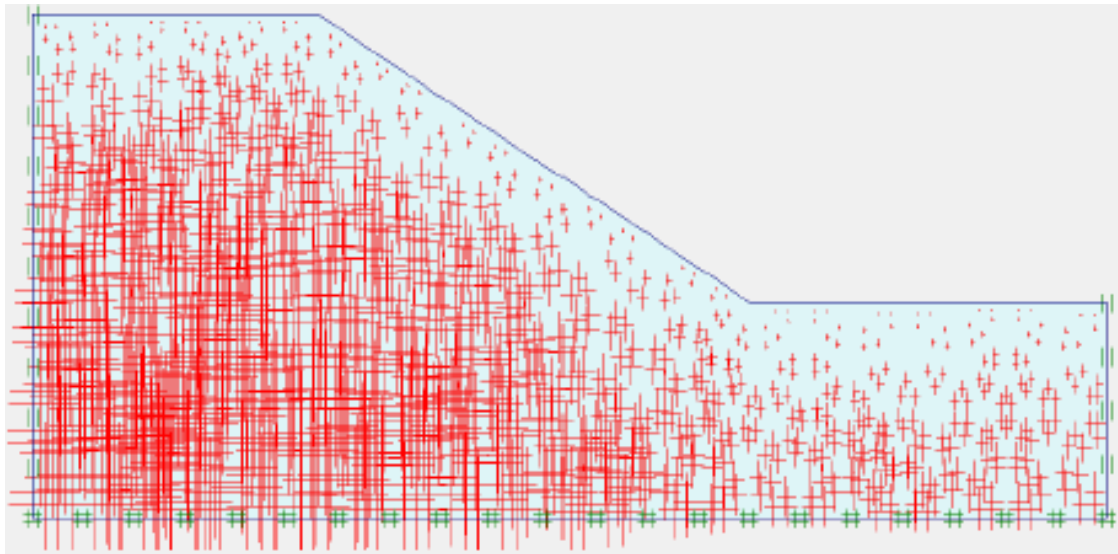
**Le maillage**



La pression interstitielle



Les contraintes effectives



L'étape de calcul

Plaxis 8.2 Calculations - CAS 1.plx

File Edit View Calculate Help

Input Output Curves [Icons] Calculate...

General Parameters Multipliers Preview

Phase  
 Number / ID.: 1 <Phase 1>  
 Start from phase: 0 - Initial phase

Calculation type  
 Phi/c reduction  
 Advanced

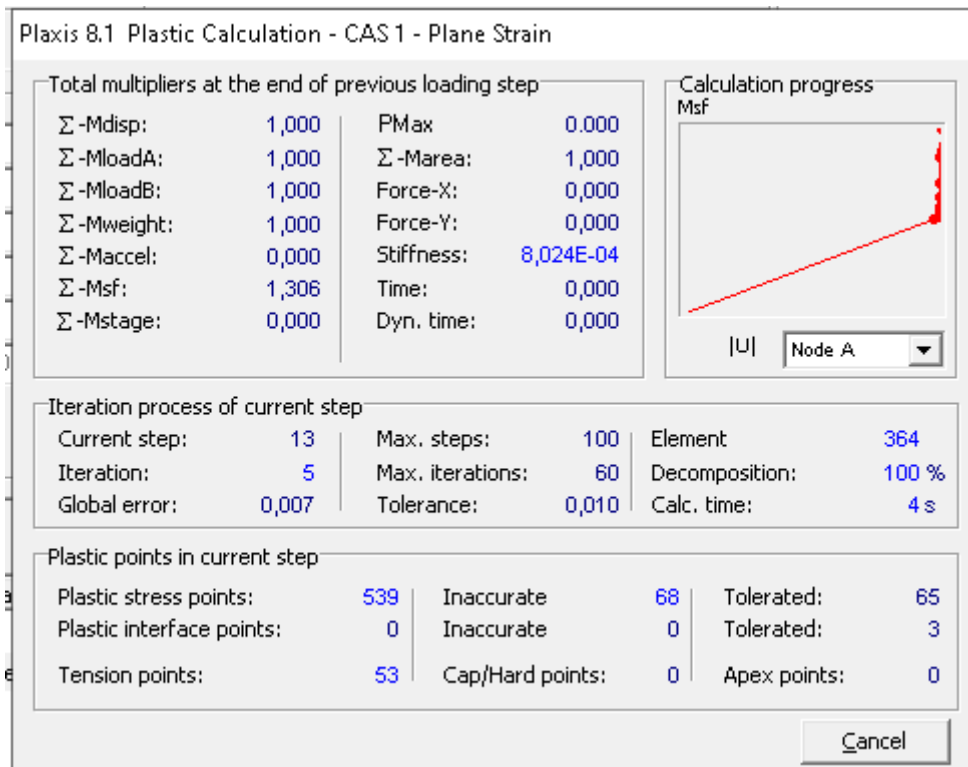
Log info  
 [Text Area]

Comments  
 [Text Area]

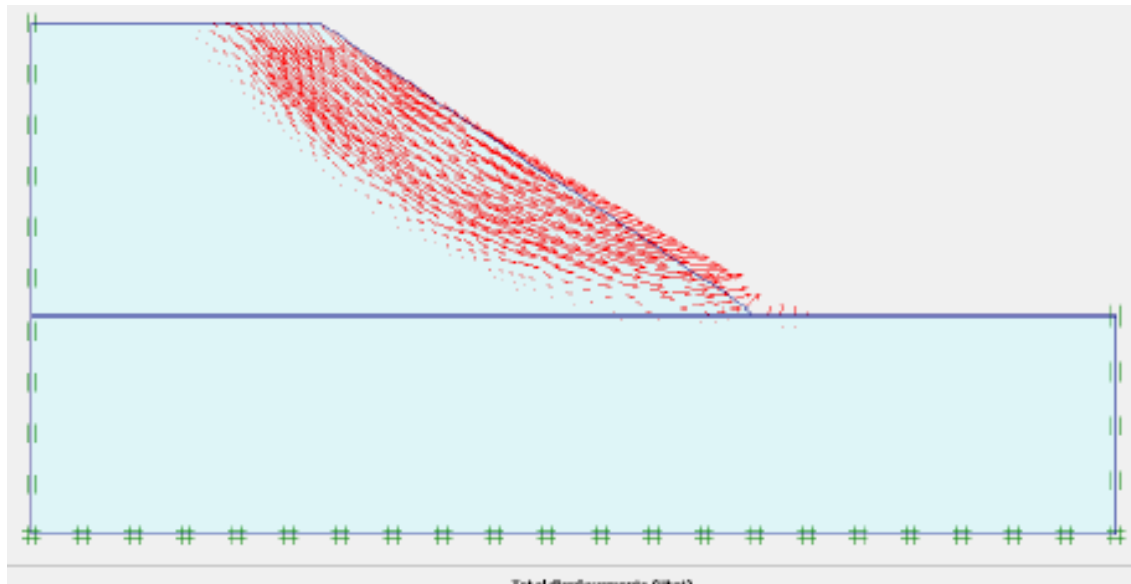
Parameters

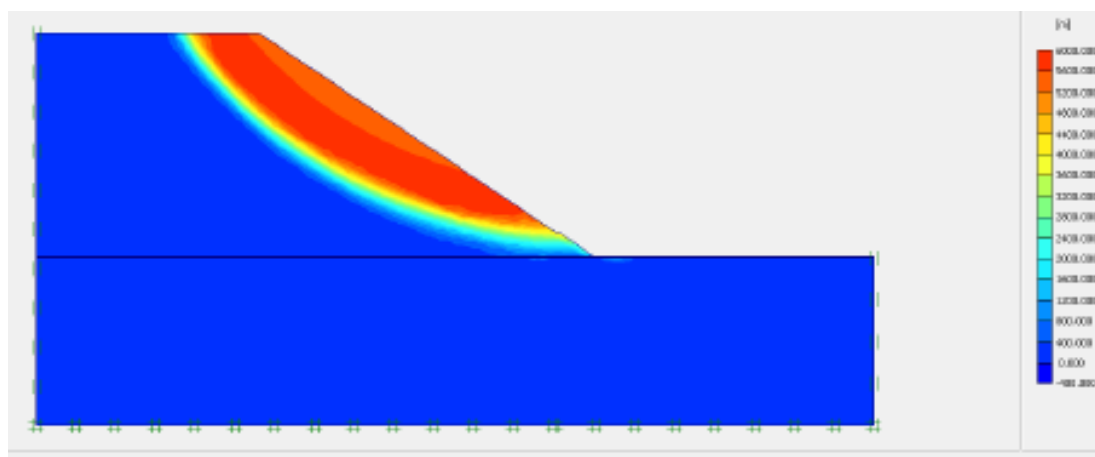
Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	F
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	C
➔ <Phase 1>	1	0	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	0	

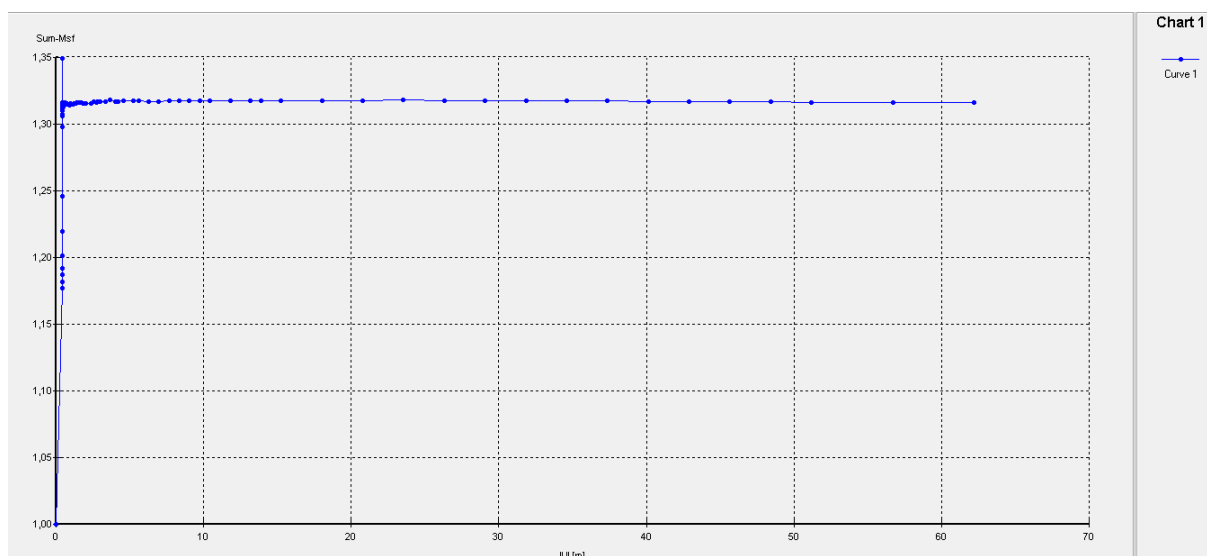


## Déplacement total





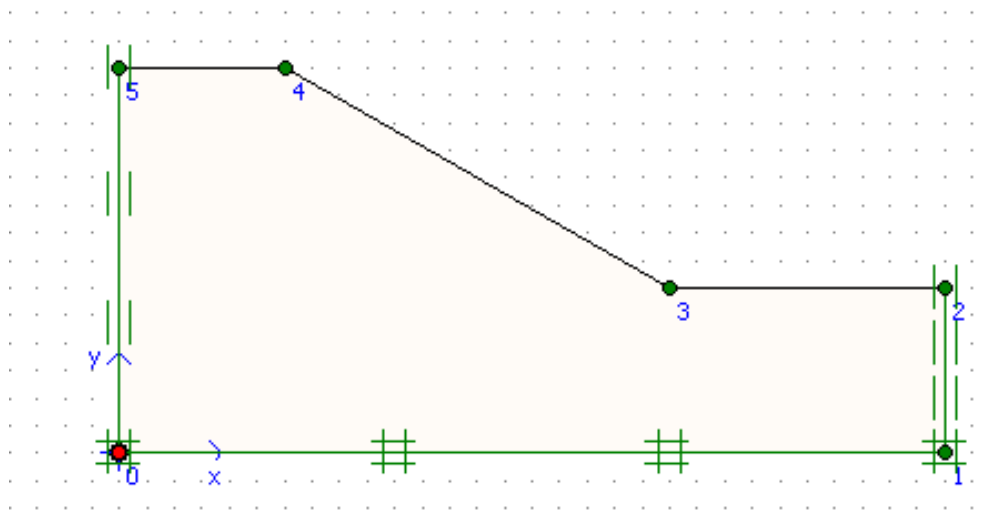
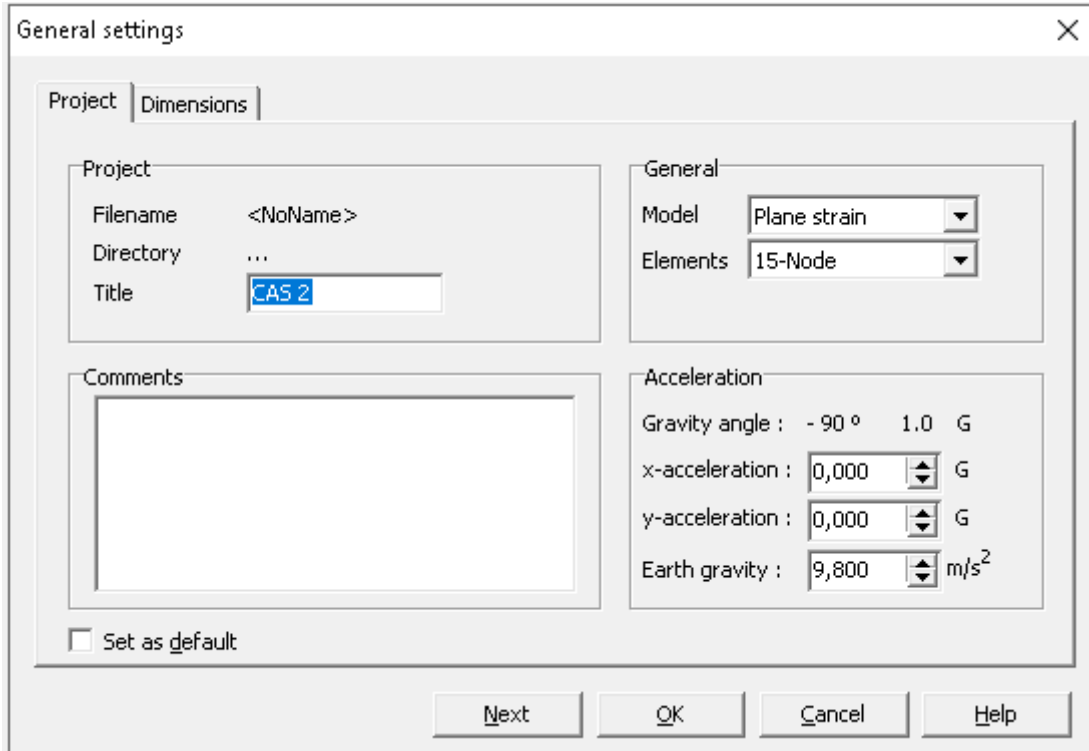
Valeur du facteur de sécurité



➤ D'après la modélisation, le  $F_s$  est égal à 1.316.



# CAS 2



Définition des caractéristiques géotechniques

Mohr-Coulomb - SOil set

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification: SOil set

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

$\gamma_{unsat}$ : 17,500 kN/m<sup>3</sup>

$\gamma_{sat}$ : 20,000 kN/m<sup>3</sup>

Comments

Permeability

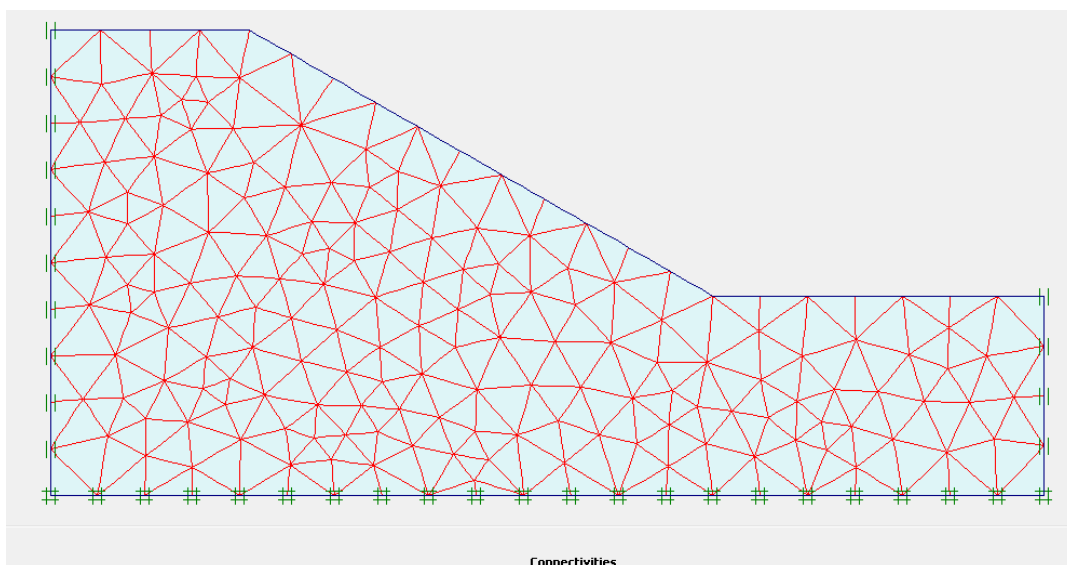
$k_x$ : 0,000 m/day

$k_y$ : 0,000 m/day

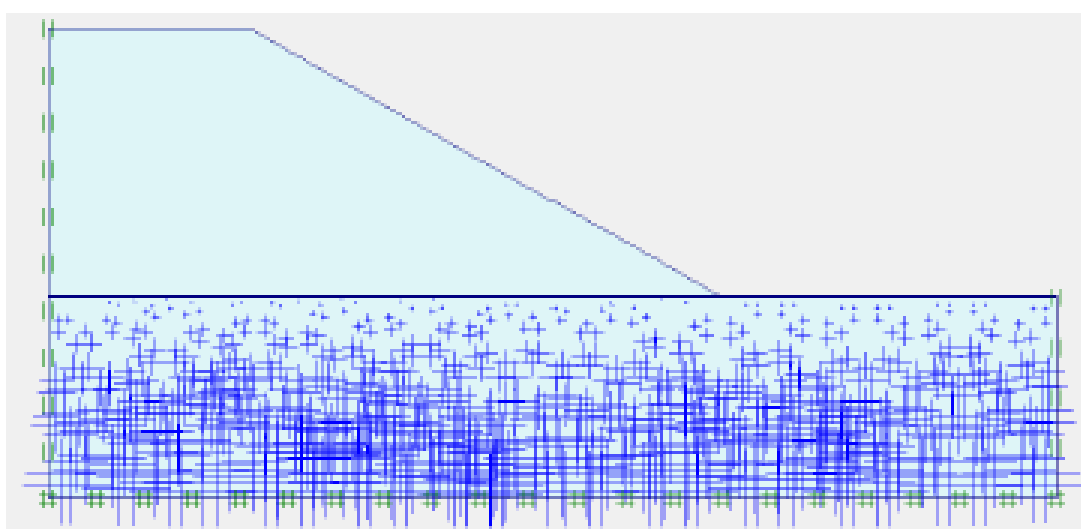
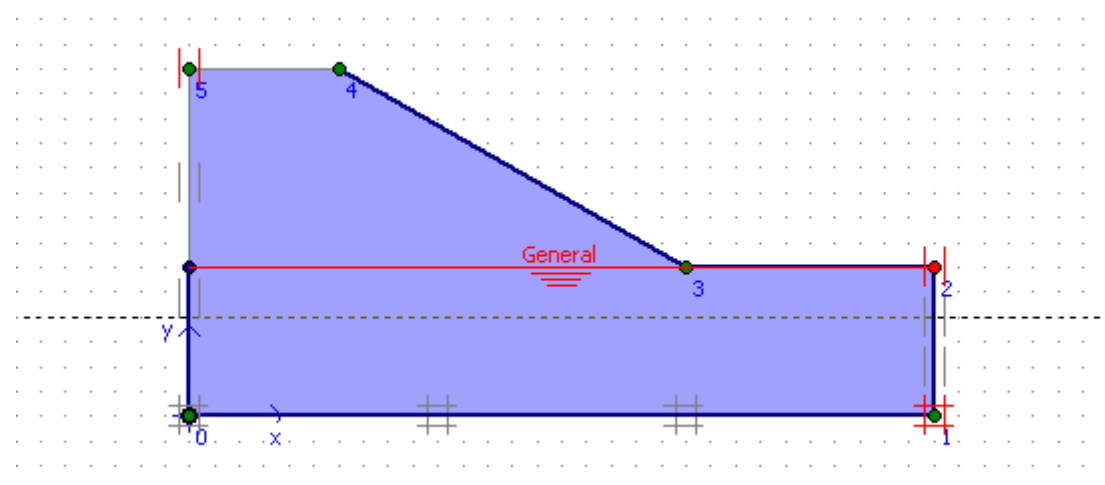
Advanced...

Next Ok Cancel Help

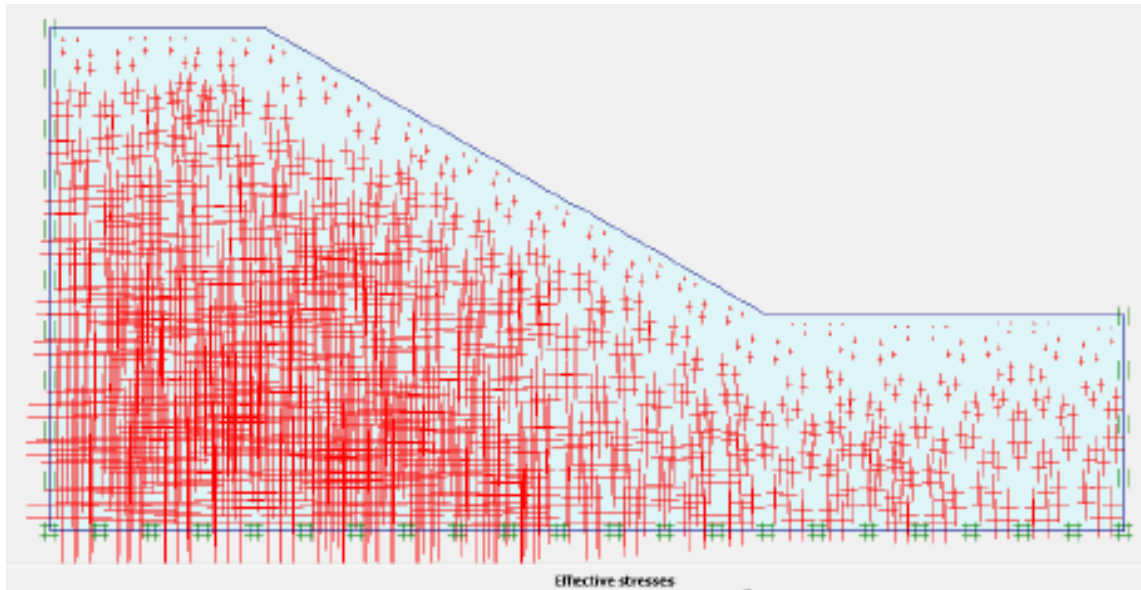
Le maillage du talus



Les pressions interstitielles



Les contraintes effectives



L'étape de calcul

Plaxis 8.2 Calculations - CAS 2.plx

File Edit View Calculate Help

Input Output Curves Calculate...

General Parameters Multipliers Preview

Phase  
 Number / ID.: 1 <Phase 1>  
 Start from phase: 0 - Initial phase

Calculation type  
 Phi/c reduction  
 Advanced

Log info

Comments

Parameters

Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	F
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
➔ <Phase 1>	1	0	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	0	0

Plaxis 8.1 Plastic Calculation - CAS 2 - Plane Strain

Total multipliers at the end of previous loading step			
$\Sigma$ -Mdisp:	1,000	PMax	0,000
$\Sigma$ -MloadA:	1,000	$\Sigma$ -Marea:	1,000
$\Sigma$ -MloadB:	1,000	Force-X:	0,000
$\Sigma$ -Mweight:	1,000	Force-Y:	0,000
$\Sigma$ -Maccel:	0,000	Stiffness:	0,008
$\Sigma$ -Msf:	1,204	Time:	0,000
$\Sigma$ -Mstage:	0,000	Dyn. time:	0,000

Calculation progress

Msf

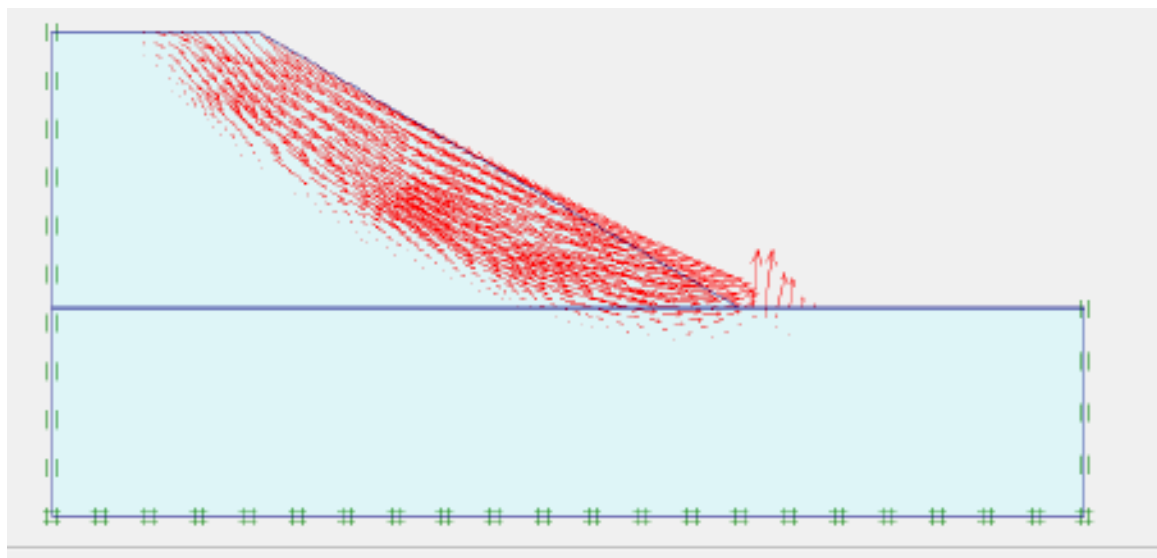
|U| Node A

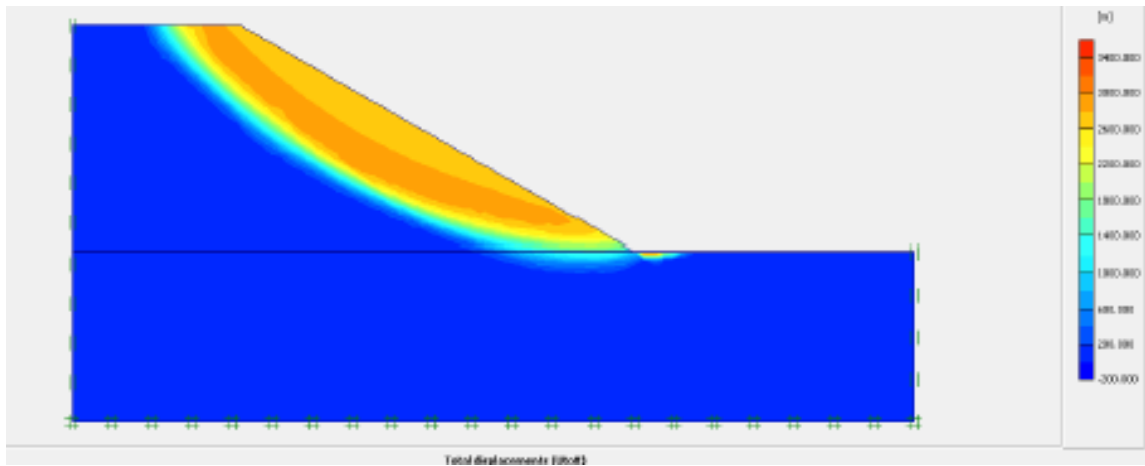
Iteration process of current step			
Current step:	6	Max. steps:	100
Iteration:	2	Max. iterations:	60
Global error:	0,007	Tolerance:	0,010
Element	351	Decomposition:	100 %
Calc. time:	2 s		

Plastic points in current step			
Plastic stress points:	381	Inaccurate	35
Plastic interface points:	0	Inaccurate	0
Tension points:	26	Cap/Hard points:	0
Tolerated:	41	Apex points:	0
Tolerated:	3		

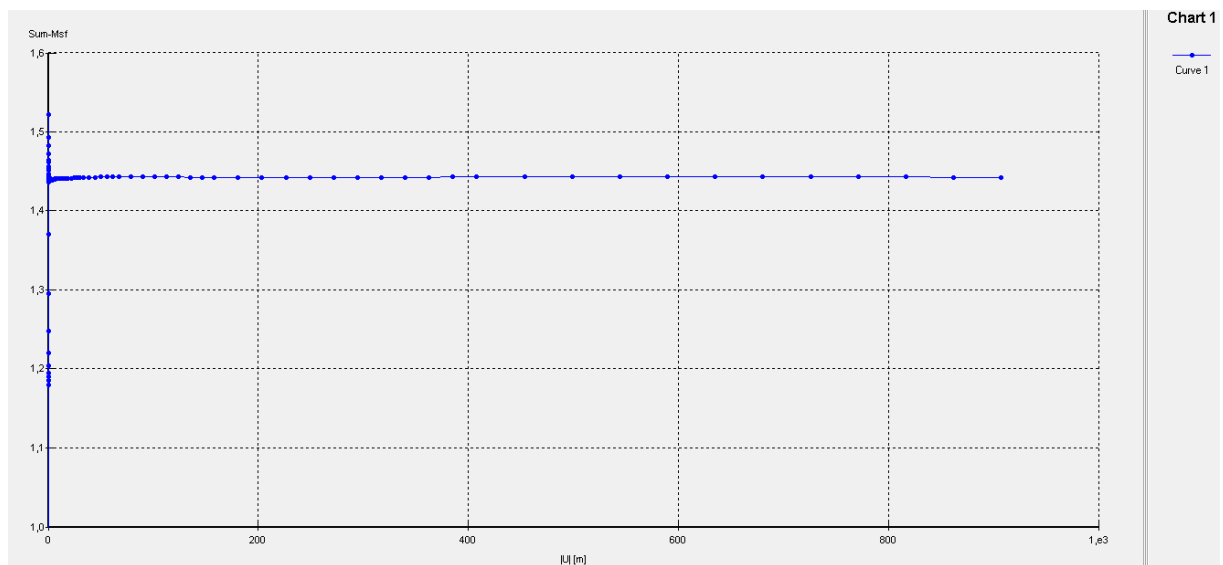
Cancel

Déplacement total





La valeur du  $F_s$



➤ D'après la modélisation, le  $F_s$  est égal à 1.443.

**Comparaison des coefficients de sécurité entre les 2 cas**

La comparaison montre une différence favorable de coefficient de sécurité (1.443 pour le cas 2). Le reprofilage a augmenté le coefficient de sécurité.

**Conclusion**

D'après les résultats obtenus lors de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis avec le code PLAXIS 2D, on peut dire que le calcul de stabilité du talus initial donne un coefficient de sécurité ( $F_s$ ) satisfaisant avec un  $F_s$  égal à 1.316.

Afin d'obtenir une valeur de  $F_s$  supérieur à 1.4, une solution de diminution de la pente (reprofilage) a été adoptée. A cet effet, nous avons constaté une augmentation du coefficient de sécurité  $F_s=1.443$ . Notre talus est par conséquent stable. La méthode de reprofilage peut s'avérer utile pour augmenter la valeur du  $F_s$  dans l'utilisation sur le terrain.

# **CONCLUSION GENERALE**



## Conclusion générale

La recherche sur les mouvements de terre, particulièrement les glissements de terrain est d'une importance pratique primordiale.

Afin d'éviter ces phénomènes dévastateurs, une étude approfondie sur les glissements de terrain s'avère nécessaire. Cela doit impérativement passer par une étude du sol. Les logiciels informatiques de nos jours, à l'instar du Plaxis, permettant de modéliser et de pouvoir ériger des ouvrages stables et sûrs.

Dans ce mémoire, une modélisation a été faite selon deux volets :

- ❖ Une modélisation initiale consiste à modéliser le talus naturel ;
- ❖ Une seconde, implique un reprofilage de la pente ;
- ❖ L'étape finale est de comparer le facteur de sécurité obtenu et de tirer des conclusions qui peuvent être essentielles et utiles

En conclusion, ce mémoire peut apporter une plus-value dans notre discipline.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERECES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Les éléments principaux de la description d'un glissement De terrain. <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RBSz2QkYAEYFBQ> Consulté le 07/02/2023.
- [2] Chute de blocs [https://www.cerema.fr/sites/default/files/styles/uas\\_medium/public/media/images/2020/08/adobestock\\_219110490\\_chute\\_de\\_blocs.jpeg?h=beb4385d&itok=iJdsTM6Y](https://www.cerema.fr/sites/default/files/styles/uas_medium/public/media/images/2020/08/adobestock_219110490_chute_de_blocs.jpeg?h=beb4385d&itok=iJdsTM6Y). Consulté le 07/02/2023.
- [3] Le renversement. <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RN0KQccgnUYFxQ> Consulté le 07/02/2023.
- [4] Glissement plan, Glissement Rotationnel <https://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2022/01/RN3-illust-5-1024x467.png>. Consulté le 07/02/2023.
- [5] Propagation latérale. <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RL8LDkL2CEYFmQ>. Consulté le 07/02/2023.
- [6] Types de mouvements de terrain <https://www.heritage.nf.ca/articles/en-francais/environnement/images/types-de-mouvements-de-terrain.gif>. Consulté le 07/02/2023.
- [7] Coupe géologique et géotechnique d'un glissement. [https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcThI6j\\_FgYz7FWzlm37UY2VlkLyPfvIa9R0kf0WXU8HZEhxOufocnSTeVTDTQSWdJnbDs&usqp=CAU](https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcThI6j_FgYz7FWzlm37UY2VlkLyPfvIa9R0kf0WXU8HZEhxOufocnSTeVTDTQSWdJnbDs&usqp=CAU). Consulté le 07/02/2023.
- [8] Glissement de terrain en Japon. <https://www.europe1.fr/international/japon-glissements-de-terrain-et-disparus-apres-un-fort-seisme-a-hokkaido-3748457>. Consulté le 08/02/2023.
- [9] Glissement de terrain aux Etats-Unis. [https://www.sciencesetavenir.fr/assets/img/2014/03/25/images\\_list-r4x3w1000-57dee691949aeglissement-de-terrain-aux-etats-unis.jpg](https://www.sciencesetavenir.fr/assets/img/2014/03/25/images_list-r4x3w1000-57dee691949aeglissement-de-terrain-aux-etats-unis.jpg) Consulté le 08/02/2023.
- [10] Glissement de terrain en France -d'Ordu en Mer Noire, Constantine,Bejaia 2019. <http://dspace.univkm.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/4954/M%C3%A9moire%20C3%A9valuation%20d%27al%C3%A9a%20de%20glissement%20C3%A0%20Tachta%20M2%20g%C3%A9otech.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Consulté le 08/02/2023.
- [11] Le glissement a Mostaganem [https://scontent.forn31.fna.fbcdn.net/v/t1.181699/10154148\\_805846979490239\\_6190978065179541639\\_n.jpg?nc\\_cat=105&ccb=17&nc\\_sid=730e14&nc\\_ohc=30UZFWepH8AX8Y2xUt&nc\\_ht=scontent.forn31.fna&oh=00\\_AfC2EdZSIEII2XIL\\_O2udNeyxpuNOIYMMHOO\\_SrmfenkF1g&oe=64214EF0](https://scontent.forn31.fna.fbcdn.net/v/t1.181699/10154148_805846979490239_6190978065179541639_n.jpg?nc_cat=105&ccb=17&nc_sid=730e14&nc_ohc=30UZFWepH8AX8Y2xUt&nc_ht=scontent.forn31.fna&oh=00_AfC2EdZSIEII2XIL_O2udNeyxpuNOIYMMHOO_SrmfenkF1g&oe=64214EF0). Consulté le 08/02/2023.

[12] Les travaux de terrassement. [https://i0.wp.com/www.maison-et-travaux.net/wp-content/uploads/2019/05/shutterstock\\_132878555.jpg?fit=4288%2C2848&ssl=1](https://i0.wp.com/www.maison-et-travaux.net/wp-content/uploads/2019/05/shutterstock_132878555.jpg?fit=4288%2C2848&ssl=1). Consulté le 10/02/2023.

[13] La bute de pied <https://www.bing.com/images/blob?bcid=REgcmBfsRIMFJA>. Consulté le 10/02/2023.

[14] Butée de pied

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RH0enAMBTFMFqxcxoNWLuD9SqbotqVTdPz>.

Consulté le 10/02/2023.

[15] Allègements en tête.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RB.XobtScFMFKQ>. Consulté le 10/02/2023.

[16] Technique Allègement en tête.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RNgLLkvPq1MFWw>. Consulté le 10/02/2023.

[17] Purge. <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RI0grhdte1MFqxcxoNWLuD9SqbotqVTdP3I>. Consulté le 12/02/2023.

[18] Tableau Technique de Purge

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RM5uKWvBzVMFvg>. Consulté le 12/02/2023.

[19] Reprofilage. <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RBKXzdHe.lMFig>. Consulté le 12/02/2023.

[20] Tableau Technique de Reprofilage.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RGbxnnAXKVMFIQ>. Consulté le 12/02/2023.

[21] Substitution partielle des matériaux glissés.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RIJyhGYW91MFqxcxoNWLuD9SqbotqVTdPxc>.

Consulté le 14/02/2023.

[22] Substitution partielle : bèche, contrefort, éperon, masque.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RDJtf4H0zVMFXA>. Consulté le 14/02/2023

[23] Défrichage d'un terrain.

<https://www.mopcom.fr/wpcontent/uploads/2018/07/deboisement.jpg>. Consulté le 14/02/2023

[24] L'excavation

<https://www.constructeurs-maisons.org/ftp/Images/etapes-de-construction/l-excavation.jpg>.

Consulté le 14/02/2023

[25] Le remblayage. <https://www.maison-love.fr/wp-content/uploads/2022/05/terre-de-rembloi-travaux.jpg>. Consulté le 14/02/2023

[26]Le compactage. <https://c8.alamy.com/compfr/2ewgr5t/travailleur-est-le-compactage-de-gravier-avec-plaque-de-vibration-de-machine-compacteur-de-tranchee-carres-2ewgr5t.jpg>.

Consulté le 17/02/2023

[27]Les tuyaux de drainage.

[http://blog.hamil.fr/wp-content/uploads/2018/01/drainage\\_maison.jpg](http://blog.hamil.fr/wp-content/uploads/2018/01/drainage_maison.jpg). Consulté le 17/02/2023

[28]Les bassins de rétention.

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Bassin\\_VNVA\\_vider\\_Heuringhem.jp](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Bassin_VNVA_vider_Heuringhem.jp).

Consulté le 17/02/2023

[29]Coupe d'une tranchée drainante.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=ROgaYsTeT0oFiQ>. Consulté le 22/02/2023

[30]Les particularités d'un mur de soutènement.

[https://lebonartisan.cdn.prismic.io/lebonartisan/e31fc86cccb3a06cebfa71e6940cca708565485\\_2\\_le-mur-de-soutenement-en-beton-arme.gif](https://lebonartisan.cdn.prismic.io/lebonartisan/e31fc86cccb3a06cebfa71e6940cca708565485_2_le-mur-de-soutenement-en-beton-arme.gif). Consulté le 22/02/2023

[31]Ouvrage de soutènement à Mostaganem. [https://scontent-mrs2-2.xx.fbcdn.net/v/t1.6435-9/56691473\\_2308797699368762\\_8845700087750328320\\_n.jpg?nc\\_cat=102&ccb=17&nc\\_sid=730e14&nc\\_ohc=orOU16IUN8cAX9gszws&nc\\_ht=scontentmrs22.xx&oh=00\\_AfD5G2nQjr1Xh3R5DwNu4DVe46oVH7dYBLIU9IIDth-XJw&oe=6426968E](https://scontent-mrs2-2.xx.fbcdn.net/v/t1.6435-9/56691473_2308797699368762_8845700087750328320_n.jpg?nc_cat=102&ccb=17&nc_sid=730e14&nc_ohc=orOU16IUN8cAX9gszws&nc_ht=scontentmrs22.xx&oh=00_AfD5G2nQjr1Xh3R5DwNu4DVe46oVH7dYBLIU9IIDth-XJw&oe=6426968E). Consulté le 22/02/2023

[32]Type d'ouvrages rigides, Rideaux de palplanches ancrés par des tirants d'ancrage <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/14899/1/Ms.Gc.Hadbi%2BDjelti.pdf>

Consulté le 24/02/2023

[33]Paroi moulée en pieux sécants ancrés par des tirants d'ancrage [https://img.freepik.com/vecteurs-libre/poteaux-metalliques-tubes-acier\\_1441-3577.jpg](https://img.freepik.com/vecteurs-libre/poteaux-metalliques-tubes-acier_1441-3577.jpg). Consulté le 24/02/2023

[34]Les barrages à Contreforts

<https://i.pinimg.com/originals/1e/a2/f5/1ea2f5bdd3f3946ae1dcb7d55a83412a.jpg>. Consulté le 24/02/2023

[35]Un versant stabilisé par clouage

<https://www.memoireonline.com/02/13/6911/Analyse-et-modelisation-d-un-glissement-de-terrain-Cas-de-Sidi-Youcef-Beni-Messous-Alger-38.png>. Consulté le 24/02/2023

[36]Mur de soutènement vu en coupe.

<https://i.pining.com/originals/c9/78/a6/c978a64a94e8e60d4a84a30b4b8cc2be.jpg>. Consulté le 24/02/2023

[37]Les signaux et messages d'alerte.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RHcxqw6FgUoFwA>. Consulté le 27/02/2023

[38] Stabilisation de la pente <https://www.geoace.com/uploads/apps/5e7b207376ac3.png>.

Consulté le 27/02/2023

[39] HABITA Faouzia. Université BORDJ BADJI-MOKHTAR-ANNABA, Désenvasement des barrages par injection. Approche analytique et expérimentale. Année 2012

[40]Schéma sur la surface de rupture.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RC03WHoF8E8FMA>. Consulté le 02/03/2023

[41]Forces inter-tranches et équations à satisfaire pour différentes méthodes.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RFH78nxfE8FXw>. Consulté le 02/03/2023

[42]Schéma de rupture plane.

<https://www.bing.com/images/blob?bcid=RKwANQGQB08F3g>. Consulté le 02/03/2023

[43]Méthode des tranches <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RMaskrsLh1MFkQ>.

Consulté le 03/03/2023

[44]La méthode de Fellenius <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RJTglJib8E8F3A>.

Consulté le 03/03/2023

[45]La méthode de Janbu <https://www.bing.com/images/blob?bcid=RKfPIECrXU8Fkg>.

Consulté le 03/03/2023

[46]Méthode de Spencer

[https://www.geoengineer.org/storage/education/2403/editor\\_photos/19350/Picture2\\_16.jpg](https://www.geoengineer.org/storage/education/2403/editor_photos/19350/Picture2_16.jpg).

Consulté le 05/03/2023

[47]Méthode de Morgenstern et Price.

[https://www.geoengineer.org/storage/education/2404/editor\\_photos/19609/Picture1\\_21.jpg](https://www.geoengineer.org/storage/education/2404/editor_photos/19609/Picture1_21.jpg).

Consulté le 05/03/2023

[48] Modèle monodimensionnel du comportement élasto-plastique.

<https://www.researchgate.net/publication/312332259/figure/fig5/AS:450670869389316@1484459716655/Morgenstern-Price-method-of-slope-stability-analysis.png>. Consulté le

07/03/2023

[49] GUERFI Houcemeddine. Stabilisation des talus renforcés par pieux. Université El Hadj Lakhdar Batna. Année 2019

**[50]** BOUHANNA Ilyas. Traitement d'un glissement de terrain sur le tronçon d'autoroute. Université Aboubaker Belkaid-Tlemcen. Année 2020/2021

**[51]** KHALDOUNA Hannane. Analyse de stabilité et modélisation numérique du talus de la résidence présidentielle de la wilaya d'Annaba. Université Annaba. Année 2018