

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJIMOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

فـاـكـولـتـةـ دـسـ عـنـابـة FACULTE DES

SCIENCES DE L'INGENIEUR

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire

Présentée en vue de l'obtention du diplôme Master 2

Thème :

**Etude numérique utilisant le logiciel Slide du tronçon de
l'autoroute Drea-Frontière Tunisienne**

Option : Géotechnique

Présenter par :

Tifouti Ferdous

Sous la direction du Boukhatem Ghania M.C.A

Devant le jury :

Président : Keffaf Tarek

M.A Université Badji Mokhtar – Annaba

Encadreur : Boukhatem Ghania

M.C.A Université Badji Mokhtar – Annaba

Examineur : Chabbi Hsaine

M.A Université Badji Mokhtar – Annaba

Année : 2021

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remerciant **ALLAH** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire. Notre remercie Au corps professoral et administratif de la faculté de 'Science Et Technologie' pour la richesse et la qualité de leur enseignement et leurs efforts pour nous assurer une information actualisée.

Tout nous respect et remerciement à notre encadrant, Docteur «**Mme.Boukhatem Ghania** » qui est le directeur de mémoire, et qui est toujours présente pour nous écouter et guider tout au long de la réalisation de ce mémoire. Aussi pour l'inspiration, l'aide et le temps.»

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury professeur «**Keffaf Tarek** » , professeur «**Chabi Hsaine** » et aussi professeur «**Meksaouine Mohammed** » pour accepter d'évaluer notre travail et nos avoir honorés par leur présence.

Un grand merci à nos parents, pour leurs amour, leurs conseils ainsi le soutien inconditionnel, à la fois moral et économique.

Enfin, nous remercions tous nos amis de n'avoir apporté leur contribution pour l'achèvement de ce modeste travail.

Dédicace

Avec joie, fièrté et respect, je dédie ce travail à qui Dieu Tout-Puissant a dit à leur sujet : « **Abaisse vers eux, par miséricorde, l'aile de l'humilité et dis: seigneur veuille leur accorder miséricorde, comme ils m'ont élevé tout petit** » israa -24-

A mes parent, que dieux les protège, à mon marie 'Mohammed' et à ma petite fille 'Assil'.

A mon frère Abd Elbaki , et Mes sœurs Manel et Maram.

A mon oncle Saleh.

A toute ma famille, mes proches et à ce qui m'ont toujours encouragé.

Ferdous

Résumé

L'autoroute Est-Ouest est un projet autoroutier qui traverse toute l'Algérie sur une longueur de 1216 km. Ce méga projet a connu plusieurs désordres dus à des problèmes géotechniques qui sont apparus pendant les phases de réalisation et d'exploitation.

Parmi ces problèmes « le glissement ». Notre travail concerne a étudier la stabilité et le confortement d'un glissement de terrain d'un tronçon de l'autoroute situé entre le village de 'Kebouda' (commune de Ben Mhidi) la Wilaya d'El Taref et La Frontière Algéro-Tunisienne au niveau du point kilométrique Pk402+080.

L'analyse de la stabilité du talus est faite à l'aide du logiciel SLIDE afin de déterminer les valeurs du coefficient de sécurité avant et après le glissement. Ensuite de suggérer des solutions de confortement et choisir la meilleure solution pour avoir un talus stable.

Les mots-clés : Glissement de terrain, confortement, stabilité, modélisation, terrassement, SLIDE, coefficient de sécurité.

Abstract

The East-West Highway is a highway project that crosses all Algeria over a length of 1216 km. This mega project has experienced several disorders due to geotechnical problems that emerged during the construction and operation phases.

One of these problems is the "Landslide". Our work concerns studying the stability and comfort of a landslide of a section at the East-West Highway located between the village of 'Kebouda' (Town of Ben Mhidi) state of El Taref and the Algerian-Tunisian border at the kilometer point Pk402+080.

The analysis of slope stability is done using SLIDE software to determine the values of the safety factor before and after the landslide. After that suggest reinforcement solutions and choose the best one to get the bank stability.

Keywords: Landslide, reinforcement, stability, modeling, grading, SLIDE, safety coefficient.

ملخص

الطريق السريع شرق-غرب هو مشروع طريق سريع يمر عبر الجزائر بطول 1216 كم. شهد هذا المشروع الضخم العديد من الاضطرابات بسبب المشاكل الجيوتقنية التي ظهرت خلال مرحلتي البناء والتشغيل. من بين هذه المشاكل "الانزلاق". يتعلق عملنا بدراسة استقرار وتعزيز الانهيار الأرضي لجزء من الطريق السريع يقع بين قرية كبودة (بلدية بن مهدي) ولاية الطارف والحدود الجزائرية التونسية عند النقطة الكيلومترية رقم 080 + 402. يتم إجراء تحليل ثبات المنحدر باستخدام برنامج 'سلايد' من أجل تحديد قيم معامل الأمان قبل وبعد الانزلاق. بعد ذلك يتم اقتراح حلول لتعزيز واختيار الحل الأفضل للحصول على منحدر مستقر.

الكلمات المفتاحية : الانهيار الأرضي ، التعزيز ، الاستقرار ، النمذجة ، أعمال الحفر ، الانزلاق ، معامل الأمان.

LISTE DES FIGURES

❖ Chapitre I : Bibliographie sur les mouvements de terrain

- Figure I.1 – Glissement de terrain l'autoroute nationale 55(2011), en Inde.
- Figure I.2 – Schéma d'un glissement de terrain
- Figure I.3 – Les quatre types de mouvements de terrain
- Figure I.4 – Eboulement
- Figure I.5 – Chute de bloc
- Figure I.6 – Types d'écroulement (Philippe,R. 1988)
- Figure I.7 – (a) Schématisation du phénomène de fluage, (b) Morgan'shill
- Figure I.8 – Glissement réel à Mountain River, Canada.
- Figure I.9 –Schématisation du phénomène de glissement de terrain plan
- Figure I.10 – Glissement Plan
- Figure I.11 – Schématisation du phénomène de glissement circulaire
(a)avant activation ; (b) après activation
- Figure I.12 – Glissement circulaire simple
- Figure I.13 – Glissement circulaire complexe
- Figure I.14 – Les causes principales du glissement de terrain
- Figure I.15 – Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain
- Figure I.16 – Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.
- Figure I.17 – Surface de rupture potentielle
- Figure I.18 – Surface de rupture (Guide technique LCPC.1998)
- Figure I.19 –Rupture Plane
- Figure I.20 – Un schéma de la rupture circulaire
- Figure I.21 – Analyse d'un talus homogène
- Figure I.22 – Découpage d'un talus des tranches
- Figure I.23 – Les forces agissantes sur une tranche
- Figure I.24 – Les critères de choix de la méthode de confortement. (FahsiM.,2013)

Figure I.25 – Organigramme montre les types d’approche des systèmes de parade. (Bedr S.,2008)

Figure I.26 – Organigramme montre la processus de terrassement

Figure I.27 – Schématisation de la bute de pied

Figure I.28 – Schématisation de l’allègement en tête

Figure I.29 – Schématisation des dispositifs de drainages (Fahsi M.,2013)

Figure I.30 – L’implantation des plantes dans un talus

Figure I.31 – Renforcement par géotextiles (Boulfoul K.,2005)

Figure I.32 –Renforcement par géogrilles.(Boulfoul K.,2005)

Figure I.33 –Renforcement par Pneusol. (Bedr S.,2008)

Figure I.34 –Renforcement par ancrage. (Cartier G.,1986)

Figure I.35 –Classification des ouvrages de soutènement.(Fahsi M.,2013)

❖ **Chapitre II : Présentation du cas d’étude**

Figure II.1 – L'autoroute Est-Ouest et la principale agglomération.

Figure II.2 –Plan de situation du glissement

Figure II.3 –Localisation de chantier

Figure II.4 –Localisation de la zone de glissement

Figure II.5 – Etat actuel du glissement de talus

Figure II.6 – Etat actuel du glissement de talus

❖ **Chapitre III : Méthode de calcul**

Figure III.1 – Organigramme des choix technique de stabilisation

Figure III.2 – Boîte de dialogue du paramètres du projet «Project Settings ».

Figure III.3 –Fenêtre de dialogue des propriétés des couches de sols

Figure III.4 –Méthodes d'analyse dans les paramètres du projet.

Figure III.5 –Grille de dialogue Espacement.

❖ **Chapitre VI : Modélisation numérique**

Figure VI.1 –la modélisation numérique du terrain

Figure VI.2 – Profile modélisé par logiciel Slide

Figure VI.3 –Profile étudiant avant le glissement

Figure VI.4 –Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Fellenius (avant glissement)

Figure VI.5 –Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Bishop Simplifié (avant glissement)

Figure VI.6 –Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Junbu Simplifié (avant glissement)

Figure VI.7 –Coefficient de sécurité obtenu de la méthode ordinaire de Fellenius (après glissement)

Figure VI.8 – Variation du coefficient de sécurité le long de la surface du talus par Fellenius (après glissement)

Figure V.9 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Bishop Simplifié (après glissement)

Figure VI.10 – Variation du coefficient de sécurité le long de la surface du talus par Bishop Simplifié (après glissement)

Figure VI.11 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Junbu Simplifié (après glissement)

Figure VI.12 – Variation du coefficient de sécurité le long de la surface du talus par Junbu Simplifié (après glissement)

Figure VI.13 – Géométrie du modèle dans SLIDE ‘renforcement de terrain naturel’

Figure VI.14 –Coefficient de sécurité obtenu de Fellenius après renforcement

Figure VI.15 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Bishop Simplifié après renforcement

Figure VI.16 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Junbu simplifié après renforcement

Figure VI.17 – Géométrie du modèle dans SLIDE ‘renforcement de terrain naturel’

Figure VI.18 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius

Figure VI.19 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Bishop simplifié

Figure VI.20 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Junbu Simplifié

Figure VI.21 – Comparaison des coefficients de sécurité

LISTE DES TABLEAUX

❖ Chapitre I : Bibliographie sur les mouvements de terrains

Tableau I.1 – Echelle cinématique des mouvements de terrain.

Tableau I.2 – Éléments caractérisant les différents mouvements de terrain

Tableau I.3 – Valeurs de FS en fonction de l'état de l'ouvrage

❖ Chapitre II : Présentation du cas d'étude

Tableau II.1 – Paramètre de calcul d'étude recommandée

❖ Chapitre III : Méthode de calcul

Tableau III.1 – Les données fournies à logiciel et les résultats

❖ Chapitre VI : Modélisation numérique

Tableau VI.1 – Les caractéristiques des matériaux utilisées dans le modèle

Tableau VI.2 – Les valeurs des coefficients de sécurité avant le glissement

Tableau VI.3 – Les Valeurs du coefficient de sécurité après le glissement

Tableau VI.4 – Les Valeurs du coefficient de sécurité au renforcement par pieux

Tableau VI.5 – Les coordonnées de buté entrer dans le logiciel SLIDE

NOTION ET ABREVIATION

F_s : Le coefficient de sécurité.

W : Le poids du bloc de sol considéré.

H : L'effort horizontal sur les côtés du bloc.

V : L'effort vertical sur les côtés du bloc.

N : La réaction normale à la base du bloc.

T : La réaction tangentielle à la base du bloc.

U_L : L'effort dû à la pression d'eau latérale.

U : L'effort dû à la pression d'eau à la base.

T_{Max} : La réaction tangentielle maximale.

C' : La cohésion effective du sol.

Φ' : L'angle de frottement effective du sol.

β : L'angle d'inclinaison de la pente et du plan de glissement.

h : La profondeur verticale au plan de cisaillement.

h_w : La distance entre les deux extrémités du bloc.

H_n et **H_n** : Les efforts horizontaux inter-tranches.

V_n et **V_{N+1}** : Les efforts verticaux inter-tranches.

R_n : La réaction du milieu sous-jacent sur l'arc AB.

σ_n : La contrainte normale de cisaillement.

τ : La contrainte tangentielle de cisaillement.

b : La largeur des tranches.

α : L'angle orienté que fait le rayon du cercle avec la verticale.

Table des matières

Introduction Général.....	1
Introduction général.....	1
Chapitre I : Recherche Bibliographique.....	4
I.Introduction.....	4
I.2. Caractérisation du mouvement de terrain.....	
I.3.Méthode d'analyse de la stabilité des pentes	23
I.4.Méthodes de calcul de la stabilité.....	29
I.5. Méthode de confortement du sol	36
I.5.3. Approche douce	39
I.5.4. Approche dure :	44
Chapitre II	52
Présentation Du Cas D'étude	52
II.2.5. Caractéristique du sol de glissement :	58
II.2.6. Evaluation de la stabilité du talus :.....	59
II.7. Précaution de l'exécution :	59
Chapitre III.....	60
Méthodes de calculs.....	60
III.1. Introduction :	61
III.2. Le choix de la technique de confortement :.....	61
III.3. Calcul de la stabilité par logiciel	62
Chapitre VI.....	69
Modélisation numérique du cas étudié	69
VI.3. Choix des paramètres	71
VI.4. Début de modélisation.....	72
Conclusion Général	86

Référence bibliographiques.....	88
Site Web.....	89

Introduction Général

Introduction général

Depuis plus d'un siècle les géologues, géomorphologues, et plus récemment, les mécaniciens des sols ont tenté par divers moyens, de comprendre les mécanismes et les processus qui génèrent les glissements de terrain et, plus largement, les mouvements de terrain. Ces processus initialement naturels sont devenus au fil du dernier siècle de plus en plus liés aux activités anthropiques. Chaque site potentiellement instable pose des problèmes spécifiques ce qui rend la généralisation et la classification des mouvements de terrain difficiles. Ainsi, on trouve de nombreux ouvrages et articles qui traitent de l'analyse des mouvements de terrain, avec des outils et des méthodes de recherche de plus en plus évolués.

Le phénomène de glissement de terrain est considéré comme dangers naturel permanents rencontrés dans tous les pays du monde car l'importance des effets de glissement pouvant engendrer des dégâts humains et matériels pouvant se chiffrer en plusieurs millions de Dollars dont les gouvernements doivent prêter beaucoup d'attention.

Pour cela, il faut compte tenu de ces phénomènes et de leurs dangers, et de prendre les précautions convenable pour détecter les zones instables afin de trouver les meilleurs solutions de protections ou de traitements.

Donc l'étude que l'on entreprend va permettre d'approfondir la connaissance des phénomènes d'instabilités.

But du projet

Le projet de fin d'étude qui nous a été confié par la Ministère des travaux publique et du transport (L'Algérienne des autoroutes) est basé sur l'étude de la stabilité d'un tronçon de l'autoroute situé entre le village de 'Kebouda' (commune de Ben Mhidi) la Wilaya d'El Taref et La Frontière Algéro-Tunisienne au niveau du point

kilométrique **Pk402+080** .L'étude s'intéresse à la vérification de la stabilité de ce talus par le calcul de son coefficient de sécurité par plusieurs méthodes avec le logiciel SLIDE et afin de les comparer.

Organisation de la mémoire

Pour bien présenter l'étude de la stabilité des talus et éclairer les axes de notre étude, la thèse a été articulée suivant les points suivants:

- **Chapitre I** : Recherche bibliographique sur les mouvements de terrain: dans ce chapitre on a essayé de donner une aide sur le phénomène de mouvement de terrain, ses types et ses causes. Aussi on a représenté dans ce chapitre quelques méthodes de calcul du coefficient de sécurité et aussi quelques méthodes de calculs utilisées qui peuvent être utilisées dans l'analyse de la stabilité des talus.
- **Chapitre II** : Présentation du cas d'étude : dans ce chapitre on a présenté le site de notre travail, la situation géographique du site, cause du glissement et l'analyse de stabilité selon leur étude.
- **Chapitre III** : présentation de logiciel utilisé 'SLIDE' : On a donné les caractéristiques générales de ce logiciel utilisés pour les calculs des talus, avec une démarche simple pour définir un problème de talus. Ce chapitre peut être considéré comme un manuel simple pour analyser les talus utilisant un des logiciels informatiques.
- **Chapitre IV** : Modélisation numérique : dans ce chapitre une application directe des différentes méthodes pour calculer le coefficient de sécurité d'un talus existe à la Wilaya d'El Taref, après une présentation géométrique et géotechnique de ce talus. Finalement une comparaison entre toutes les méthodes utilisées a été présentée.
- **Conclusions générales** : une conclusion générale sur notre étude.

Chapitre I

Recherche Bibliographique

Introduction

L'intention des chercheurs s'est tournée ces dernières années vers un phénomène naturel qui prend de plus en plus l'ampleur et cause des désordres et des victimes humaines. La brutalité de ce phénomène est influencée par la nature et aussi par l'activité de l'homme qui est parfois très nuisible. La nature géologique des terrains est l'un des principaux facteurs d'apparition de ces phénomènes tout comme l'eau et la pente.

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier lieu les différents types de mouvement de terrain selon leur vitesse et selon la morphologie de leur surface de rupture, d'envisager en second lieu les principales causes qui peuvent mobiliser ces glissements.



Figure I.1 - Glissement de terrain l'autoroute nationale 55, en 2011 dans la région du Darjeeling, en Inde.

I.1. Généralité

➤ Qu'est-ce qu'un mouvement de terrain ?

Les mouvements de terrain sont un ensemble de déplacements plus ou moins brutaux d'origine naturelle ou anthropique. Ces glissements se font vers l'aval sous l'effet de la gravité. Elles sont un phénomène d'origine sismique, géologique et géophysique où une masse de terre descend sur une pente, autrement dit un plan de glissement plus ou moins continu, plus ou moins plan ou incurvé. Après la mise en mouvement la masse conserve globalement sa consistance et sa physionomie.

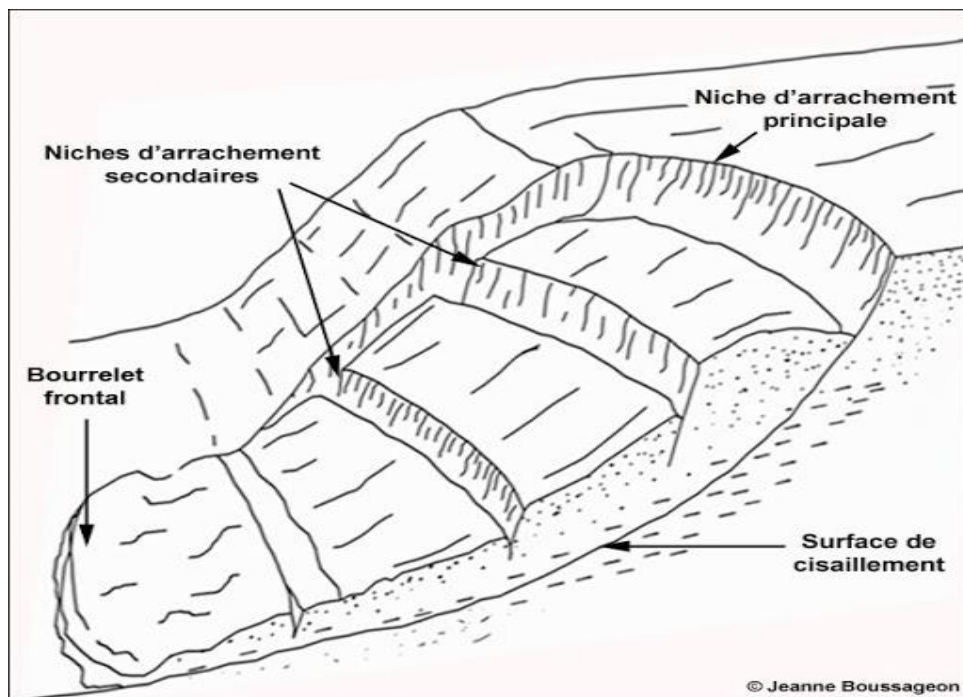


Figure I.2 – Schéma d'un glissement de terrain

➤ **Comment ? Quand ?**

Le déclenchement d'un mouvement de terrain est souvent prévisible ; toutefois, il ne peut être défini dans sa géométrie exacte que par une étude minutieuse. Certains mouvements peuvent être considérés comme le processus évolutif naturel d'un site ; par exemple l'éboulement d'une falaise dont le pied est sapé par la mer.

Mais il faut noter que, fréquemment aussi, un mouvement de masse peut être déclenché par l'action de l'homme. Certains travaux rompent l'équilibre naturel d'un site et amorcent un processus de rupture de masse sur un site auparavant stable. C'est le cas notamment de l'ouverture de fouilles superficielles ou profondes, de la modification du régime des eaux souterraines, de la mise en place de surcharge, de l'usage d'explosifs, etc...

En première analyse, on peut dire qu'une masse de terrain se met en mouvement sous l'action de pesanteur lorsqu'une certaine limite rhéologique du milieu se trouve dépassée. Il peut s'agir :

- ✓ De la résistance à la traction (éboulement rocheux)
- ✓ De la résistance à la compression simple (écrasement de piliers de mines).
- ✓ De la résistance au cisaillement (glissement).
- ✓ Du frottement roche sur roche pour les glissements de bancs rocheux sur un joint sec.
- ✓ De la limite de fluage non amorti (certains glissements en milieu argileux).
- ✓ De la limite de liquidité d'Atterberg (écoulements viscoplastiques ou fluides).

I.2. Caractérisation du mouvement de terrain

De nombreuses classifications ont été proposées pour les mouvements de versants instables ; elles s'appuient sur des notions de cinématique, de nature de sol, de stratigraphie, etc.

De façon simplifiée, on peut considérer quatre familles principales :

- les glissements de terrain ;
- les écroulements et les chutes de blocs ;
- les mouvements de fluage ;
- les coulées et les laves torrentielles.

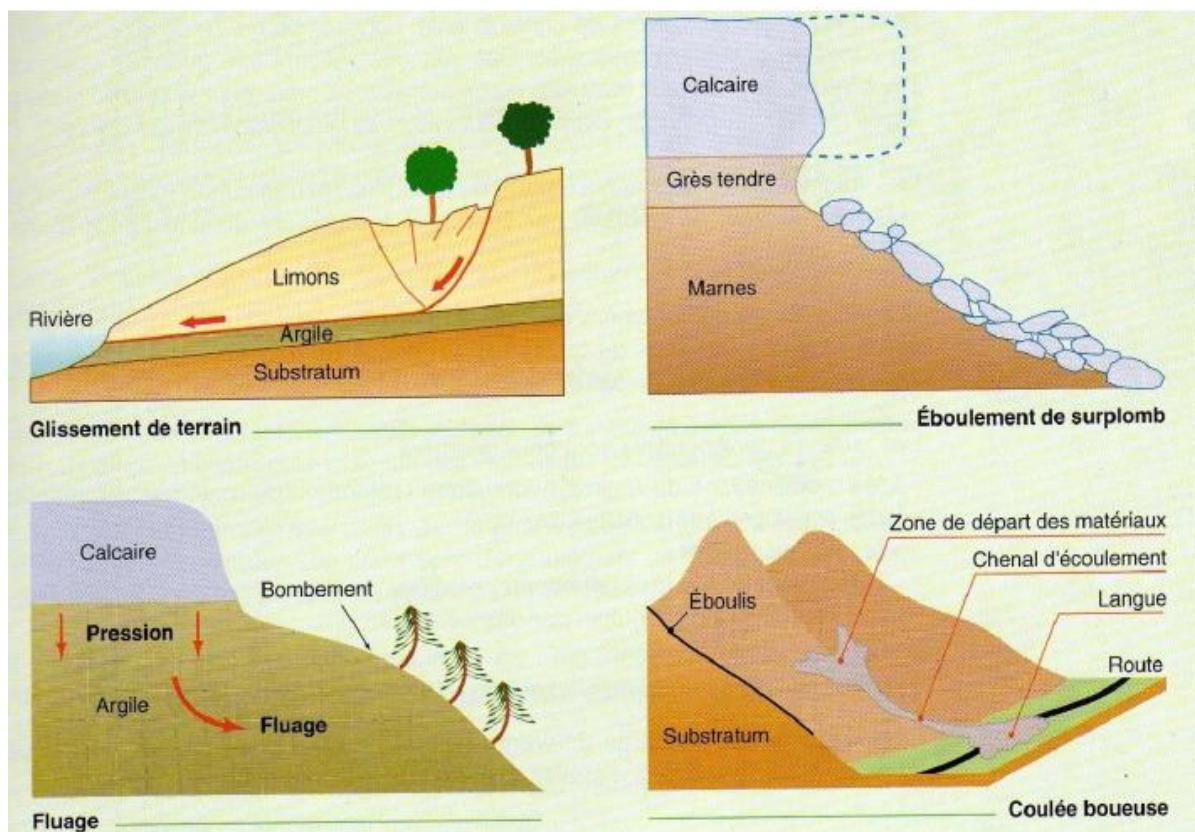


Figure I.3 - Les quatre types de mouvements de terrain

Les deux dernières familles présentent la particularité de mettre en jeu des déplacements de matériaux importants et rapides ; il n'est généralement pas possible d'intervenir au cours du phénomène ni de remettre en état le site après rupture. L'intervention de l'ingénieur est orientée, dans ces conditions vers la prévention, la prévision et la protection. -Les échelles géométriques et cinématiques des phénomènes sont très étendues :

- Volumes allant de quelques décimètres cubes (pour des chutes de blocs) à plusieurs millions de mètres cubes ;
- Vitesses très lentes (quelques millimètres par an) à très rapides (plusieurs dizaines de mètres par seconde pour les éboulements).

Le **tableau I.1** définit une terminologie cinématique caractérisant les mouvements de terrain.

<i>Très lent</i>	<i>Lent</i>	<i>Moyen</i>	<i>Rapide</i>	<i>Très rapide</i>
<i>1mm/an</i>	<i>1mm/mois</i>	<i>1,5mm/jour</i>	<i>4mm/h</i>	<i>2500mm/s</i>
<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>
<i>12 mm/an</i>	<i>50/mois</i>	<i>100mm/jour</i>	<i>10000mm/h</i>	<i>10000mm/s</i>

Tableau I.1 – Echelle cinématique des mouvements de terrain.

I.2.1. Les écoulements et chutes de blocs

Ce sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes sont caractérisées par une zone de départ, une zone de propagation et une zone d'épandage. Les blocs décrochés suivent généralement la ligne de plus grande pente. Les distances parcourues sont fonction de la position de la zone de départ dans le versant, de la pente du versant, de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la nature de la couverture superficielle, de la végétation..

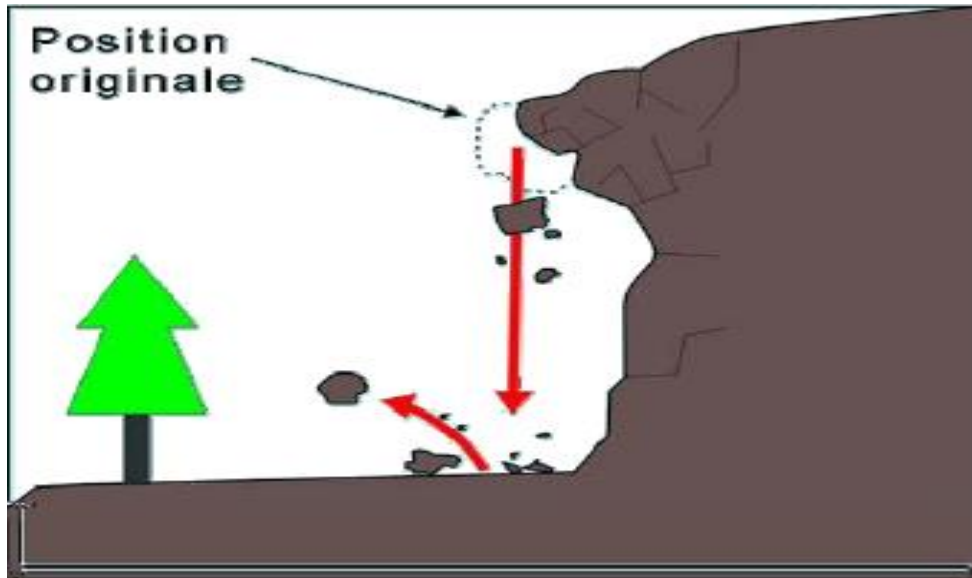


Figure I.4 – Eboulement



Figure I.5 – Chute de Bloc

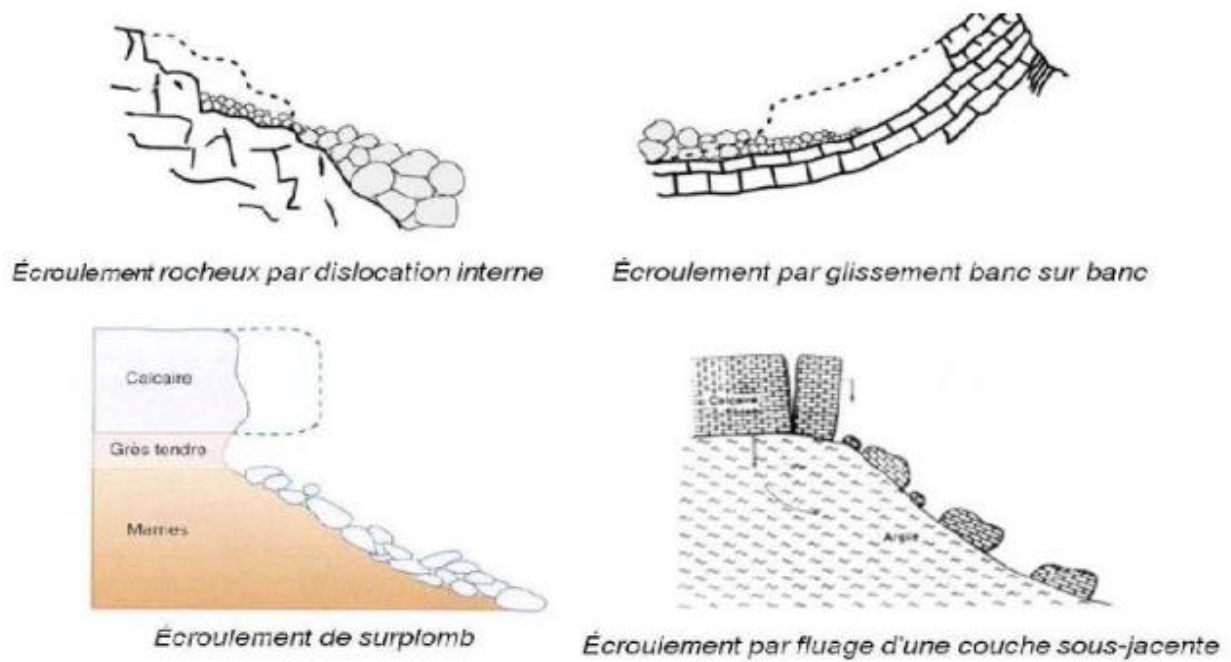


Figure I.6 - Types d'éroulement (Philippe,R. 1988)

❖ **Principaux facteurs déclenchant :**

- Les apports d'eau ;
- Les cycles gel-dégel ;
- L'altération ;
- L'érosion ;
- Les séismes.

I.2.2. Le fluage

Le fluage est caractérisé par des mouvements lents et continus, mais à des vitesses faibles. Dans le cas de fluage, il est difficile de mettre en évidence une surface de rupture. Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement au glissement) : en fait le matériau est sollicité à un état proche de la rupture.

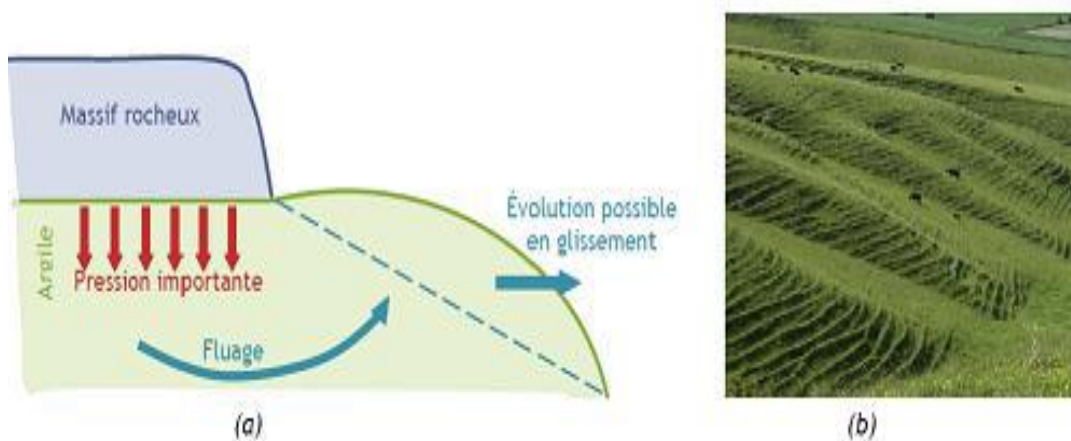


Figure I.7 – (a) Schématisation du phénomène de fluage, (b) Morgan'shill, image geograph.org.uk

I.2.2.1. Le fluage dans les sols meubles

Dans les formations meubles, les mouvements sont souvent désignés par le terme générique de fluage. Ce sont des mouvements lents dans la masse, susceptibles d'évoluer par un phénomène de rupture progressive vers des glissements ou des écoulements (apparition d'une surface de rupture). Le fluage concerne généralement les marnes, les argiles plastiques de grande épaisseur supportant une surcharge naturelle ou anthropique. Les volumes de sol mis en jeu sont comparables à ceux des glissements.

➤ Principaux facteurs déclenchant :

- La saturation progressive ;
- L'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau.

I.2.2.2. Le fluage dans les sols rocheux

Dans les formations rocheuses, les mouvements de fluage sont désignés par le terme de fauchage et se caractérisent par un basculement ou renversement des sommets de couches très redressées (proches de la verticale). Le fauchage est susceptible d'évoluer en écroulement ou en chute de blocs dans les roches tendres vers un glissement. C'est un phénomène qui affecte les matériaux présentant une

schistosité (schistes, gneiss, micaschiste). Les marno-calcaires et grès sont également sensibles au fauchage. Les volumes de sol mis en mouvement varient de quelques centaines de m³ à quelques milliers de m³.

➤ **Principaux facteurs déclenchant :**

- Les mouvements néotectoniques ;
- Le vieillissement et l'altération des joints.

I.2.3. Les collées et les laves torrentielles

Ce sont des mouvements fluides de suspensions de matériaux de granulométrie variable. Les mouvements se produisent lorsque la matrice fine atteint une teneur en eau très élevée qui la liquéfie. Les volumes déplacés se chiffrent en dizaines de milliers de mètres cubes.

➤ **Principaux facteurs déclenchant**

- La disponibilité d'importantes quantités d'eau ;
- Fortes précipitations ;
- Rupture des digues ;
- Rupture des barrages.

Le **tableau I.2** synthétise les éléments qui caractérisent les différentes familles de mouvements de terrains.

Terrain		Vitesse moyenne	Volume	Facteur déclenchant
Glissement	Sols massifs fracturée	Très lente à Moyenne	De quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	eau, terrassements
Fluage	Formation meuble	Très lente	De quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	chargement, évolution du matériau
Ecroulement	Massifs rocheux	De très lente à très rapide	De quelques m ³ à plus de dix mille m ³	eau, gel dégel, séisme
Coulée	Sols argileux et Limoneux lâches	Très rapide	De dix à plusieurs centaines de milliers de m ³	très fortes pluies, rupture de digues

Tableau I.2 -Éléments caractérisant les différents mouvements de terrain

I.2.4. Les glissements

Ces mouvements se produisent généralement dans des matériaux meubles (des sols) ou des massifs rocheux fracturés ou altérés. Ils se manifestent par le déplacement d'une masse de matériau le long d'une (ou plusieurs) surface(s) de rupture. La forme de cette dernière dépend en partie de la structure géologique du site. Les formations complexes donnent généralement lieu à des surfaces de rupture qui suivent les contacts entre couches ou qui se développent au sein des zones de plus faibles résistances, ces surfaces peuvent être de forme quelconque. Dans les massifs rocheux fracturés, les glissements se produisent le long des plans privilégiés (schistosité, pendage, plans de fracturation, etc.) qui délimitent des dièdres.



Figure I.8 - Glissement réel à Mountain River, Canada.

❖ **Les facteurs déclencheurs sont généralement :**

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles, etc.) ;
- Les terrassements ;
- L'érosion naturelle (ruissellement, érosion de berges) ;
- Les accélérations produites par les séismes.

I.2.4.1. Classification de glissement selon la forme

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- ✓ glissement plan, le long d'une surface plane ;
- ✓ glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;
- ✓ glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.

I.2.4.1. a. Glissement plan ou translationnel

Ils se manifestent lorsqu'il existe une surface topographique pouvant guider une rupture plane : telle qu'une couche mince de caractéristiques médiocres sur un substratum, Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.

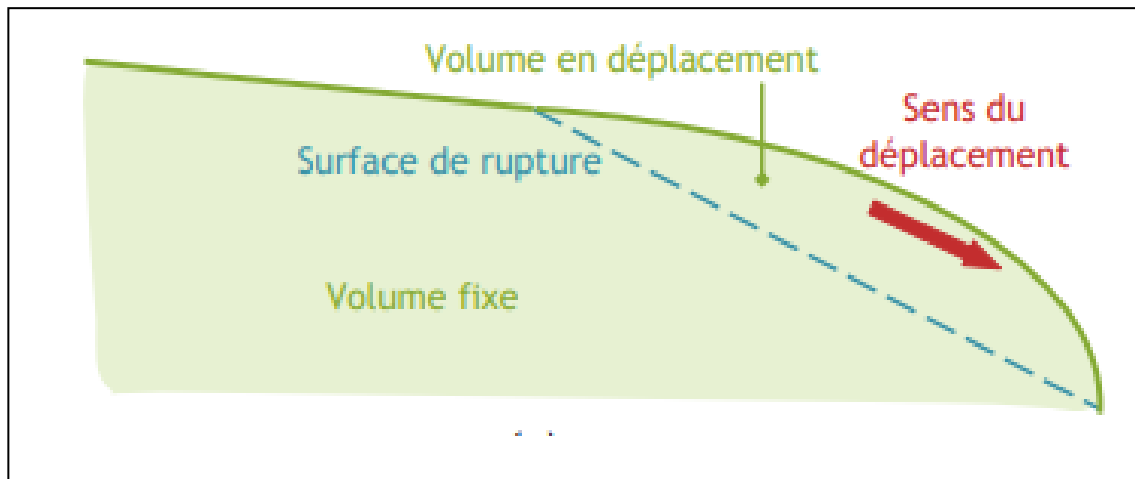


Figure I.9 - Schématisation du phénomène de glissement de terrain plan



Figure I.10 - Glissement Plan

I.2.4.1.b. Glissement rotationnel ou circulaire

○ Glissement rotationnelle simple

Ils sont caractérisés par un basculement de la masse glissée le long d'une "surface de rupture" dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire, c'est le cas en particulier des ruptures de remblai sur sols mous et de déblai en sols homogènes. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.

❖ Principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation de pressions interstitielles....) ;
- Les terrassements ;
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosions des berges) ;
- Les séismes.

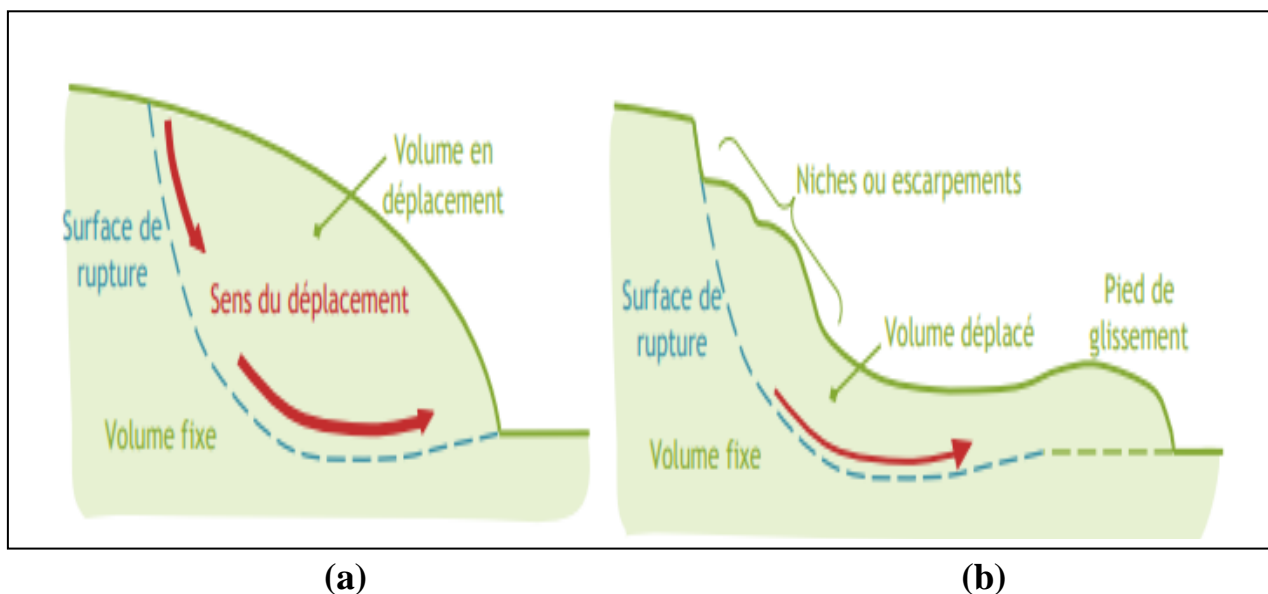


Figure I.11 - Schématisation du phénomène de glissement circulaire

(a) avant activation ; (b) après activation

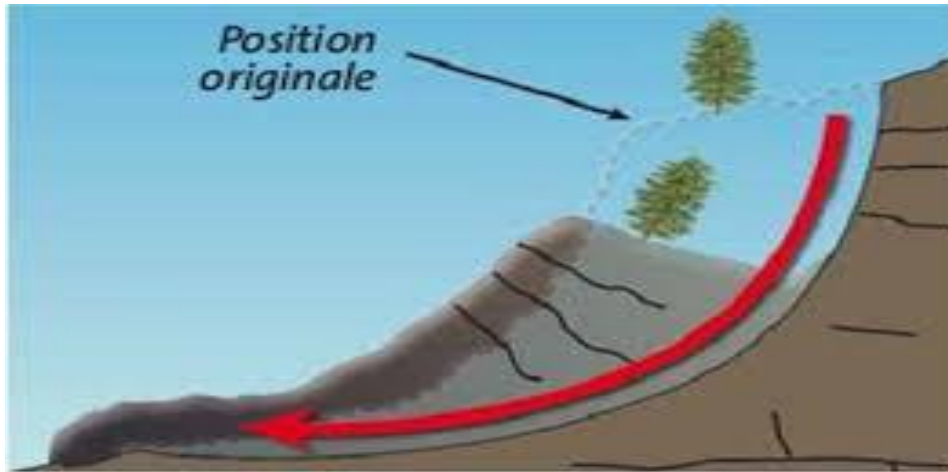


Figure I.12 - Glissement circulaire simple

○ **Glissement rotationnel Complexe :**

Lorsque le sol est hétérogène ou anisotrope il peut y avoir formation de glissements "complexes" dont certaines parties correspondent à des mouvements rotationnels et d'autres à des mouvements plans. C'est le cas, en particulier, des remblais sur versants. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.

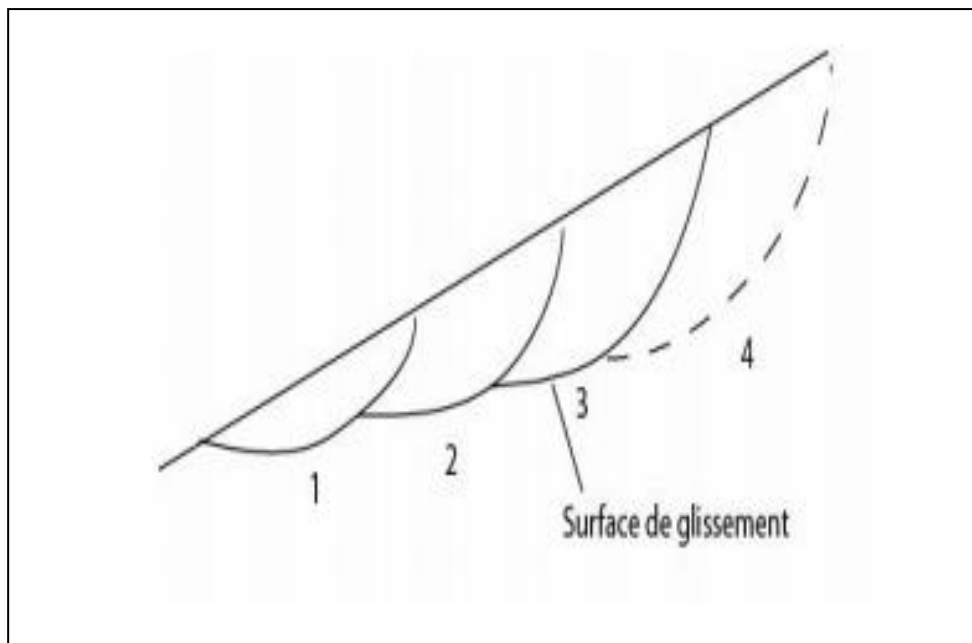


Figure I.13 - Glissement circulaire complexe

I.2.4.2. Classification de glissement selon la vitesse

- Glissement de terrain permanent : C'est un mouvement qui s'étend sur une longue période, la masse de terre se déplace régulièrement vers l'aval le long d'une surface de rupture existante, avec des phases d'accélération et de réactivation.

- Glissement de terrain spontané : C'est un mouvement relativement rapide qui se produit contrairement au glissement permanent le long d'une nouvelle surface de glissement, il se déclenche de manière subite avec des vitesses instantanées élevées, la teneur en eau étant insuffisante pour induire la liquéfaction du matériau (le sol garde une partie de sa cohésion) donc une surface de glissement peut être observée (pas de coulée).

I.2.4.3. Les causes principales de glissement de terrain :

Il y a plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants sont :

- **La nature des terrains** : La nature de terrains dépend de la:
 - Géométrie de terrains.
 - Résistance au cisaillement des sols ou des roches.
- **L'action de l'eau** : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.
- **Les actions climatiques** : Les facteurs climatiques prépondérants sont constitués par les apports d'eau. Les autres actions externes, susceptibles de modifier l'état d'équilibre d'un versant, résultent principalement de modifications de géométrie, de chargements et de déchargements.
- **Les causes mécaniques externes** : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les

talus stables, toute sur charge naturelle ou artificielle déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines ...).

- **Construction sur pente** : La construction de remblais sur pente naturelle diminue de l'ensemble pente et remblai.

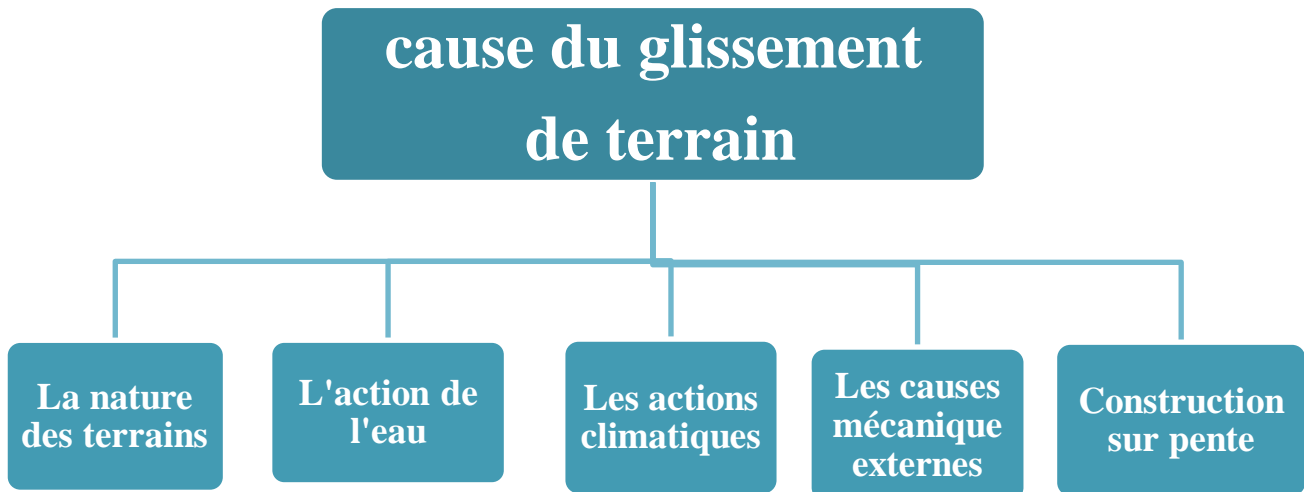


Figure I.14 - Les causes principales du glissement de terrain

I.2.4.4. Indices et phénomènes induits par les glissements

- ⇒ Indices caractéristiques d'activité d'un glissement : niche d'arrachement, fissures, bourrelets, arbres basculés, zone de rétention d'eau, fissuration des bâtiments, déformation des routes, etc.
- ⇒ Phénomènes aggravants induits par les glissements de terrain:
 - formation d'embâcles sur les cours d'eau
 - laves torrentielles suite à l'apport de matériaux dans les cours d'eau
 - coulées de boue à partir des bourrelets de pieds formés de matériaux remaniés.

Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité variables : des périodes de vitesse de glissement plus élevée avec des phases de calme apparent.

➤ **Glissements de terrains actifs**

Un glissement de terrain est considéré comme actif si un mouvement peut être constaté. Le déplacement peut être minime, les déformations de moins d'un millimètre étant toute fois difficilement détectables. Les glissements actifs comprennent les glissements présentant des vitesses plus ou moins constantes à long terme tout comme les glissements avec des phases successives d'accélération.

➤ **Glissements de terrains réactivés**

Désignent les glissements de terrain qui quittent une phase inactive pour entrer dans une phase active. Habituellement, les glissements de terrain réactivés se déplacent le long d'une surface de glissement existante.

➤ **Glissements de terrains inactifs**

Désignent les glissements de terrain restés immobiles pendant plusieurs années. Ceux-ci se subdivisent en quatre catégories :

- Glissements bloqués.
- Glissements latents.
- Glissements abandonnés.
- Glissement stabilisés.

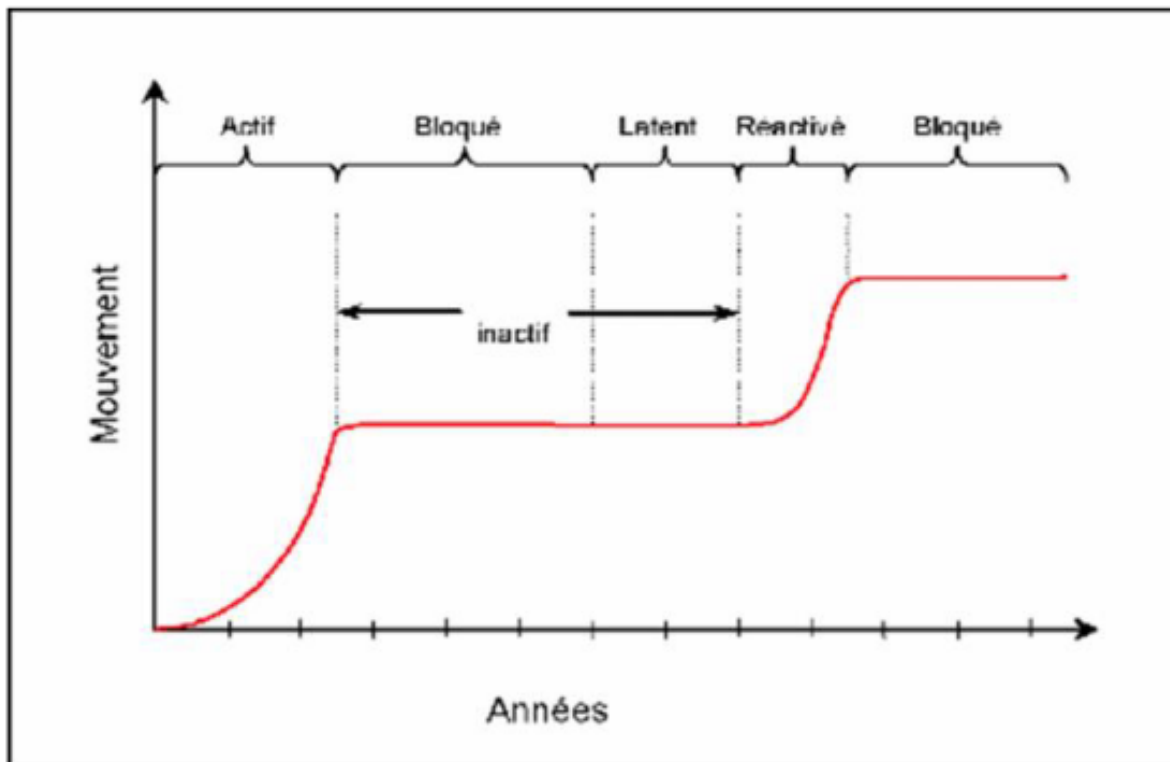


Figure I.15 - Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain

I.2.4.5. Comment réduire le problème de glissement ?

I.2.4.5.a. Évitement

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

I.2.4.5.b. Mesures de protection

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

I.2.4.5.c. Solutions de génie civil

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

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

I.2.4.5.d. Confinement ou ouvrages de dérivation

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

- barrages de captage et bassins de confinement afin de retenir les débris et l'eau ;
- canaux ou chutes artificiels afin de détourner les débris ;
- filets et murs artificiels afin d'empêcher que les éboulements de roches ou de terre n'atteignent les routes ou les structures.

I.3.Méthode d'analyse de la stabilité des pentes

Les problèmes de stabilité de pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. En outre certaines pentes naturelles sont ou peuvent devenir instables. Une rupture d'un talus peut être catastrophique et provoquer des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts naturels considérables. 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 reconnaissance du site et le choix des caractéristiques mécaniques des sols, un calcul de stabilité pour déterminer d'une

part la courbe de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé, d'autre part la valeur correspondante du coefficient de sécurité.

Cependant une longue expérience a été acquise tant que les méthodes de calcul que dans les techniques de construction, de telle sorte que les problèmes de stabilité de pentes peuvent maintenant être résolus avec une assez bonne fiabilité.

Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris: ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'Homme; leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique. Dans la pratique cependant, les choses sont très complexes, du fait des incertitudes:

- sur les conditions initiales, notamment en profondeur,
- sur les propriétés mécaniques des terrains, en général hétérogènes, non linéaires, anisotropes discontinus,...
- sur les conditions hydrauliques: position de la nappe, phénomènes se produisant en zone non saturée. L'eau est la cause déclenchant de la plupart des mouvements; c'est un facteur variable dans le temps.

I.3.1. La définition d'une pente

Une pente est l'inclinaison d'un terrain .Elle se mesure en degrés ou en pourcentage et ne doit pas être confondue avec le dénivelé, évalué en mètres ou le pendage qui s'applique aux couches du sous - sol. La pente peut être une contrainte naturelle pour l'installation humaine, elle peut être le théâtre d'éboulements, d'avalanches ou de glissement de terrain.

I.3.1.1. Pente naturelle

Il s'agit des talus existants, peu homogènes et présentant des variations géologiques et éventuellement des discontinuités.

I.3.1.2. Ponte artificiel

Les pentes artificielles sont essentiellement affectées par des glissements et parfois par des :

- Talus en déblai ;
- Talus en remblai sur sol non compressible ;
- Talus en remblai sur sol compressible ;
- Dignes et barrages en terre phénomènes du fluage.

I.3.2. Hypothèses de calcul

Il existe, en principe, deux possibilités pour calculer la stabilité d'une pente. La première est de considérer que la masse instable forme un bloc rigide, que le sol a un comportement rigide-plastique et donc qu'à la rupture tous les points de la masse stable atteignent en même temps leur seuil de rupture; ce sont les méthodes de calcul à la rupture, les seules encore employées pratiquement à ce jour. La seconde possibilité est d'appliquer la méthode des éléments finis en choisissant une loi de comportement réaliste en réduisant, par exemple, les caractéristiques de sol jusqu'à la rupture.

I.3.2.1. Définition du critère de rupture

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 :

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad 2.1$$

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et c et φ respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau, figure

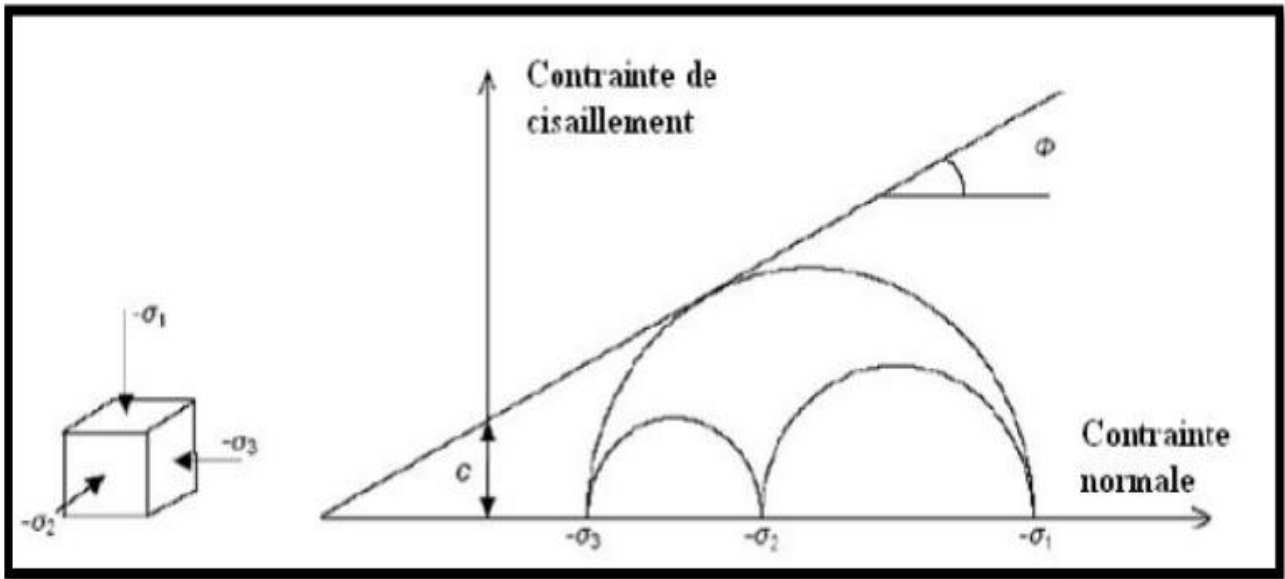


Figure I.16 - Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.

I.3.2.2. Le coefficient de sécurité

Le principe de calcul de stabilité des talus consiste à déterminer le facteur de sécurité F_s par lequel il faut diviser la résistance de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre. Il existe plusieurs définitions possibles du coefficient de sécurité chacun présente des avantages et des inconvénients nous citons ci-dessous un certain nombre de ces définitions :

$$F = \frac{\text{Résistance au cisaillement maximal mobilisable}}{\text{Résistance au cisaillement nécessaire à l'équilibre}} \quad 2.2$$

Il faut noter qu'avec cette définition la valeur du coefficient de sécurité est une valeur Ponctuelle qui va donc dépendre de la position du point M considéré le long de la surface testée.

$$1. \quad F = \frac{\text{Effort résistant}}{\text{Effort moteur}} \quad 2.3$$

Cette définition suppose que la surface testée est planaire.

$$1. \quad F = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment moteur}} \quad (\text{définition de Fröhlich}) \quad 2.4$$

Cette définition suppose que la surface testée est circulaire (ellipsoïdale en 3D).

$$2. \quad F = \frac{Hc}{H} = \frac{\text{Hauteur critique}}{\text{auteur réelle}} \quad 2.5$$

Toutes ces définitions conduisent à des valeurs différentes pour une même géométrie, sauf dans le cas où l'on se trouve à la rupture ($F=1$). La définition 1 est couramment employée. Fellenius a proposé une définition voisine en considérant que l'équilibre du volume V (Figure 2.1) est atteint lorsque le système des forces extérieures qui lui est appliqué mobilise les fractions $\tan \varphi/F$ et c/F des valeurs réelles du frottement et de la cohésion du milieu. Cette définition permet d'obtenir un coefficient de sécurité pour l'ensemble de la surface.

Cette définition à donc pour inconvénient de considérer que la rupture se produira Simultanément en tout point, ce qui est fortement contestable dans le cas de sol fortement hétérogène et n'est pas compatible avec la notion de « Rupture progressive ».

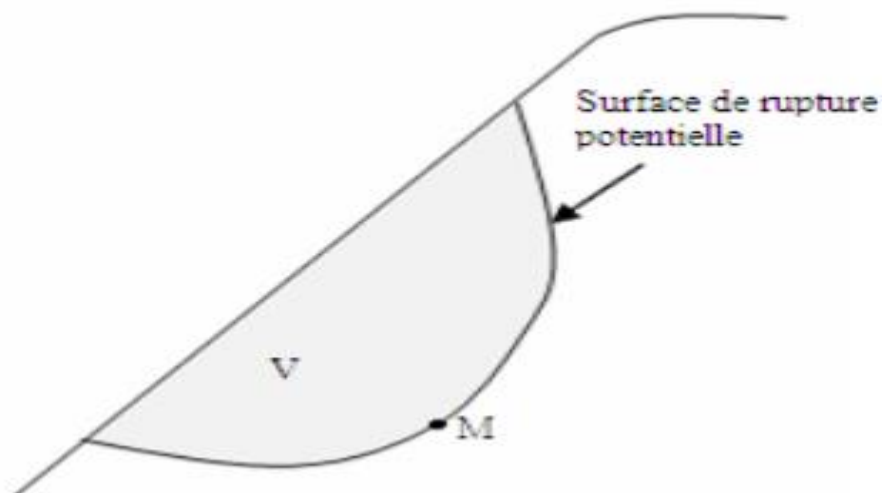


Figure I.17 - Surface de rupture potentielle

On distingue deux démarches pour le calcul de facteur de sécurité :

1. Dans la première, le glissement a déjà eu lieu, il s'agit d'une valeur de F_s Inférieure ou égale à 1, donc :

- Soit, on connaît la surface exacte et on cherche à déterminer, pour $F_s = 1$ Les caractéristiques correspondantes.

- Soit, on a les caractéristiques et on cherche à déterminer la surface de glissement.

2. La deuxième, la plus fréquente, consiste à déterminer la marge de sécurité disponible et adopter les solutions adéquates pour améliorer la sécurité de l'ouvrage en répondant à des exigences en fonction de l'emploi des talus.

➤ **Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité**

Théoriquement, le talus est dit stable si $F_s > 1$. L'état d'équilibre limite (rupture) est obtenu lorsque $F_s = 1$. Mais dans la pratique, le coefficient F_s est compris entre 1,3 et 1,5 en tenant compte des facteurs suivants :

- Les erreurs dues à l'exactitude des méthodes de calcul de la stabilité du bord.

- Les incertitudes expérimentales de la détermination des propriétés physico-mécaniques des roches, comme par exemple la valeur moyenne du poids volumique des roches composant le massif.

-Les incertitudes de la détermination de l'influence de la fissuration.

-L'influence des charges dynamiques provoquées par le tir, par le mouvement des moyens de transport et par les séismes. (M'zoughem K.,2005)

Le tableau I.3, nous donne les valeurs de F_s en fonction de l'importance de L'ouvrage et des conditions particulières qui l'entourent.

Fs	Etat de l'ouvrage
< 1	Danger
1 – 1,25	Sécurité contestable
1,25 – 1,4	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants.
> 1,4	Satisfaisante pour les barrages

Tableau I.3 - Valeurs de FS en fonction de l'état de l'ouvrage

I.4.Méthodes de calcul de la stabilité

I.4.1. Calcul à la rupture

L'analyse de la stabilité des talus est traitée comme un problème d'équilibre limite. Les calculs à la rupture supposent que le terrain se comporte comme un solide rigide-plastique (ou rigide-rupture). Le critère de plasticité (ou rupture) est défini par une loi classique (Mohr-Coulomb en général). Ce critère atteint au niveau de limite du volume étudié (surface de rupture potentielle). (BENAISSA.2003)

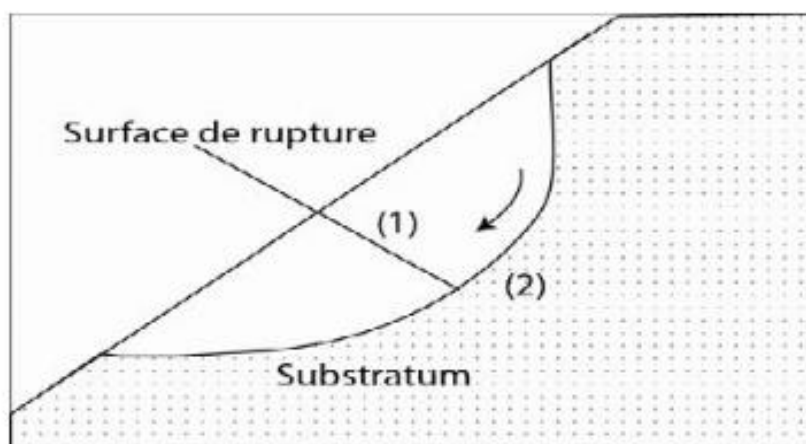


Figure I.18 - Surface de rupture (Guide technique LCPC.1998)

I.4.1.1. Stabilité des pentes en rupture Plane

On dit une rupture plane quand la surface de rupture potentielle est parallèle à la surface de la pente, et quand la hauteur est petite par rapport à la longueur de la pente on dit que la pente est infinie.

La pente est inclinée à l'horizontale d'un angle β , et de hauteur h , le niveau d'eau est situé à h_w et considéré comme parallèle à la pente (Figure I.16)

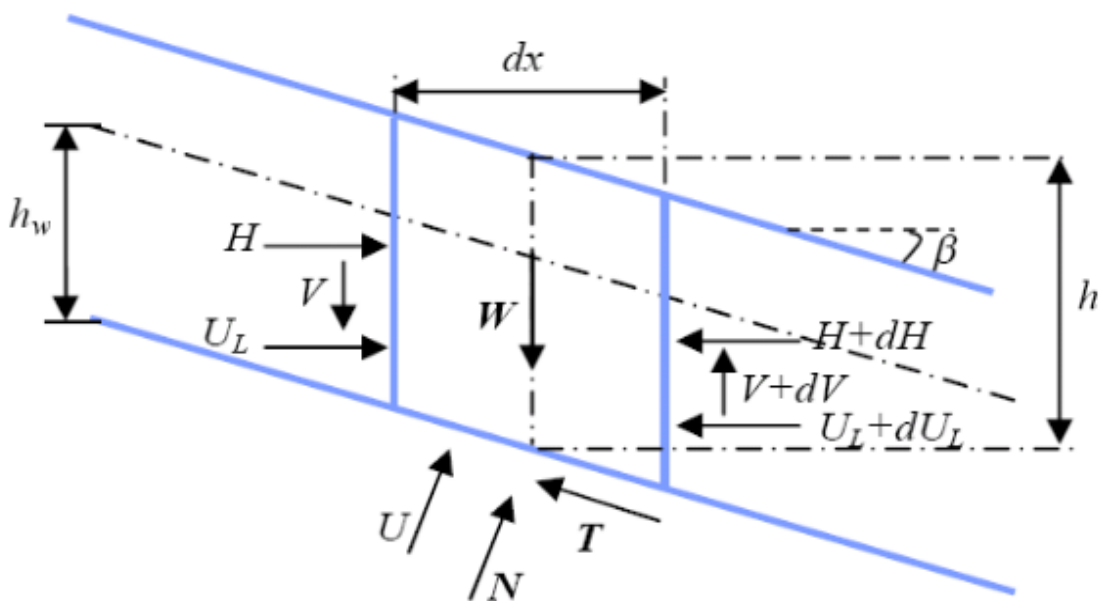


Figure I.19 – Rupture Plane

Le critère de rupture de Coulomb s'écrit :

$$Tm_{ax} = C' \frac{dx}{\cos \beta} + (N - U) \tan \varphi' \quad 2.6$$

$$T = W \cdot \sin \beta$$

Avec: β : l'angle d'inclinaison de la pente et du plan de glissement mesuré par rapport à l'horizontale

d_x : la distance entre les deux extrémités du bloc.

On obtient l'expression suivante pour le cas générale :

$$F_s = \frac{c'L + (W \cos \alpha - U) \operatorname{tng} \phi'}{W \sin \alpha} \quad 2.7$$

Avec: **L** : désigne la longueur du talus.

α : sa pente.

W : le poids des terres en mouvement.

U : la résultante des pressions interstitielles éventuelles.

C' : la cohésion effective.

ϕ' : l'angle de frottement interne effectif.

I.4.1.2. Stabilité des pentes en rupture circulaire ou quelconque

Cette stabilité peut être scindée en deux axes fondamentaux :

- Prise en compte de la totalité de la masse formant le sol dans l'étude d'équilibre et adaptation aux sols homogènes (Méthodes globales),
- Subdivision du massif en tranches verticales. La stabilité de chaque tranche est calculée séparément (Méthode des tranches).

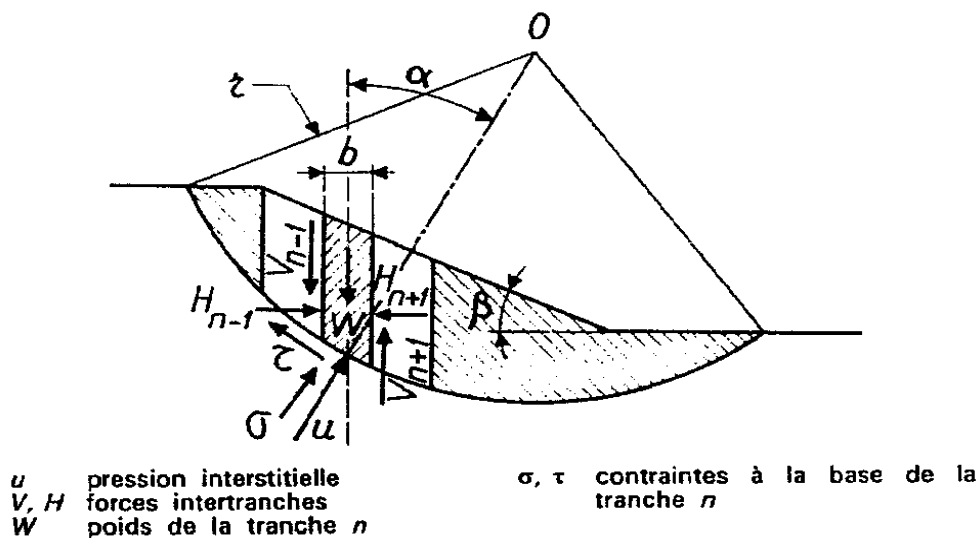


Figure I.20 - Un schéma de la rupture circulaire

I.4.2. Présentation des méthodes de calcul

I.4.2.1. Méthode de Taylor (1937) :

Cette méthode s'adapte aux pentes de géométrie simple formées d'un sol homogène sans présence d'eau. Il est considéré au niveau de la méthode les forces relatives au poids propre du massif, à la cohésion et à la résultante de la force normale et celle de frottement. La formulation du coefficient de sécurité :

$$F = C / (\gamma H M t)$$

2.8

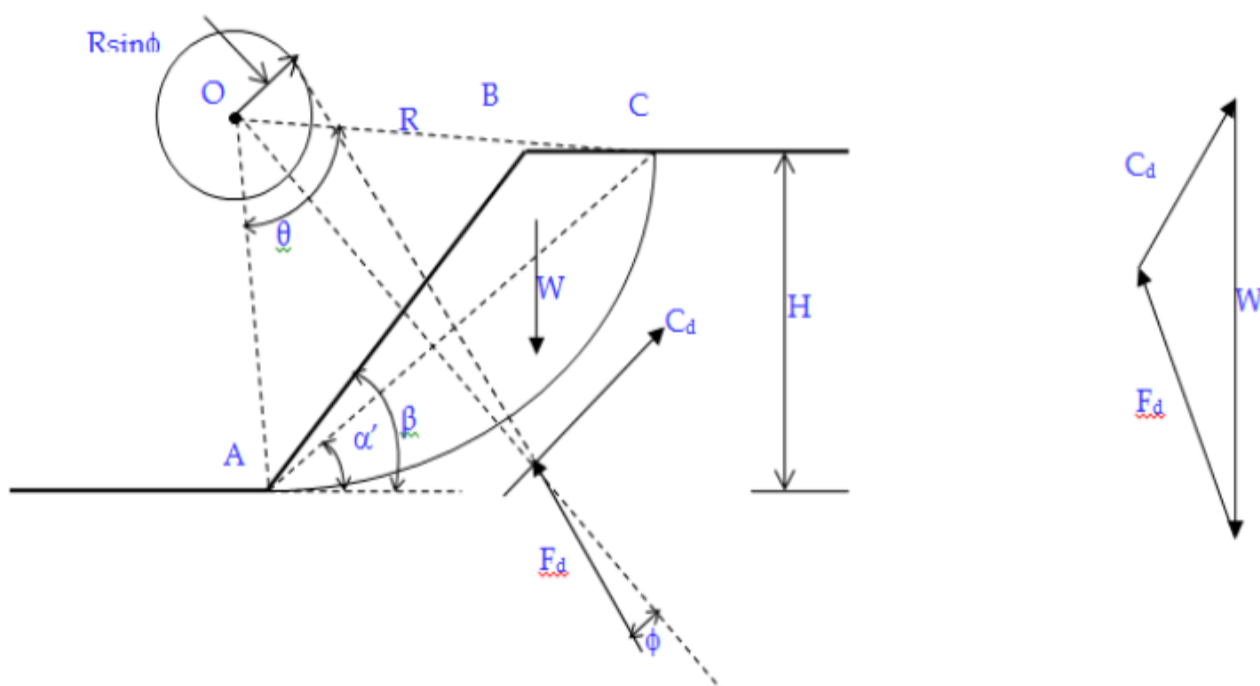


Figure I.21 - Analyse d'un talus homogène

Où le coefficient de stabilité mt dépend de la géométrie de la pente.

I.4.2.2. Méthode des tranches

Le sol est divisé en plusieurs tranches verticales. Les différentes forces externes et internes qui s'appliquent sur chacune des tranches sont montrées sur la figure I.19.

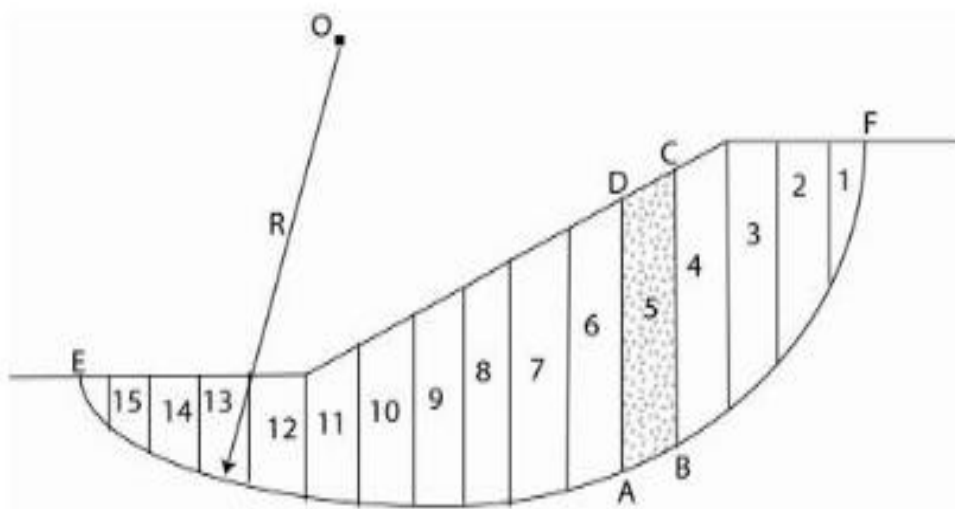


Figure I.22 - Découpage d'un talus des tranches

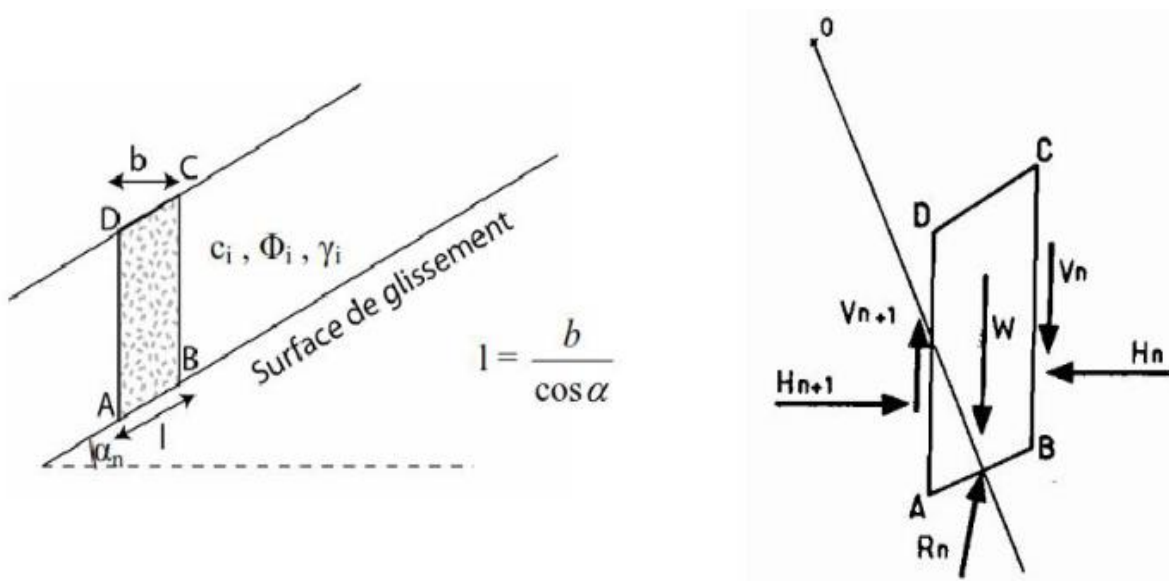


Figure I.23 - Les forces agissantes sur une tranche

La méthode des tranches consiste à découper le volume de sol en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux. En l'absence d'eau, une tranche (n) est soumise à :

- Son poids : $W = b \sum (\gamma_i \cdot h_i)$

- Les efforts inter-tranches décomposés en efforts horizontaux H_n et H_{n+1} et en efforts verticaux V_n et V_{n+1}
- La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle.
(BENAISSA.2003)

Il existe environ une douzaine de variantes de cette méthode qui diffèrent entre elles par :

- la manière d'utiliser les équations de la statique pour définir la sécurité.
- les hypothèses utilisées pour rendre le problème déterminé. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées on considère:
 - ✓ La méthode de Fellenius ;
 - ✓ La méthode de Bishop simplifiée ;
 - ✓ La méthode de Janbu simplifiée.

I.4.2.3 Méthodes probabilistes

Il y a lieu de signaler que les méthodes d'équilibre limite ne considèrent pas l'ensemble des incertitudes sur les paramètres du problème à résoudre, notamment les données géométriques, et les erreurs de mesure au laboratoire des caractéristiques mécaniques du sol et leur variation spatiale et temporelle sur le terrain. Compte tenu de l'aspect plus ou moins aléatoire des paramètres d'analyse, des méthodes probabilistes, basées spécialement sur le calcul de risque ont été développés.

Il faut cependant ajuster la variation de chaque paramètre influençant d'une manière significative la stabilité à une loi probabiliste et de calculer la fonction probabilité de rupture comme étant une combinaison de plusieurs fonctions aléatoires.

On synthétise dans ce qui suit quelques méthodes probabilistes :

- Simulation Monte-Carlo.
- Evaluation de la stabilité.

- Analyse statistique.
- Analyse de la stabilité des pentes par approche stochastique.

I.4.2.4. Méthodes numériques

Le développement des programmes sur ordinateurs a été très bénéfique pour la résolution de certains problèmes de stabilité des pentes. Beaucoup de méthodes numériques sont utilisées pour le faire en l'occurrence :

- Méthode des éléments finis, permettant de modéliser les aspects liés à l'hétérogénéité des matériaux, la géométrie des talus et leur environnement, l'interaction entre les terrains et les structures ainsi que les discontinuités spécifiquement pour les massifs rocheux.

- Méthode des différences finies, dans laquelle les variables ne sont définies qu'aux nœuds du maillage et la résolution est locale et pas à pas. Le code de calcul utilisé au niveau de ce mini-projet se base essentiellement sur cette méthode.

- Méthode des éléments distincts, qui se base sur les principes de la méthode des différences finies tout en tenant compte de la discontinuité du milieu étudié.

Toutefois, les méthodes numériques ont permis de faire de grands progrès dans la compréhension des divers types de comportement des talus.

I.5. Méthode de confortement du sol

Quand on veut consolider un glissement, peu importe que la surface de rupture soit circulaire, logarithmique, plane,...etc. Par contre, il est de la plus grande importance de connaître ses dimensions et d'avoir une idée sur son origine: surcharge, écoulement d'eau, altération des sols ou simplement ruissellement exceptionnel. Le choix de la méthode de consolidation en dépend. Face à un problème de stabilité, une première solution consiste à s'affranchir des mouvements de la pente instable sans les empêcher.

I.5.1. Choix de méthode de confortement

Le choix de la méthode de confortement varie d'une part avec les caractéristiques et l'état de chaque site comme le type de sol, les conditions de drainage et les surcharges, et d'autre part avec le coût économique (quand il existe plusieurs solutions de confortement).

La méthode de confortement choisie doit répondre aux exigences suivantes :

- ✓ Coté résistance: la méthode doit assurer la stabilité du talus, ainsi le mode de renforcement ne génère aucun risque d'augmenter les efforts moteurs de notre talus.
- ✓ Coté économique: le mode de renforcement doit être le moins coûteux et le plus disponible dans le marché, car il y a des modes de renforcement qui nécessitent une importation, en règle générale on utilise ce qui est disponible (locale) et moins coûteux.
- ✓ Coté technologique (ouvrabilité et maniabilité) : la méthode de renforcement doit être simple et ne demande qu'un minimum d'effort ainsi qu'on peut la réaliser facilement. (Aissa M. H., 2011)

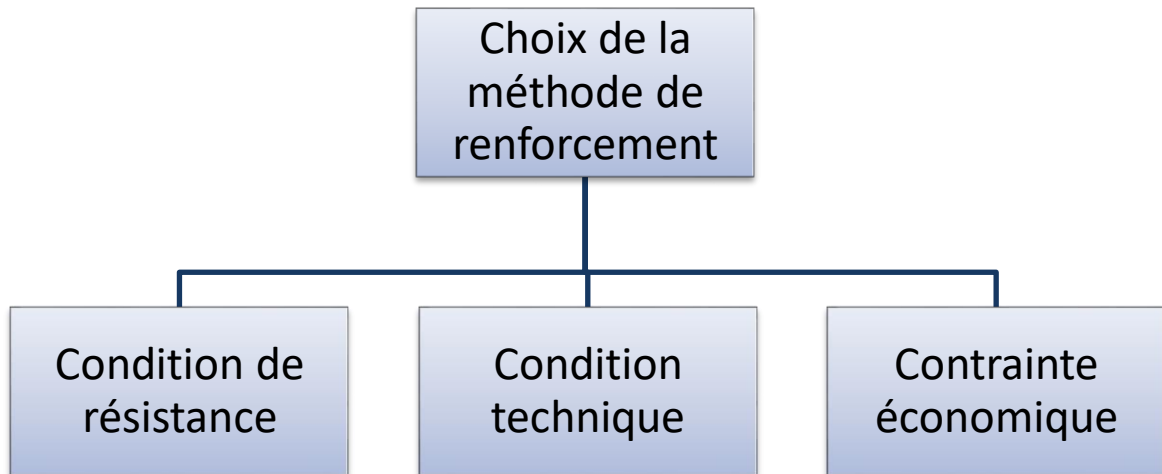


Figure I.24 - Les critères de choix de la méthode de confortement. (FahsiM.,2013)

I.5.2. Classification des méthodes de confortement :

Les méthodes de confortement peuvent être classées selon deux aspects : préventif et curatif.

I.5.2.1. Aspect préventif :

Les risques d'instabilité des sols, qu'ils résultent de phénomènes naturels ou des activités humaines, font l'objet de travaux de confortement préventif. Ceux-ci sont effectués avec des méthodes de renforcement, de soutènement, développées par le génie civil, mais mettent aussi en œuvre plusieurs procédés spécifiques comme :

- Soutènements et traitements des talus en déblai ou en remblai devant être réalisés pour le passage des chaussées des routes et autoroutes et des formes d'assise des bâtiments de nature diverses.-Protections et confortements de site situé géo-morphologiquement en zones dites sensibles ou fragiles et contenant un ou plusieurs ouvrages ou installations stratégiques.-Soutènement et étaielements à mettre en place, en phase provisoire de travaux de terrassement importants ou excavations en sous-sol assez profondes.

- Protections et comportements de site situé géo-morphologiquement en zones dites sensibles ou fragiles et contenant un ou plusieurs ouvrages ou installations stratégiques.
- Soutènement et étaielements à mettre en place, en phase provisoire de travaux de terrassement importants ou excavations en sous-sol assez profondes.

I.5.2.2. Aspect curatif :

Cas de glissement déjà produit et qui s'est immobilisé et dont il y a lieu de prévoir le soutènement et protections nécessaires vis-à-vis d'éventuels mouvements d'instabilité récurrents.

Cas de glissement amorcé (à partir de signes apparents) et soumis encore à un mouvement actif à vitesse lente ou moyenne.

En effet l'un ou l'autre aspect (préventif ou curatif) suivant le cas posé, ces deux types d'approche sont généralement reconnus à l'emploi, à savoir : l'approche douce et l'approche dure.

L'approche douce faisant appel à l'utilisation des opérations simples telles que les terrassements, le drainage et la végétation et d'autre part l'approche dure introduisant un peu plus les facteurs de la reconnaissance géotechnique et de sollicitation du cas et un apport technologique plus développé (DSPR.,2008), tels que les renforcements, l'amélioration des caractéristiques du sol et le soutènement par éléments résistants comme le montre la figure suivante :

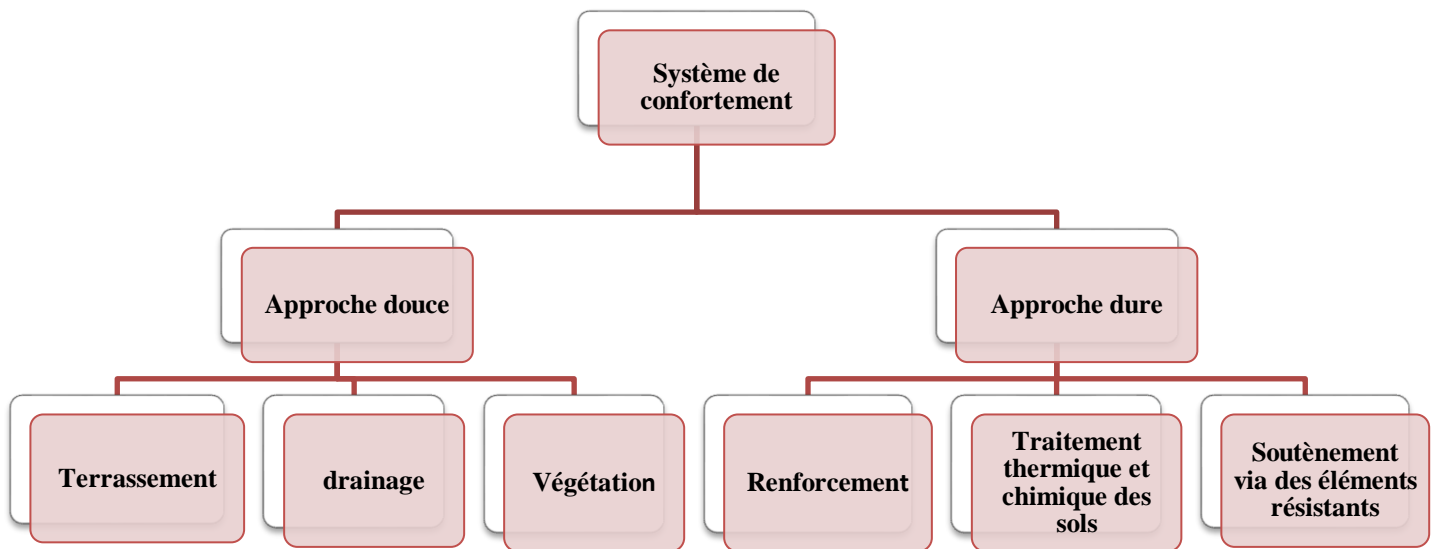


Figure I.25 - Organigramme montre les types d'approche des systèmes de parade. (Bedr S.,2008)

I.5.3. Approche douce

I.5.3.1. Terrassement :

La stabilité du talus dépend directement de la géométrie du versant, 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

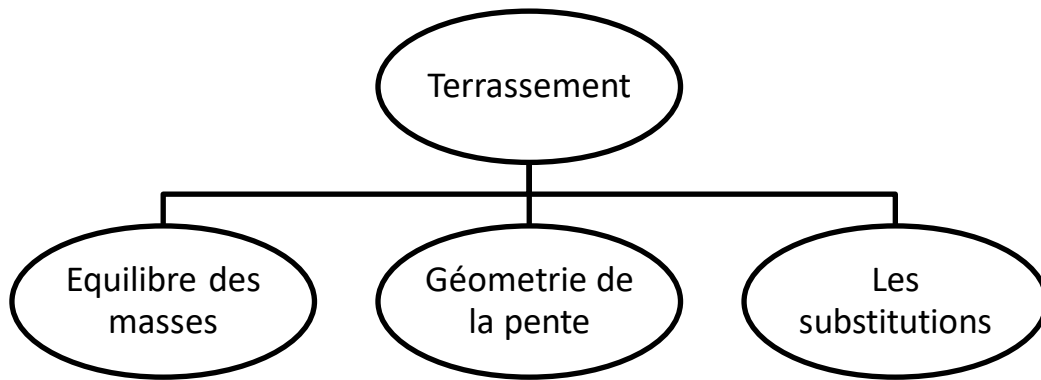


Figure I.26 – Organigramme montre la processus de terrassement

I.5.3.1.a. 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. (PhilippeL.,2002)

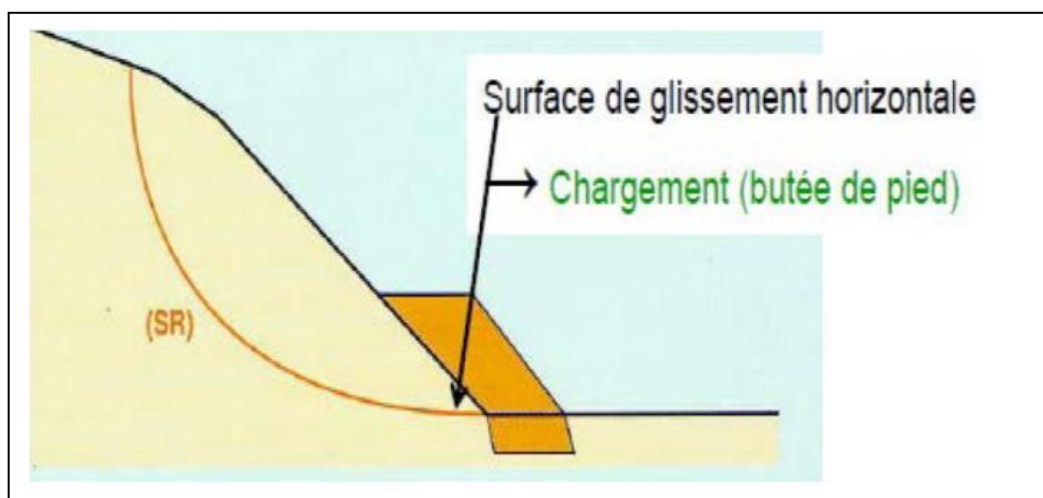
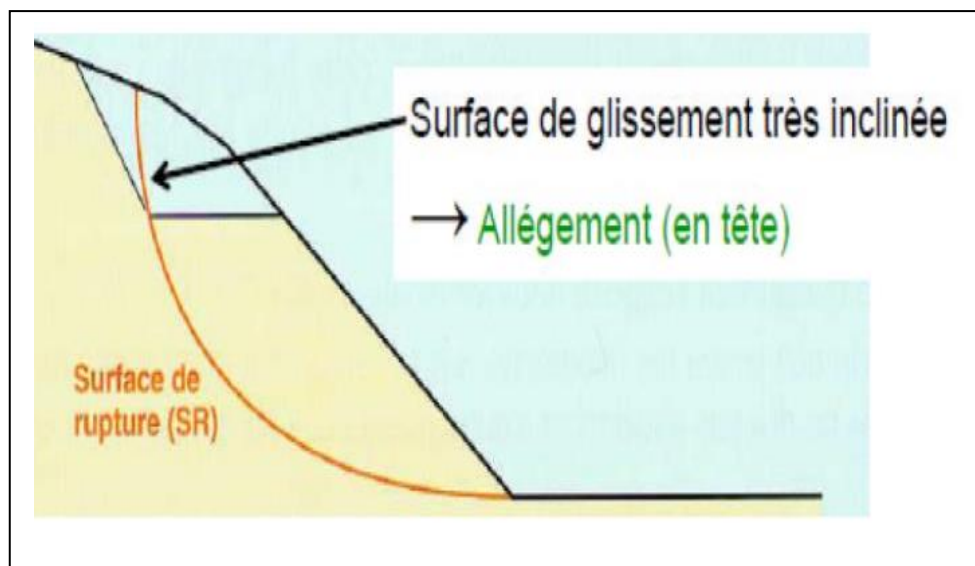


Figure I.27 – Schématisation de la bute de pied

I.5.3.1.b. 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, etc.). (Philippe L.,2002)



I.28 – Schématisation de l'allègement en tête

I.5.3.1.c. Reprofilage

Les conditions de stabilité d'un talus étant directement liées à sa pente, on peut assez simplement augmenter la sécurité par retalutage du terrain naturel. Dans ce sens, le procédé s'apparente à l'allègement en tête : il consiste en un adoucissement de la pente moyenne. Ce type de traitement est particulièrement bien adapté aux talus de déblais et il est de pratique courante. Notons que l'exécution de risbermes a l'avantage d'améliorer la stabilité par rapport à une pente unique et de créer des voies d'accès pour l'entretien ou des travaux complémentaires. (Philippe L.,2002)

I.5.3.1.d. 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.

I.5.3.2. Drainage

L'eau joue un rôle très important dans les sols, en particulier dans les sols fins cohérents. En effet, la présence de l'eau dans le sol crée des pressions interstitielles au sein de ce dernier et diminue sa cohésion. Comme il est à rappeler aussi que le poids des terres augmente avec la présence de l'eau. En ce sens que l'eau constitue un facteur moteur déterminant dans les phénomènes de glissements des terrains où le plus souvent, pour prévenir ou limiter les effets d'un glissement déclaré, on fait recours aux techniques de drainage qui ont pour but de réduire les pressions interstitielles dans les masses de sol jugées critiques. Pour ce faire, deux dispositifs de drainage sont généralement employés, le drainage superficiel et le drainage profond, selon qu'on veut éviter que le sol reçoive de l'eau où qu'on veut expulser l'eau du sol. (Sekkak M.,2014)

La figure I.29 illustre les deux dispositifs employés :

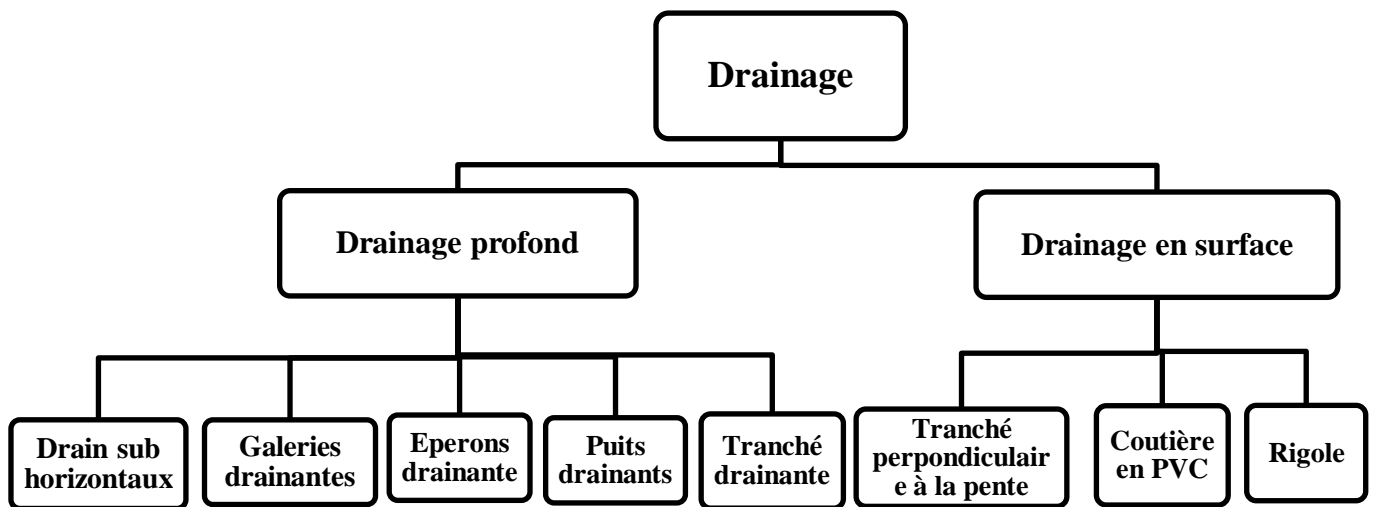


Figure I.29 – Schématisation des dispositifs de drainages (Fahsi M.,2013)

I.5.3.3. Végétation

La végétation possède un rôle stabilisateur mécanique par enracinement dans le sol. C'est une méthode écologique et économique qui consiste à stabiliser le sol avec des plantations appropriées au terrain et à l'environnement. L'utilisation de la végétation arboricole et herbacée a de tout temps donné des résultats positifs dans la prévention de l'érosion et le renforcement de la stabilité des pentes. D'ailleurs, ces dix dernières années, l'approche "douce" par l'utilisation de la végétation pour la stabilisation des pentes l'emporte sur l'approche "dure" qui utilise des dispositifs de stabilité mécanique. Ainsi à ce souci pour l'environnement s'ajoutent une meilleure connaissance et la disponibilité de plus d'informations relatives à la végétation dans les travaux d'ingénierie. (Louis C.,1984)



Figure I.30 – L’implantation des plantes dans un talus

I.5.4. Approche dure :

Dans le domaine de la stabilisation des talus, l’utilisation d’une approche dure s’impose régulièrement comme une méthode pertinente, car les délais d’exécution sont réduits eu regard des méthodes utilisées selon l’approche douce. Cette approche s’attaque au problème en modifiant, d’une manière directe, les propriétés, mécanique, physique ou chimique du sol. Les systèmes de parades qui utilisent cette approche sont :

- Le renforcement.
- Le soutènement.
- Le durcissement.

I.5.4.1. Le renforcement :

Le renforcement est un domaine récent et particulier. Il recouvre toute technique permettant d'améliorer le comportement géotechnique d'un massif de sol. En général, on renforce un massif de sol pour deux raisons principales :-Soit pour limiter ses déformations à chargement fixé.-Soit pour augmenter la capacité du sol à supporter des déformations élevées. Parmi les différents procédés décrits dans la norme (NF P 94-210 qui est spécifique aux méthodes de renforcement des sols) on peut retenir quelques techniques valables au confortement des talus.

I.5.4.1.a. Le renforcement par géotextiles :

Les géotextiles sont des produits textiles à bases de fibres polymères utilisés au contact du sol dans le cadre d'applications dans le domaine de la géotechnique et du génie civil. Leurs domaines d'utilisation sont très vastes et concernent aussi bien la géotechnique routière, les centres de stockage de déchets, les aménagements hydrauliques, la stabilisation des sols et le renforcement des fondations. (BoulfoulK.,2005)



Figure I.31 - Renforcement par géotextiles (Boulfoul K.,2005)

I.5.4.1.b. Le renforcement par géogrilles :

Les géogrilles sont classées parmi les produits géosynthétiques. Elles se présentent sous la forme de grilles monolithiques, tissées ou à fils soudés dont la maille peut avoir des formes diverses. On distingue, en particulier, les géogrilles uni-axiales ayant une résistance à la traction plus élevée dans une direction que dans la direction perpendiculaire et dont la maille est allongée, et les géogrilles biaxiales ayant la même résistance dans les deux directions du maillage qui, dans ce cas, est carré. (BoulfoulK.,2005)

La figure qui suit présente un exemple de géogrille uniaxiale.



Figure I.32 - Renforcement par géogrilles.(Boulfoul K.,2005)

I.5.4.1.c. La technique pneu sol :

Cette technique diffère du procédé géogrilles par le fait que le renforcement n'est plus assuré par des nappes géotextiles mais par des niveaux de pneumatiques usagés de véhicules légers, reliés entre eux par sangles en polyester ou attaches métalliques et dont les flancs sont entièrement découpés.



Figure I.33 - Renforcement par Pneusol. (Bedr S.,2008)

I.5.4.1.d. Le renforcement par ancrage

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

Le principe consiste à réduire les forces actives du glissement et à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture. Pour ce faire, on ancre des tirants constitués de câbles d'acier multi-torons dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, et on applique en tête un effort de traction. Cet effort peut être réparti sur la surface du terrain par l'intermédiaire de plaques ou de petits massifs en béton armé. Dans de nombreux cas, les tirants sont combinés à un mur ou à des longrines. (Sekkak M.,2014)



Figure I.34 - Renforcement par ancrage. (Cartier G.,1986)

I.5.4.1.e. Le renforcement par clouage

Le clouage des pentes consiste à goujonner les masses instables sur le substratum fixe en répartissant in situ des groupes de pieux verticaux ou des inclusions perpendiculaires à la surface de glissement. Cette méthode connaît actuellement un certain essor pour les cas où les méthodes classiques de stabilisation par drainage ou terrassement ne sont pas applicables. L'efficacité de la technique s'appuie, d'une part, sur le transfert des efforts de glissement vers le substratum au droit des points durs constitués par les clous et, d'autre part, sur un renforcement global de la masse déformable par effet de voûte et effet de groupe dû à la densité de clous. (Cartier G.,1986)

I.5.4.2. Amélioration thermique et chimique des sols

Ces techniques consistent principalement à changer les paramètres essentiels du sol en fonction des conditions du site sensible au risque de glissement après avoir analysé et diagnostiqué le terrain concerné. On peut distinguer quelques techniques pour le confortement des glissements :

I.5.4.2.a. Cuisson

La cuisson est depuis quelques millénaires utilisée pour faire des céramiques. Il est donc normal que l'on ait pensé à cette méthode pour améliorer les caractéristiques de certains sols. Cuire ou chauffer modérément sont deux choses tout à fait différentes. Seuls des essais de laboratoire systématiques peuvent préciser la limite de ces procédés effectués sur des échantillons saturés et non saturés. (Fahsi M.,2013)

I.5.4.2.b. Consolidation électro-osmose

Cette technique a été découverte par « Veder, 1968 ». Si on fait passer un courant électrique continu entre deux électrodes séparées par une paroi poreuse de longueur l et de section S , il s'écoule un débit. Si on réalise une telle expérience on constate que le débit initial décroît progressivement pour presque s'annuler à la longue. On constate en outre que cette simple électro-osmose fait durcir le sol entre la barrière et la cathode.

I.5.4.2.c. Consolidation électro chimique

La consolidation électrochimique consiste à introduire des ions convenables à l'anode pour que la barrière se rapproche le plus possible d'elle et ainsi le volume de la zone durcie augmente. Initialement la consolidation se faisait en utilisant des anodes en aluminium. Mais les anodes métalliques ont un très grave défaut. Le sol se dessèche autour de l'anode et se décolle d'elle : il en résulte une forte augmentation des résistances électriques de contact. (Fahsi M.,2013)

I.5.4.3. Confortement par ouvrages de soutènement

Les ouvrages de soutènement comprenant tous les types de murs et de systèmes d'appui dans lesquels des éléments de structure subissent des forces imposées par le matériau soutenu. Ils peuvent être classés de plusieurs façons d'où, on peut distinguer quatre principales façons décrites et illustrées dans le schéma de la figure suivante :

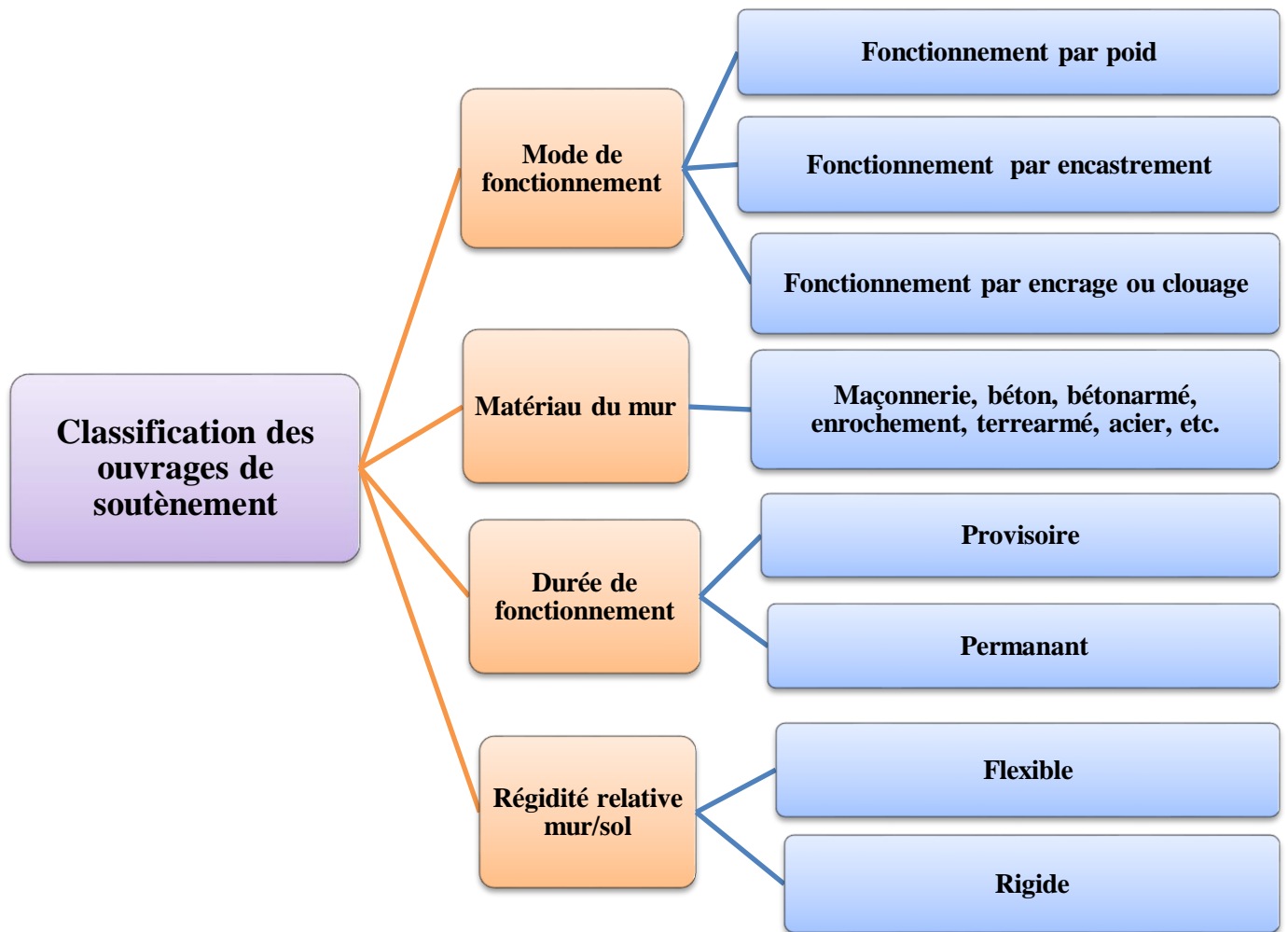


Figure I.35 - Classification des ouvrages de soutènement.(Fahsi M.,2013)

L'intersection de ces classifications se divise en deux grandes familles :

➤ **Ouvrage à structure apparente:**

- Murs poids en maçonnerie de pierres sèches.
- Murs poids en maçonnerie jointoyée.
- Murs poids en béton.
- Murs poids en gabions.
- Murs poids en éléments préfabriqués en béton empilés.
- Murs en béton armé encastres sur semelle

➤ **Ouvrage à structure enterré :**

- Rideaux de palplanches métalliques.
- Parois moulées ou préfabriquées.
- Parois composites.
- Terre armée.
- Murs en remblai renforcé par des éléments géo-synthétiques.
- Voiles ou poutres ancrés.
- Ouvrages divers.

I.5.4.4. Technique de surveillance :

L'objectif principal du système de surveillance est de fournir des informations sur l'évolution du phénomène de façon à pouvoir prendre les mesures nécessaires : on redoute soit l'accélération plus ou moins brutale du phénomène (la rupture), pouvant mettre en danger des vies humaines, soit le dépassement du seuil de déformation admissible sur un ouvrage. Les dispositions incluses dans une surveillance comprennent donc essentiellement un contrôle (visuel ou par des instruments de mesure) de l'évolution, auquel succèdent un dépouillement et une interprétation qui amènent éventuellement à prendre des dispositions de sécurité. (Aissa M. H.,2011)

I.5.5. Conclusion

Les moyens mis en œuvre actuellement pour améliorer la stabilité des pentes reposent sur plusieurs techniques. Le choix à adopter sur terrain doit satisfaire plusieurs critères, à savoir : la maîtrise des techniques employées, l'existence localement des moyens de confortement et le critère économique. L'ingénieur doit trouver la solution optimale pour satisfaire en même temps les exigences techniques et les contraintes économiques.

Chapitre II

Présentation Du Cas D'étude

II.1. Introduction

L'autoroute est-ouest est un projet autoroutier traversant toute l'Algérie parallèlement aux côtes méditerranéennes. L'autoroute doit relier la frontière tunisienne près de la ville d'El Kala à la frontière marocaine près de celle de Maghnia en passant près des grandes villes algériennes du nord tel que Annaba, Skikda, Constantine, Setif, Alger, Chlef, Oran et Tlemcen, sur une distance de 1216 km (1 720 km en comptant les routes annexes et les bretelles).



Figure II.1 - L'autoroute Est-Ouest et la principale agglomération.

II.2. Rapport du traitement du glissement

II.2.1. Situation fondamentale

La plate-forme du côté droit de la section PK402+080 a été exécutée en déblai avec une pente originale de 1:2.5 de trois niveaux. COJAAL a effectué une excavation de 4-6m au-dessous du terrain naturel, et pour l'instant, CITIC s'engage dans l'excavation de 1-2m par rapport à la surface de chaussée. Au cours d'excavation de premier niveau du talus en avril 2018, le suintement de talus à petite échelle a été découvert, et puis lors de la reconnaissance du terrain en juillet 2018, on a décelé dans le bord arrière du talus de troisième niveau une longue fissure avec largeur de 20 à 70 cm, ainsi que le dénivèlement de 20 à 50 cm. Comme la fissure montre

le signe précis de glissement, on peut estimer l'existence du glissement sur site.

Pour vérifier la situation d'eau souterraine, on a excavé une fouille de prospection au pied de talus et à la plate - forme du premier niveau du talus, une grande quantité d'eau souterraine est détectée au terrain. La photo sur site est la suivante :

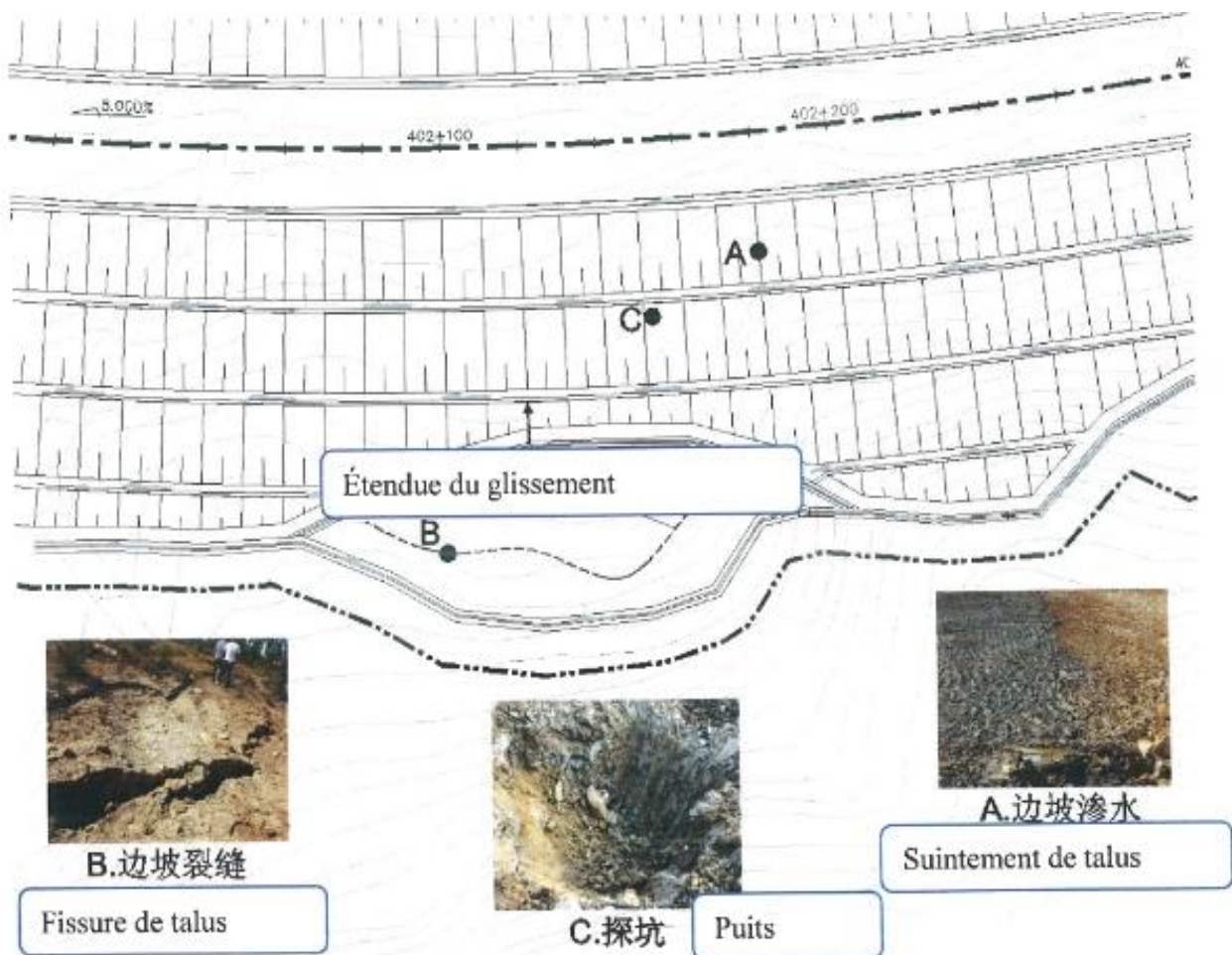


Figure II.2 - Plan de situation du glissement

II.2.2. Situation géographique du site :

Le site de glissement est situé à Keboud à la commune de Ben M'hidi – El Taref .

➤ Les coordonnées du site de travail sont :

- 36° 43'' 58.6'' Nord
- 8° 00' 54.7'' Est



Figure II.3 - Localisation de chantier (Google Maps)



Figure II.4 - Localisation de la zone de glissement (google Maps)

II.2.3. Etat actuel du glissement

La surface de glissement entre la masse glissée et le talus est assez évidente. L'épaisseur de la plupart de la masse glissée est estimée de presque 10m en fonction de la forme de terrain glissée et la répartition de strate non glissée. Voici les photos prises sur site : **Figure II.5** et **Figure II.6**.



Figure II.5 – Etat actuel du glissement de talus



Figure II.6 – Etat actuel du glissement

II.2.4. Cause du glissement et l'analyse de stabilité :

II.2.4.1. Cause du glissement :

Selon l'analyse du développement de la fissure de talus sur site, les principales causes du Glissement sont les suivantes :

- Le stratum original est en argilite et marne épaisses ; à cause de leurs médiocres nature le Fossé à crête n'est pas encore fini ;
- Dans la saison pluviale, les pluies s'accumulent dans la sortie du fossé à crête déjà exécutée, ce qui engendre l'affouillement du talus.
- La masse d'argilite se gonfle dans la rencontre de l'eau, se rétrécit avec la perte d'eau, se décompose en argile en Conséquence.
- Avec la résistance diminuant, une déformation glissante du fluage au niveau de la couche faible est apparue.

II.2.4.2. Analyse de la stabilité du glissement

❖ Référence de base :

- Eurocode 7
- Eurocode 8

❖ Logiciel utilisé

- Talren4V2.0.2.

❖ Bishop

Pour le talus en terre et talus à la rupture de roche, la surface de la rupture est en forme d'arc, on adopte la méthode de Bishop.

❖ Coefficient de sécurité

Selon les référence de base, Trois (03) cas seront prise en compte lors de calcul :

- Stabilité à court terme (en chantier), effet sismique non prise en compte :
 $F_{min} \geq 1.25$
- Stabilité à long teme (en exploitation), effet non sismique prise en compte :
 $F_{min} \geq 1.4$

II.2.5. Caractéristique du sol de glissement :

Les paramètres de calcul d'étude recommande sont présentés ces dessus :

N° de couche	Nom géotechnique	γ (g/cm ³)	C (Kpa)	Φ (°)
①	Argilite	2.11	19.3	18
②	Marne	2.03	11.06	20

Tableau II.1 - paramètre de calcul d'étude recommandée

La protection dans cette section sera effectuée avec le sol ordinaire, avec les paramètres mécaniques dans le calcul : poids volumique $\gamma = 21\text{KN/m}^3$, cohésion $C = 19.3\text{KPa}$, angle de frottement interne $\varphi = 18\%$

II.2.6. Evaluation de la stabilité du talus :

Il est choisi le profile PK402+140 comme la section représentative le calcul de stabilité de talus.

Selon le calcul, pendant l'exécution de la substitution, le coefficient de stabilité et de sécurité à court terme (en phase d'exécution) est de $1.34 \geq 1.25$ (sans prise en compte de l'effet sismique) ; après l'exécution de la substitution, le coefficient de sécurité à long terme (en phase d'exploitation) est de $1.9 \geq 1.4$ (sans prise en compte l'effet sismique).

II.7. Précaution de l'exécution :

- 1) Lors de la protection, les mesures provisoires de drainage doivent être disposées.
- 2) Exécuter immédiatement le remblaiement avec des graviers et le sol après l'excavation du talus afin de diminuer les heures d'exposition du corps de talus.
- 3) Il faut vérifier les résultats de reconnaissances pendant les travaux et modifier l'étude selon la situation géologique réelle n'est pas cohérente avec les résultats des reconnaissances.
- 4) Il faut mieux exécuter la substitution pendant la saison sèche. La zone de traitement va être séparée en deux parties pour l'exécution.
- 5) Durant l'exécution des travaux, les redans doivent se réaliser du haut en bas. Il est strictement interdit d'excaver verticalement et il faut éviter une excavation d'un seul coup.
- 6) Tous types d'anomalie constatée sur chantier doit être communiquée au **bureau d'étude immédiatement.**

Chapitre III

Méthodes de calculs

III.1. Introduction :

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets géotechniques de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques. La méthode des éléments finis (MEF) est devenue actuellement la plus performante des méthodes numériques vues son grand champ d'application, où elle est utilisée dans de nombreux cas du domaine de la géotechnique.

III.2. Le choix de la technique de confortement :

L'étude géotechnique et la configuration des terrains nous permettent de choisir la solution convenable et le type de confortement à adopter. Cette solution doit tenir compte de la faisabilité des travaux liée à l'investissement consenti, l'accessibilité de site, la période de l'année choisie pour l'exécution des travaux, la cinématique du glissement, et les moyens en matériels et la technicité des entreprises locales.

Le choix de la technique de la stabilisation devra être le fruit d'un compromis entre trois aspects qui sont :

- ❖ L'analyse des paramètres techniques de site,
- ❖ La connaissance des techniques de stabilisation,
- ❖ Les impératifs technico-économique.

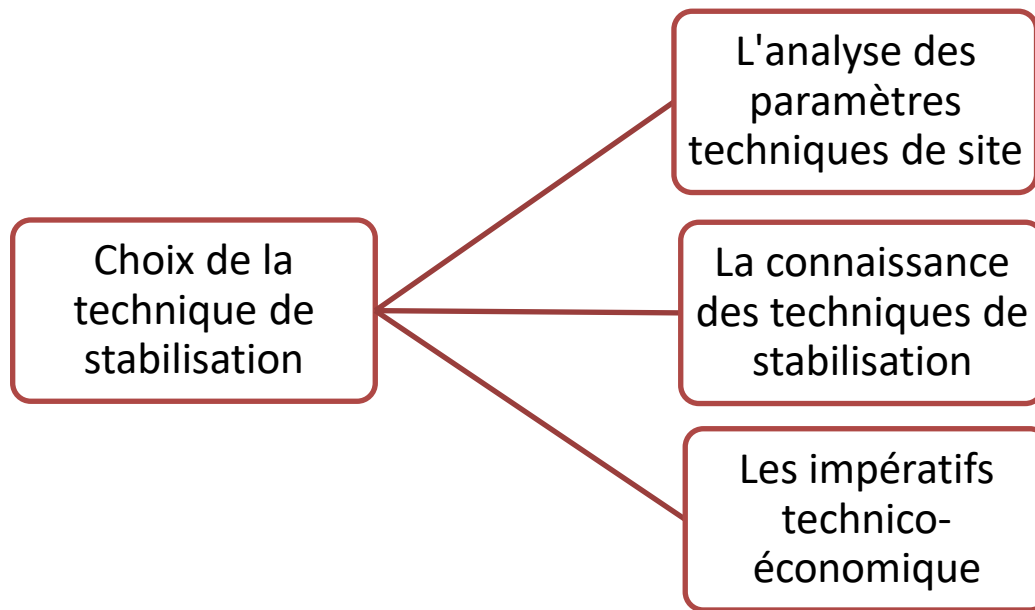


Figure III.1 – Organigramme des choix technique de stabilisation

III.3. Calcul de la stabilité par logiciel

L'ingénieur choisit l'outil de calcul qui lui paraît adapté ; il opère seul la modélisation de l'objet réel (processus de réduction d'un objet réel à un objet virtuel simple) ; il décide seul de prendre en compte le résultat obtenu sur l'objet virtuel simple pour définir le comportement de l'objet réel.

III.3.1. Présentation de logiciel SLIDE

Slide est un programme 2D qui permet de faire une analyse de stabilité des talus en deux dimensions, par la méthode de l'équilibre limite, pour des surfaces circulaires ou non circulaires dans les roches et dans les sols. Les approches déterministe (calcul du facteur ou coefficient de sécurité) ou probabiliste (détermination de la probabilité de rupture) peuvent y être développée.

Slide est le seul logiciel de stabilité des pentes avec l'analyse de la stabilité des pentes par la méthode des éléments finis.

Les données nécessaires à saisir et les résultats livrés par le logiciel sont résumés dans le tableau suivant :

Donnée fournies au logiciel	Donnée livrés au logiciel
<ul style="list-style-type: none"> - La méthode de calcul. - Les paramètres géotechniques de chaque couche : <ul style="list-style-type: none"> • La masse volumique γ (KN/m³), • La cohésion C (KN/m²), • L'angle de frottement ϕ (°) . - Les surcharges si nécessaires. - Géométries du talus. - La grille du centre de rupture. - Le niveau de la nappe phréatique. - Le type de confortement et ce après l'analyse de stabilité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le Facteur de sécurité avant et après confortement. - Les cercles de rupture. - Les sollicitations sur les tranches. - La résistance au cisaillement au fonction de la longueur de talus.

Tableau III.1 – Les données fournies à logiciel et les résultats

III.3.2. Paramètres du projet

La boîte de dialogue Paramètres du projet est utilisé pour configurer les principaux paramètres d'analyse pour votre modèle, comme les unités de mesure, les méthodes d'analyse de stabilité et des eaux souterraines...etc. Les Paramètres du projet sont organisés en plusieurs pages qui sont accessibles en sélectionnant le nom de la page dans la liste à gauche de la fenêtre (par exemple general, methodes, Groundwater, etc.) Sur la page Général, assurez-vous que l'option unités. Cela détermine les unités de longueur, le temps et l'unité de perméabilité qui utilisées dans les analyses.



Analysis → **Project settings**

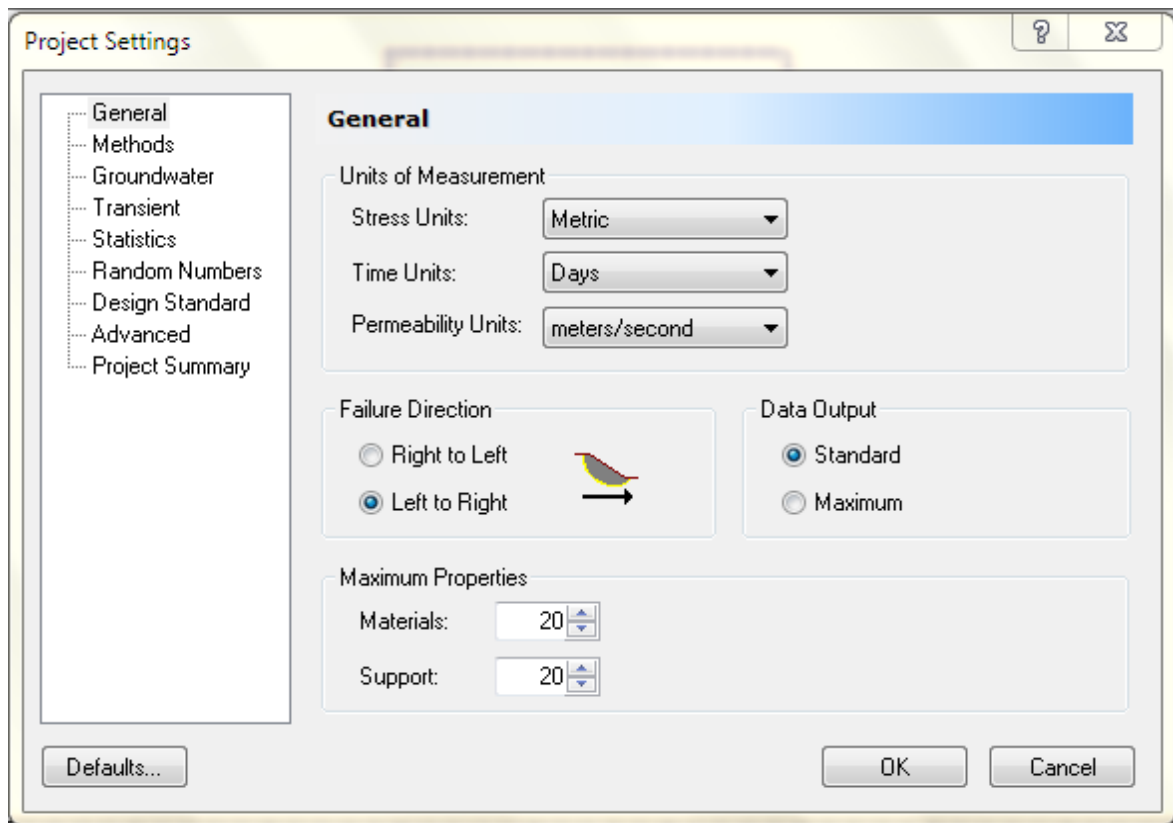
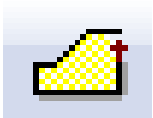


Figure III.2 - Boîte de dialogue du paramètres du projet «Project Settings ».

III.3.3. Discrétisation géométrique



Entering Boundries

La première limite qui doit être définie pour chaque modèle de Slide est la frontière externe. La frontière externe dans la Slide est une poly ligne fermée englobant la région du sol que vous souhaitez analyser. En général:

- Les segments supérieurs de la frontière externe représentent la surface de la pente que vous analysez.
- La gauche, à droite et à des degrés inférieurs de la frontière externe sont arbitraires et peuvent être étendues aussi loin que l'utilisateur juge nécessaires à une analyse complète du problème.

Pour ajouter la frontière externe, sélectionnez Ajouter des limites externes de la barre d'outils ou le menu de délimitation.



Boundaries → Add External Boundary

Entrez les coordonnées suivantes dans la ligne de commande en bas à droite de l'écran. Lorsque vous entrez les coordonnées, notez que les limites d'affichage sont automatiquement mis à jour pour inclure les coordonnées que vous entrez.



Propreties → Define Materiel

après avoir conçu le modèle à assigner aux matériaux rocheux leurs caractéristiques physico-mécaniques (la cohésion, l'angle de frottement interne et le poids volumique).

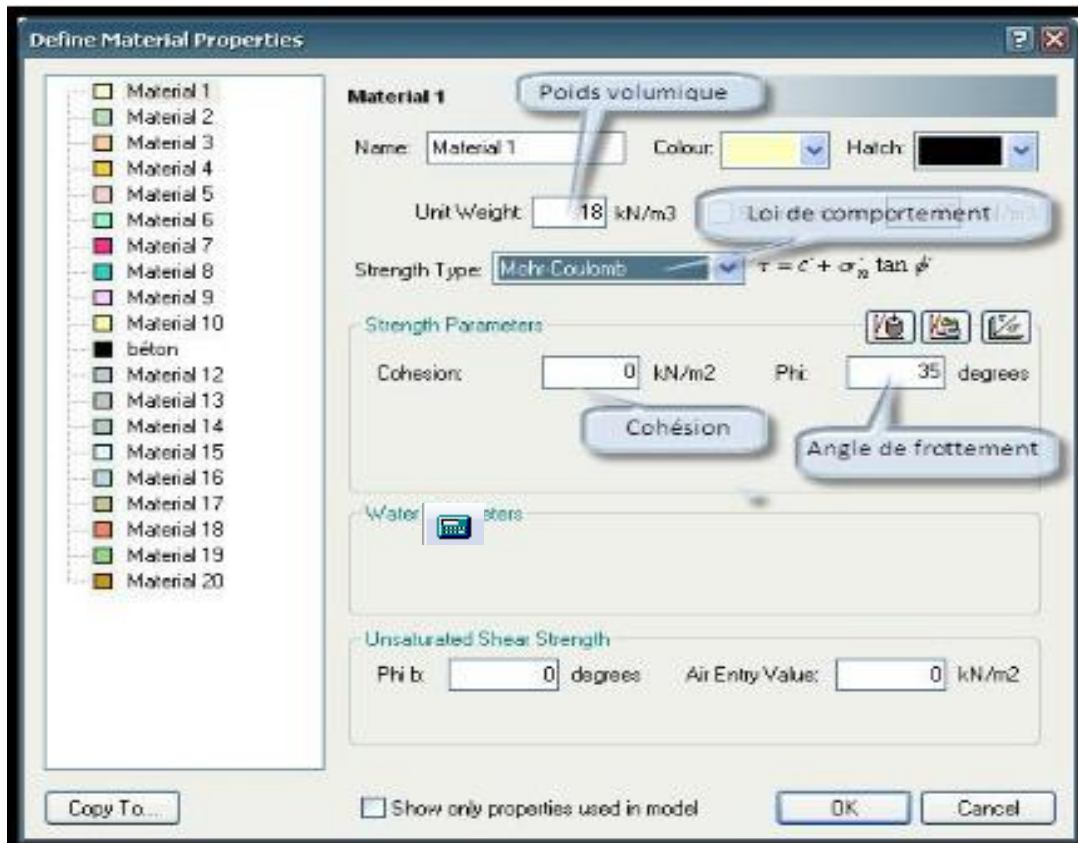



Figure III.3 – Fenêtre de dialogue des propriétés des couches de sols

III.3.4. Exécution les analyses de talus

Lorsque toutes les conditions aux limites et les propriétés des matériaux ont été définies, alors nous sommes prêts à exécuter l'analyse de la stabilité de talus.

Le moteur de l'analyse de la stabilité dans Slide est un programme distinct du moteur d'analyse de la stabilité des pentes.

➤ Pour exécuter l'analyse:

Sélectionnant l'option **Compute**  dans le menu de l'analyse ou de la barre d'outils. Cela va faire tourner le moteur d'analyse des talus.

III.3.5. Interprétation des résultats

Les résultats d'analyse de la stabilité des pentes (**surfaces de glissement, des facteurs de sécurité, etc.**) sont entièrement intégrés dans la Slide programme interpréter.

Pour exécuter le programme interpréter, sélectionnant l'option **Interpréter** dans le menu de l'analyse ou de la barre d'outils, après avoir calculé l'analyse de la stabilité avec l'option **Compute**.



III.3.6. Les méthodes d'analyse

Avant de lancer l'analyse, nous allons examiner les méthodes d'analyse qui sont disponibles dans la Slide.



Analysis → **Project settings**

Sélectionnant sur la page Méthodes dans la boîte de dialogue Paramètres du projet.

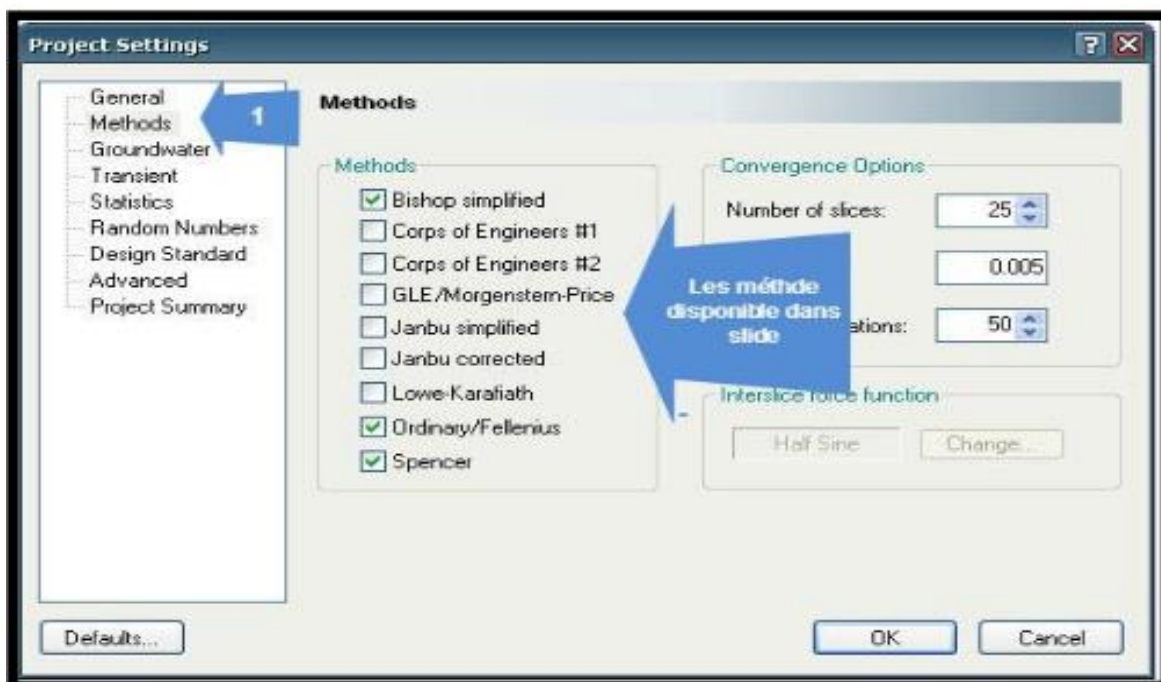
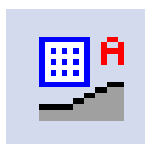


Figure III.4 -Méthodes d'analyse dans les paramètres du projet.

III.3.7. Surfaces de glissement

Slide peut analyser la stabilité de surface du glissement soit circulaire ou non circulaire. Les Surfaces individuelles peuvent être analysées, ou la recherche de surface critique peut être effectuée, pour tenter de trouver la surface de glissement avec le facteur le plus bas de la sécurité.

Grilles des centres de glissement peuvent être définis par l'utilisateur (Add Grid)) ou automatiquement créé par Slide (Auto Grid).



Surfaces → Auto Grid

Nous allons utiliser le numéro de l'espacement de surface de glissement par défaut d'intervalles (20 x 20), donc il suffit de sélectionner OK, et la grille sera créée.

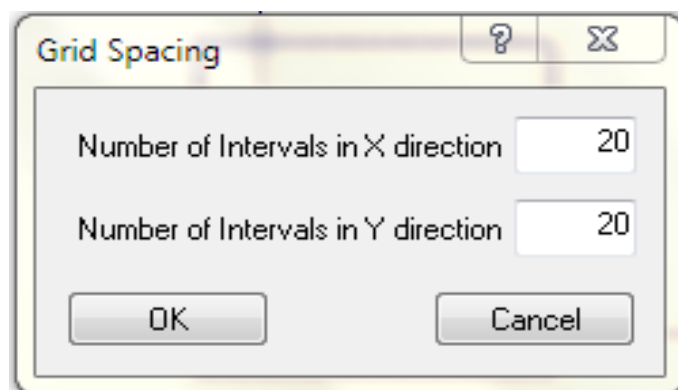


Figure III.5 - Grille de dialogue Espacement.

III.4. Conclusion

La modélisation numérique d'un ouvrage géotechnique, réalisée à l'aide d'un code de calcul aux éléments finis, est une approche simplifiée de la réalité géométrique et géomécanique de l'ouvrage.

Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé : soutènement, Tassement de remblai, fondation sur sol en pente, tunnel : quel modèle de comportement utilisé pour quel problème géotechnique.

Chapitre VI

Modélisation numérique du cas étudié

VI.1. Introduction

L'objectif de la modélisation « au sens large » en géotechnique est souvent la recherche d'une réponse, d'une solution à un problème particulier et complexe. La modélisation numérique est un outil puissant, elle est en constante progression depuis les années cinquante. Aujourd'hui, la modélisation intervient dans tous les domaines sans exception.

Les résultats des essais in-situ et de laboratoire ont permis de définir le profil géologique du terrain étudié (présentation des différentes couches et leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques). Dans ce chapitre on va étudier la stabilité du site déjà présenté en chapitre précédant, en utilisant les différentes méthodes de calcul.

En ce qui concerne l'étude de glissement présentée dans ce mémoire, un logiciels de calcul a été utilisés, qui est basé sur la méthode des éléments finis appelé Slide.

VI.2. L'étude de la stabilité du site par utiliser logiciel Slide

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

- **Avant glissement** : représente l'état initial du talus, avant son glissement.
- **Après glissement** : représente l'état du talus après son glissement.
- **Renforcement du terrain naturel** : excavation de la masse éboulée et renforcement du terrain naturel.
- **Remblayage et finition du confortement** : finition des travaux et restauration de la route.
- **Application des surcharges** : application des surcharges routières sur le talus.

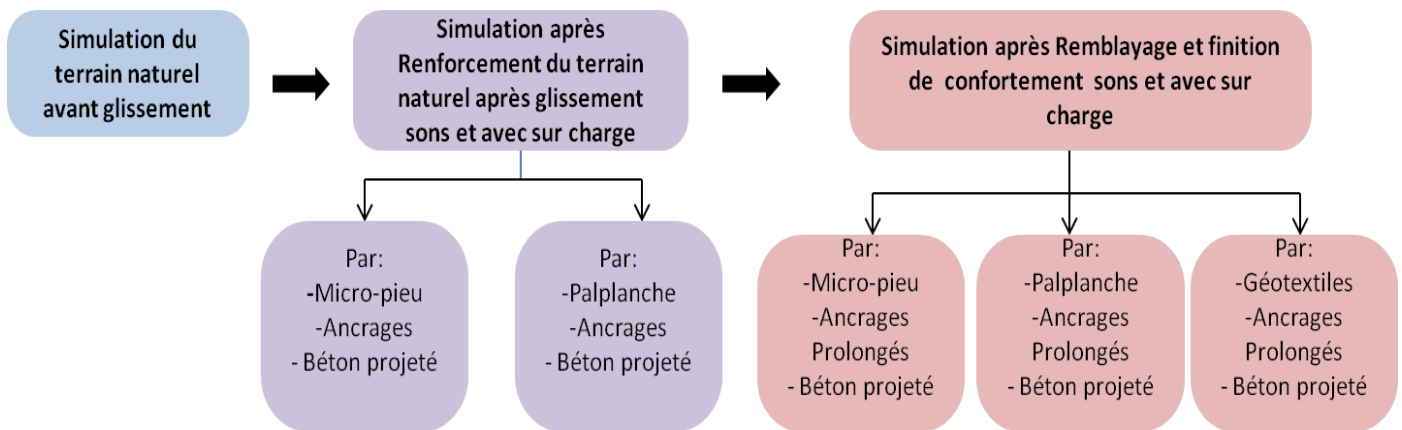


Figure VI.1 - la modélisation numérique du terrain

VI.3. Choix des paramètres

L'utilisation du logiciel Slide nécessite les différents paramètres des différentes couches de sol constituant le profil d'étude. Ces derniers sont déterminés par les essais de laboratoire et in situ, ces paramètres d'entrée sont :

- La masse volumique γ (KN/m³),
- La cohésion c (KN/m²),
- L'angle de frottement ϕ (°).

Le **tableau VI.1** présente les différentes caractéristiques pour chaque couche :



Couche de sol	Poids volumique	Cohésion	Angle de frottement	Couleur
Argilite	21.1	19.3	18	
Marne	20.3	11.6	20	

Tableau VI.1 – les caractéristiques des matériaux utilisées dans le modèle

VI.4. Début de modélisation

La figure VI-1 présente le profil le talus à étudier. Ce profil a été réalisé selon les différents essais effectués dans le site.

Le profil est formé de deux couches de caractéristiques différentes.

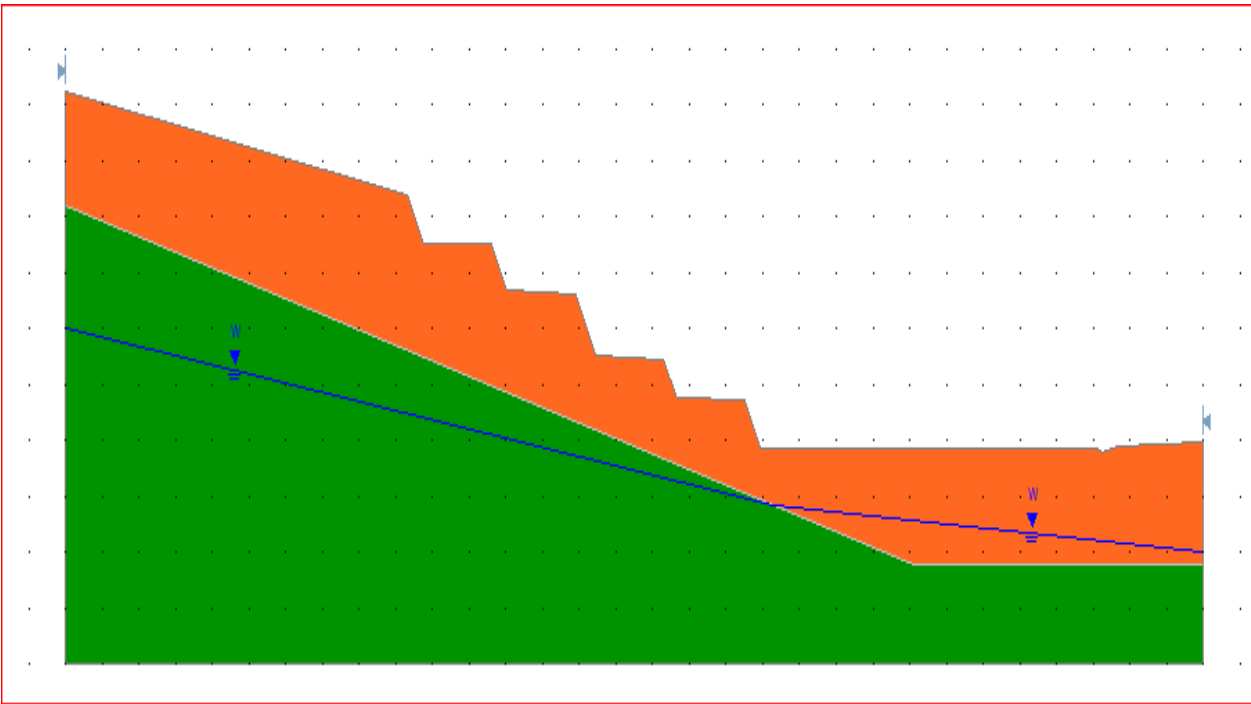


Figure VI.2 – Profil modélisé par logiciel Slide

Après que le profil a été tracé, les paramètres sont introduit, un calcul du facteur de sécurité est effectué avec différentes méthodes de calcul de stabilité, les valeurs du coefficient de sécurité **Fs** sont données dans les figures suivantes :

VI.4.1. Avant glissement

La figure VI.3 présente notre cas d'étude avant le glissement :

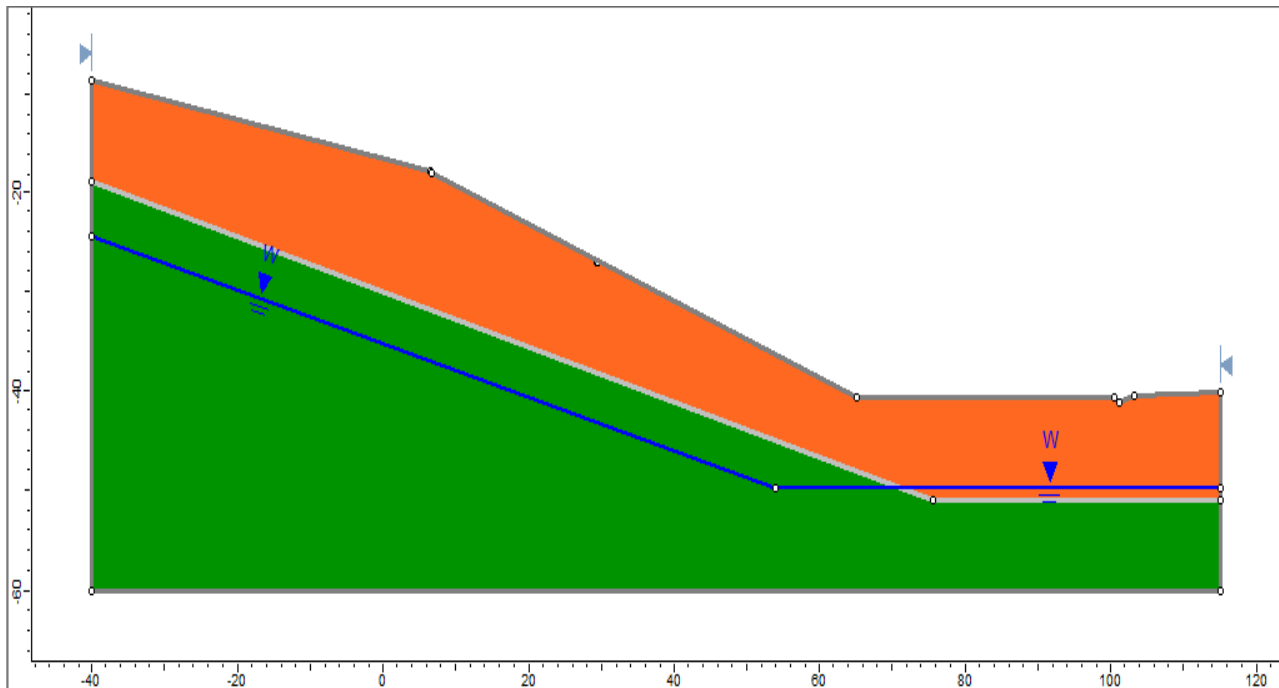


Figure VI.3 – Profile étudié avant le glissement

Ensuite, on a interpréter ce profile pour avoir les valeurs du coefficient de sécurité avec trois différentes méthodes :

- Fellenius,
- Bishop simplifié,
- Junbu simplifié.

❖ La méthode Fellenius

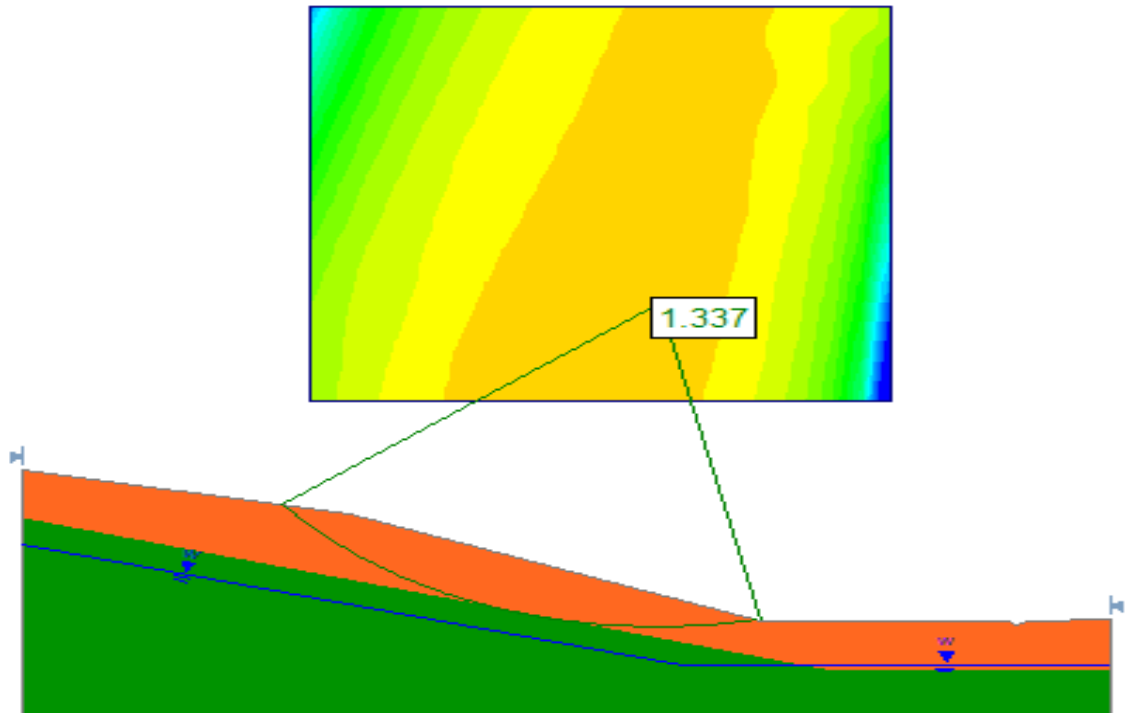


Figure VI.4 - Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Fellenius ($F_s=1.337$)

❖ La méthode de Bishop simplifié

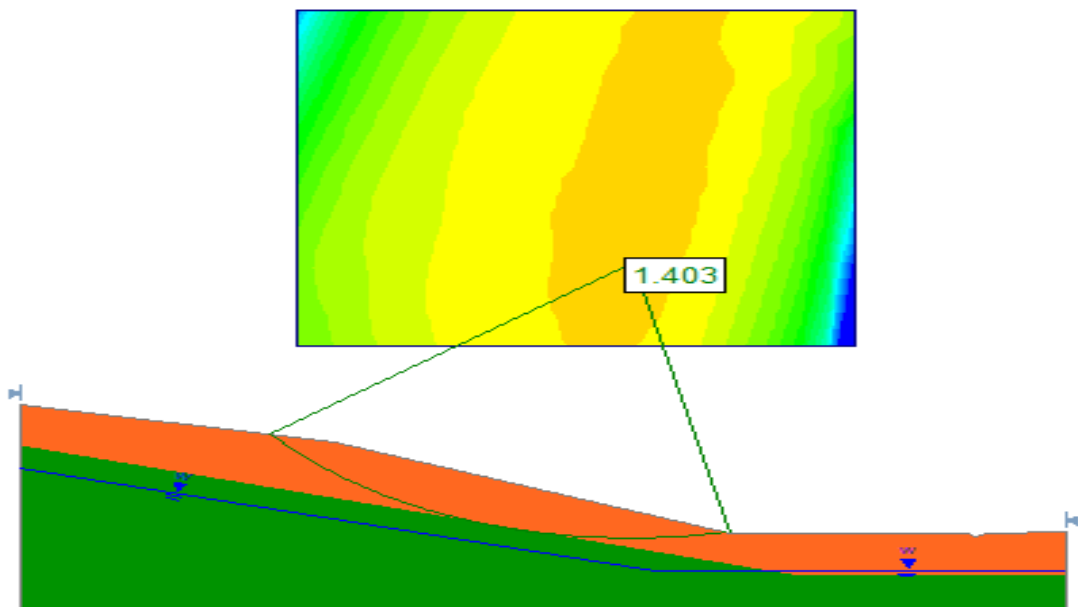


Figure VI.5 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Bishop.S
($F_s=1.403$)

❖ La méthode Junbu simplifié

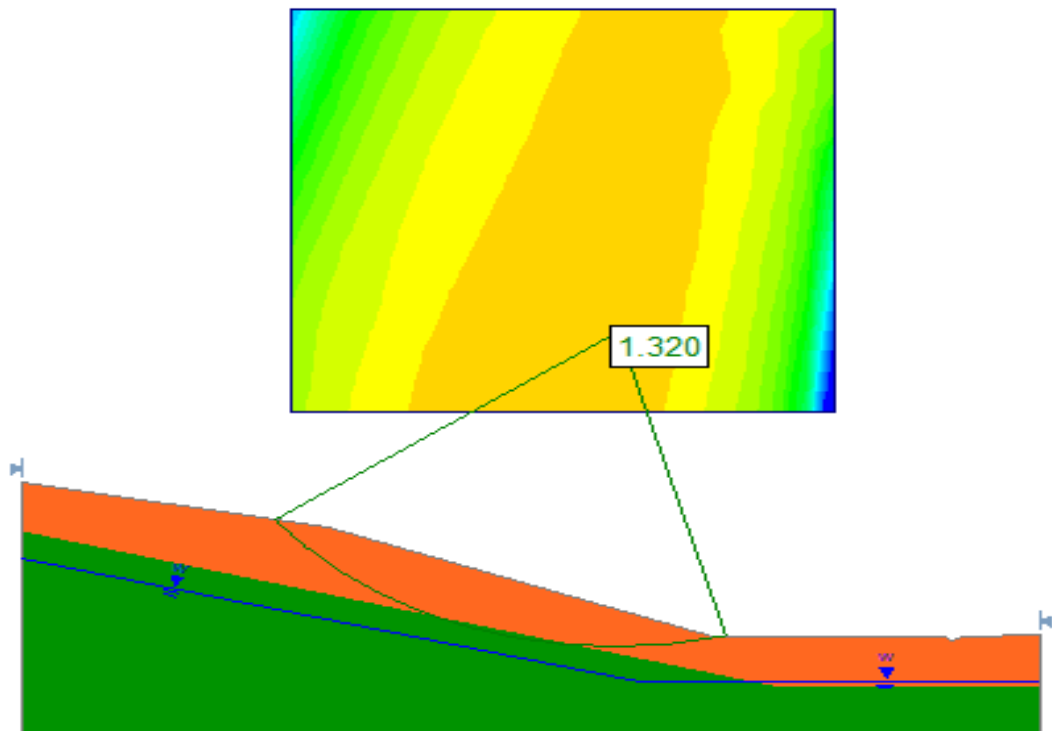


Figure VI.6 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Junbu.S (avant glissement, $F_s = 1.320$)

Le Tableau VI.2 résume les valeurs du coefficient de sécurité obtenues par chaque méthode :

Méthode de calcul	Coefficient de sécurité
Fellenius	1.337
Bishop Simplifier	1.403
Junbu Simplifier	1.320

Tableau VI.2 – Les valeurs des coefficients de sécurité avant le glissement

VI.4.2. Après le glissement

❖ La méthode Fellenius :

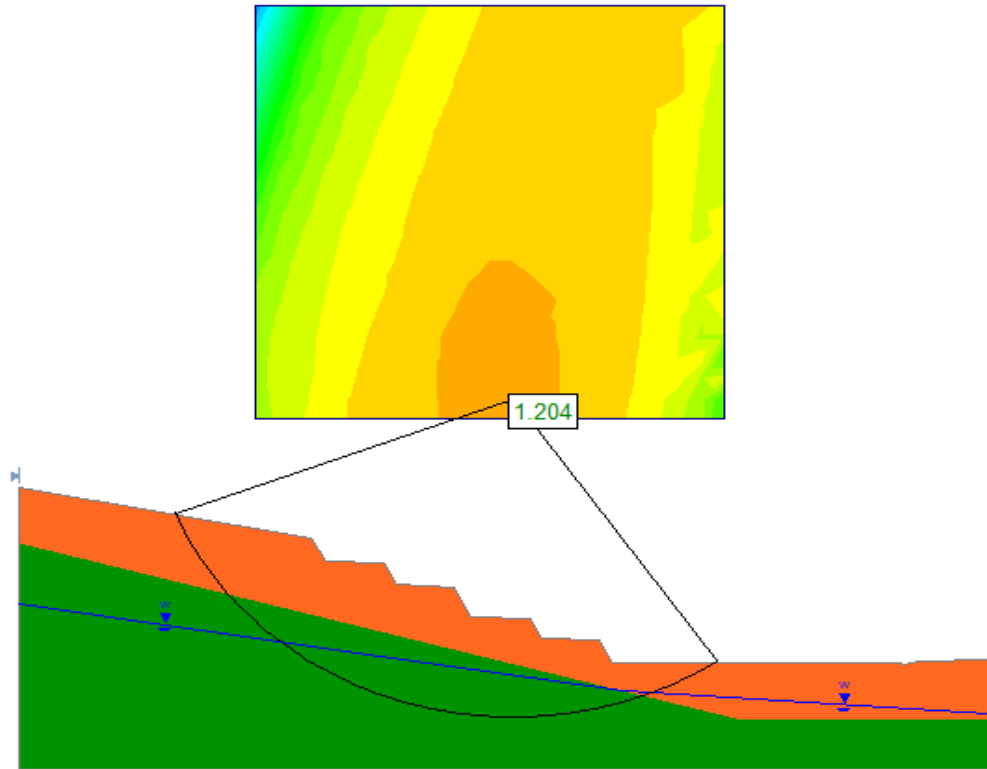


Figure VI.7 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Fellenius ($F_s=1.204$)

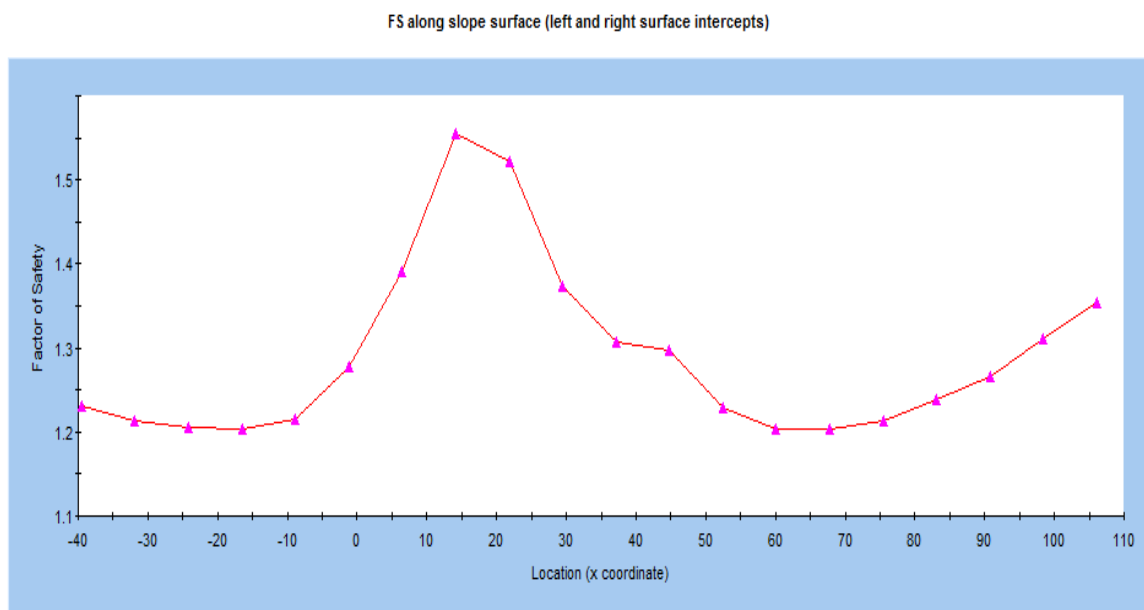


Figure VI.8 - Variation du coefficient de sécurité le long de la surface du talus par Fellenius

❖ La méthode de Bishop simplifié

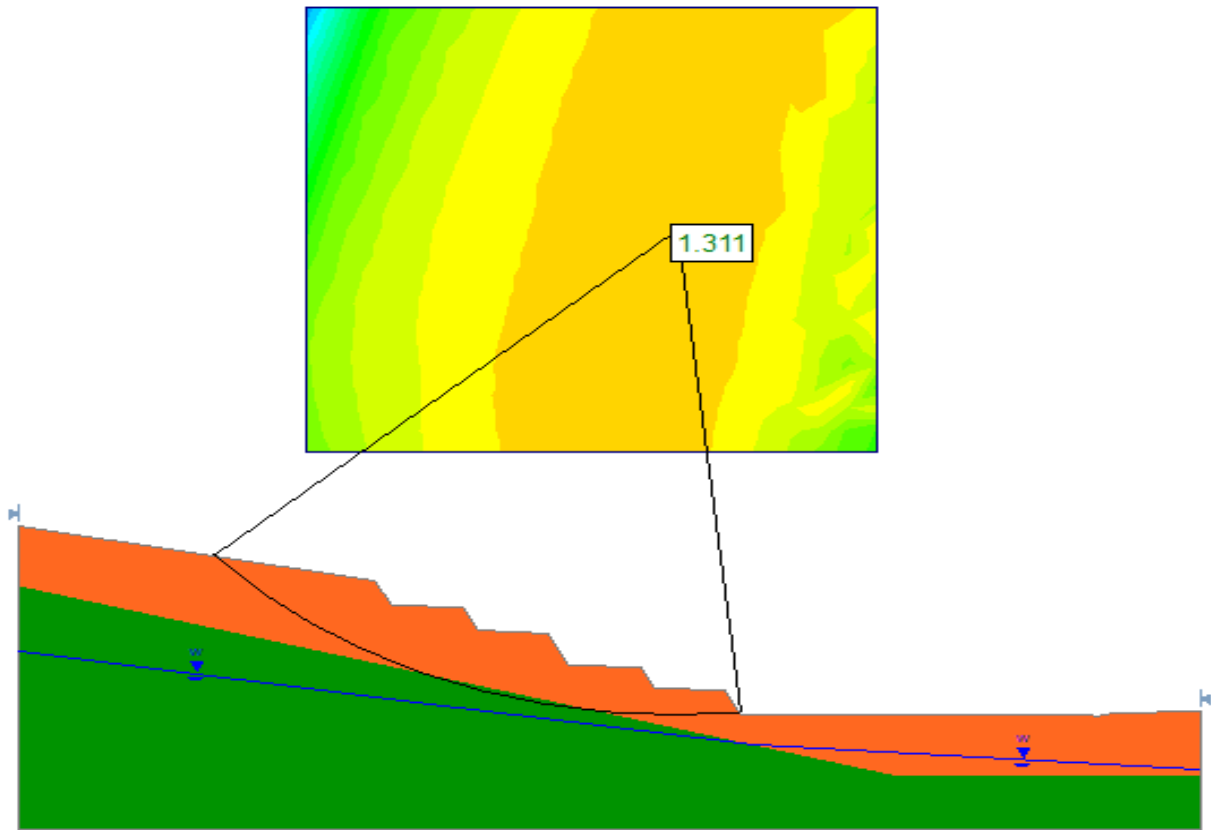


Figure VI.9 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Bishop.S ($F_s=1.311$)

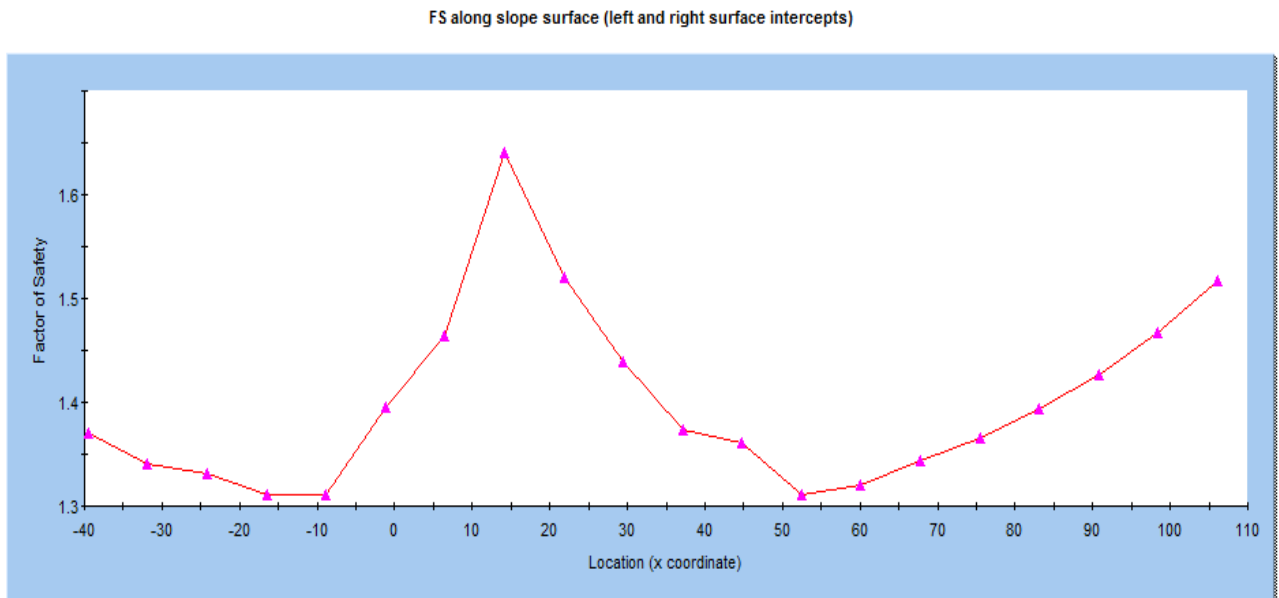


Figure VI.10 - Variation du coefficient de sécurité le long de la surface du talus par Bishop simplifié

❖ La méthode de Junbu Simplifié

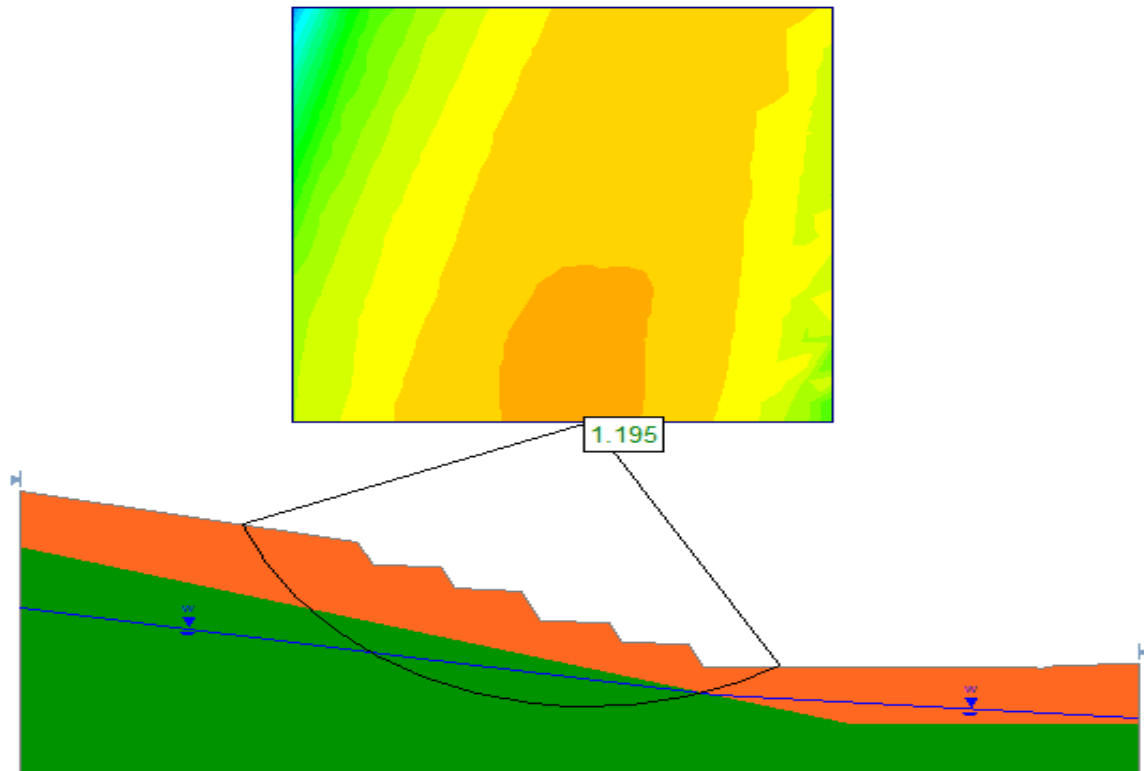


Figure VI.11 – Coefficient de sécurité obtenu de la méthode Junbu.S (après glissement $F_s=1.195$)

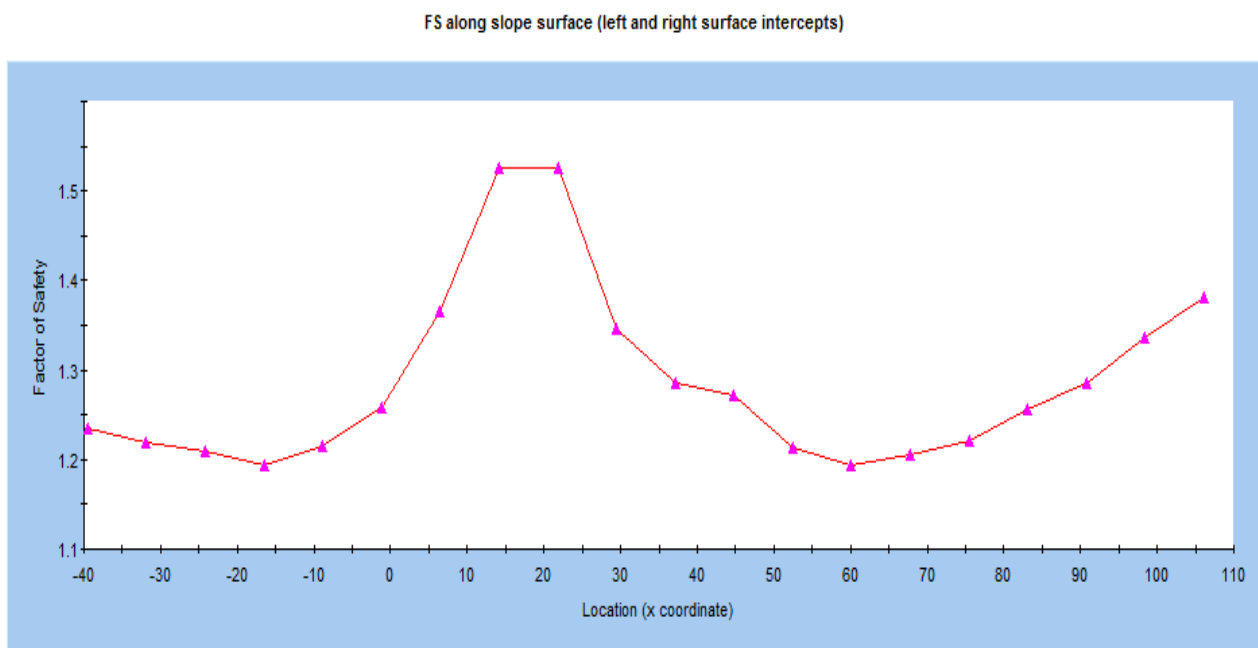


Figure VI.12 - Variation du coefficient de sécurité le long de la surface du talus par Junbu simplifié

- Une fois que le calcul du facteur de sécurité est effectué avec ces différentes méthodes de calcul de stabilité, les valeurs du coefficient de sécurité F_s sont données dans le **tableau VI.3** :

Méthode de calcul	Coefficient de sécurité
Fellenius	1.204
Bishop Simplifier	1.311
Junbu Simplifier	1.195

Tableau VI.3 - les Valeurs du coefficient de sécurité après le glissement

VI.4.3. Solution

VI.4.3.1. Première solution

Dans cette solution on a utilisé les micro pieux pour renforcer le talus, une installation vertical des deux micro-pieux de 6m au pied de talus.

- **Le model géométrique**

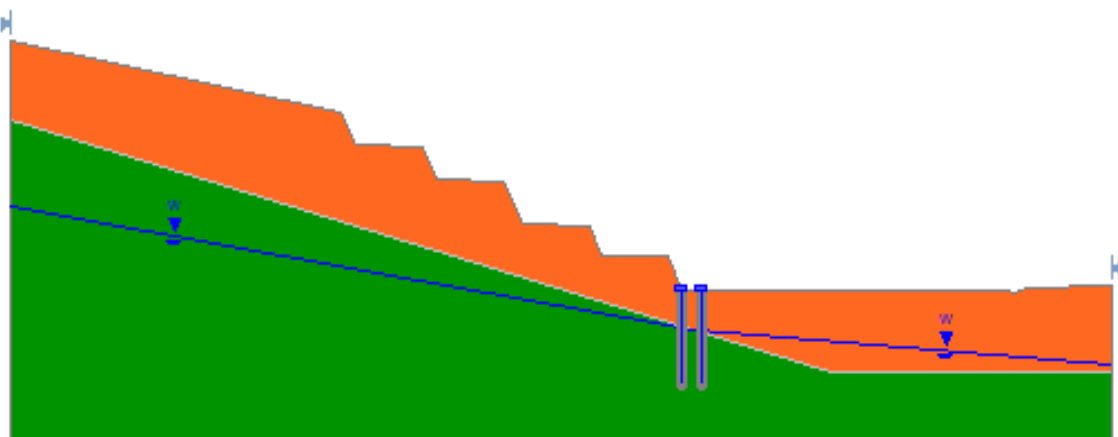


Figure VI.13 – Géométrie du modèle dans SLIDE ‘renforcement de terrain naturel’

- Le facteur de sécurité

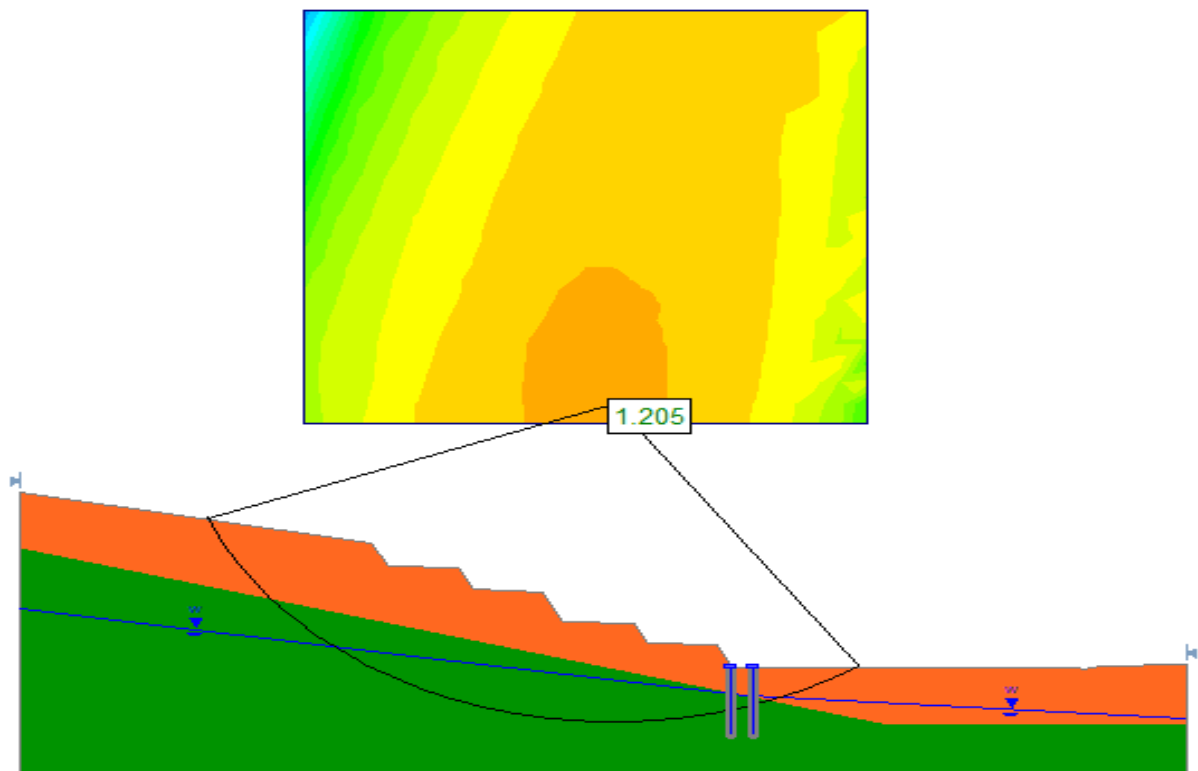


Figure VI.14 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius ($F_s=1.205$)

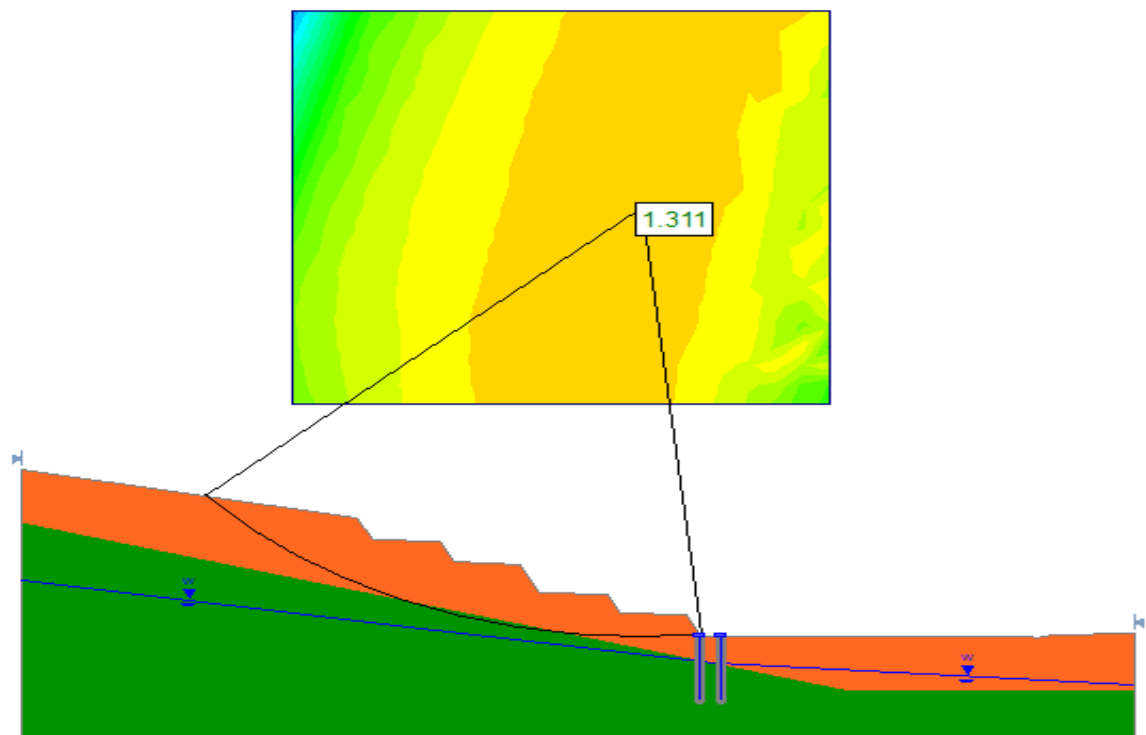


Figure VI.15 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Bishop.S ($F_s=1.311$)

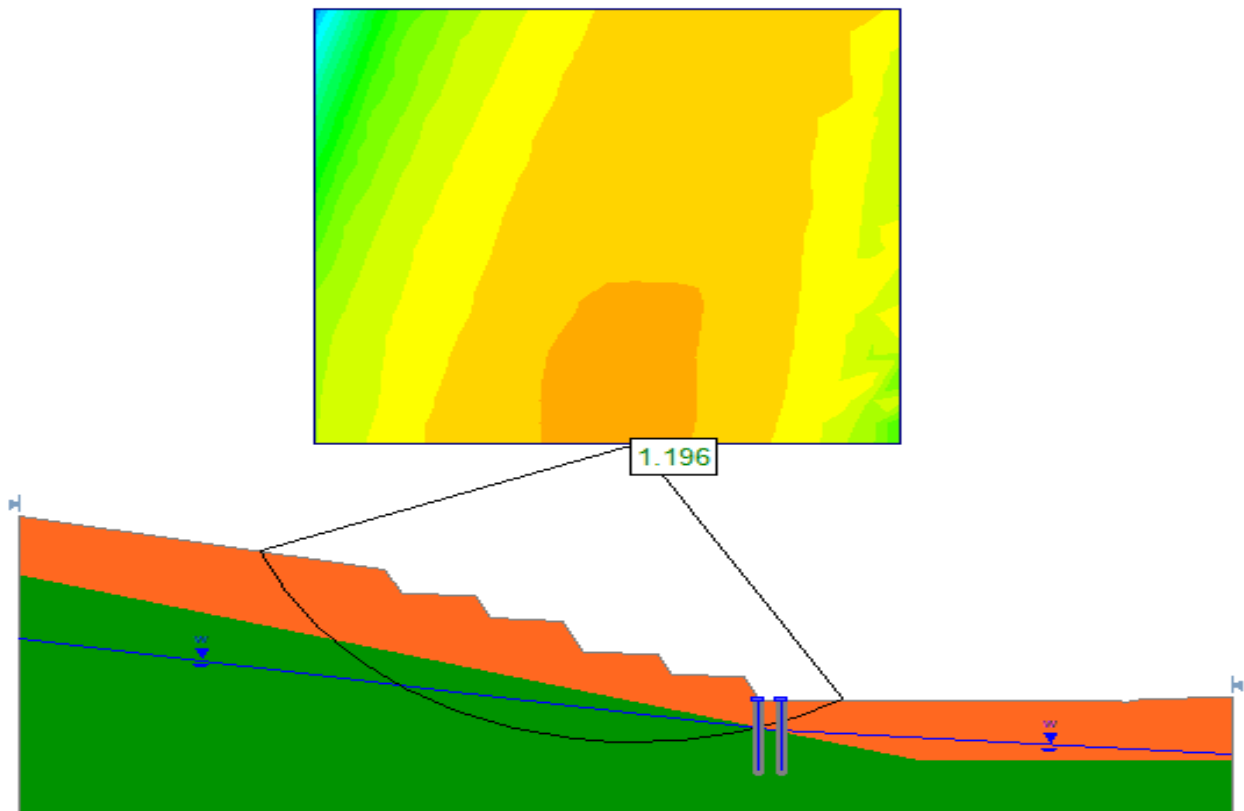


Figure VI.16 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode Junbu.S ($F_s=1.196$)

Les valeurs de facteur de sécurité obtenus après la renforcement par pieux sont résumé dans le tableau suivant :

Méthode de calcul	Coefficient de sécurité
Fellenius	1.204
Bishop Simplifier	1.311
Junbu Simplifier	1.195

Tableau VI.4 - les Valeurs du coefficient de sécurité au renforcement par pieux

Après la mise en place du micro-pieu, on a trouvé des $F_s < 1.5$.Ces valeurs montre que le talus n'est pas stable.

VI.4.3.2. Deuxième solution

Dans la deuxième solution, on a utilisé la buté (remblaiement). On supposant des coordonnées (X , Y) qui amènent à la stabilisation de se profile.

X	Y
6.588	-18.00
16.296	-18.767
45.500	-26.00
73.233	-33.336
74.163	-33.169
101.244	-41.110

Tableua VI.5 – Les coordonnées de buté entrer dans le logiciel SLIDE

- Le modèle géométrique

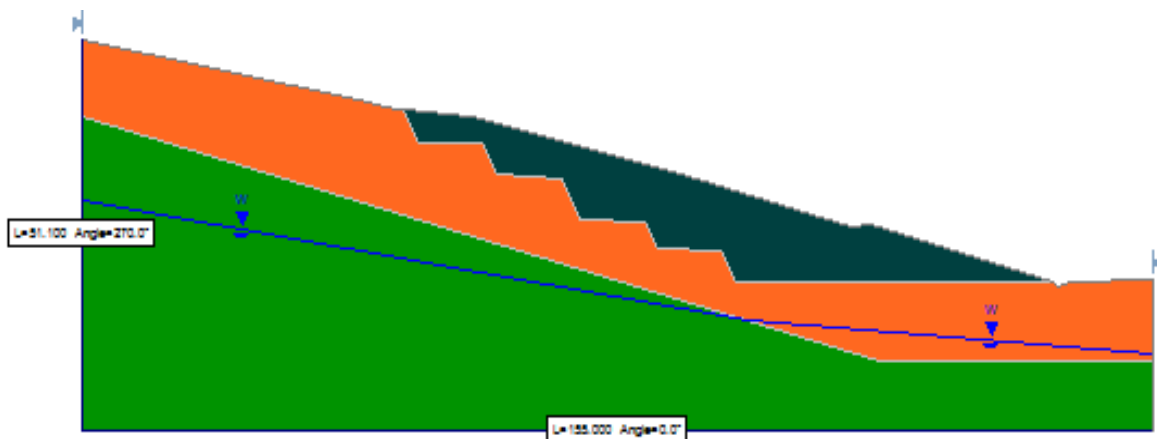


Figure VI.17 – Géométrie du modèle dans SLIDE ‘renforcement de terrain naturel’

- Le facteur de sécurité

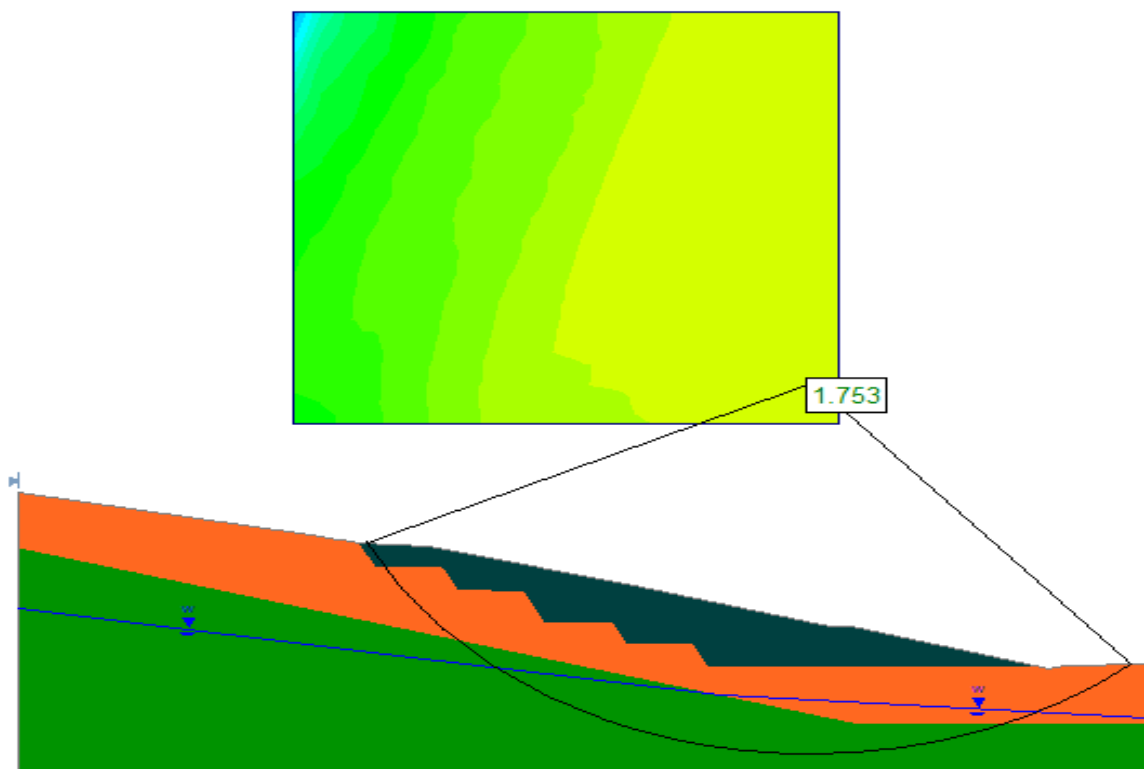


Figure VI.18 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius ($F_s=1.753$)

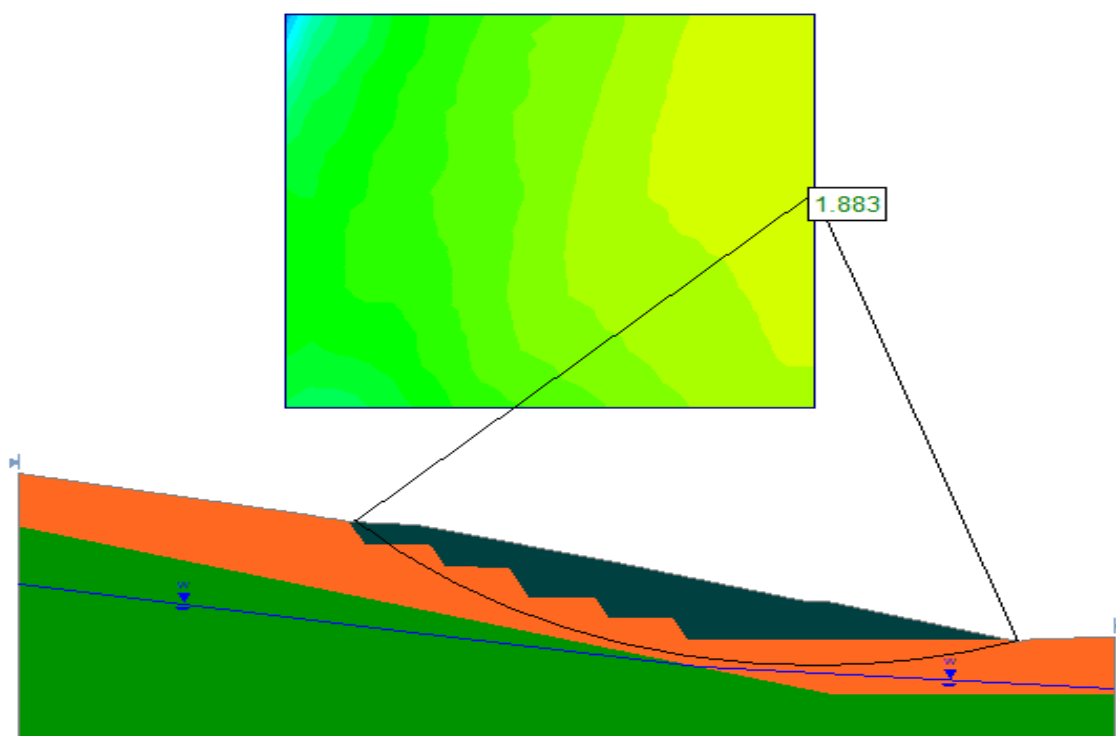


Figure VI.19 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Bishop.S ($F_s=1.883$)

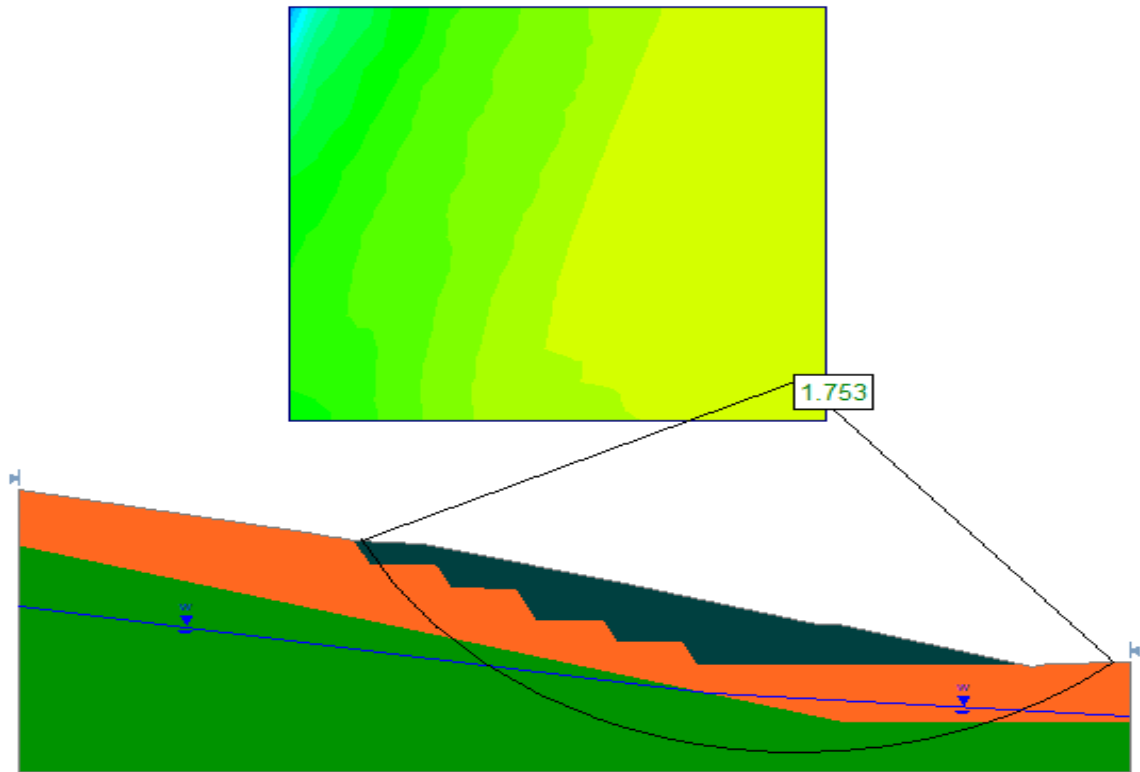


Figure VI.20 – Coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Junbu.S ($F_s=1.753$)

VI.4.3.3. Comparaison entre les deux solutions

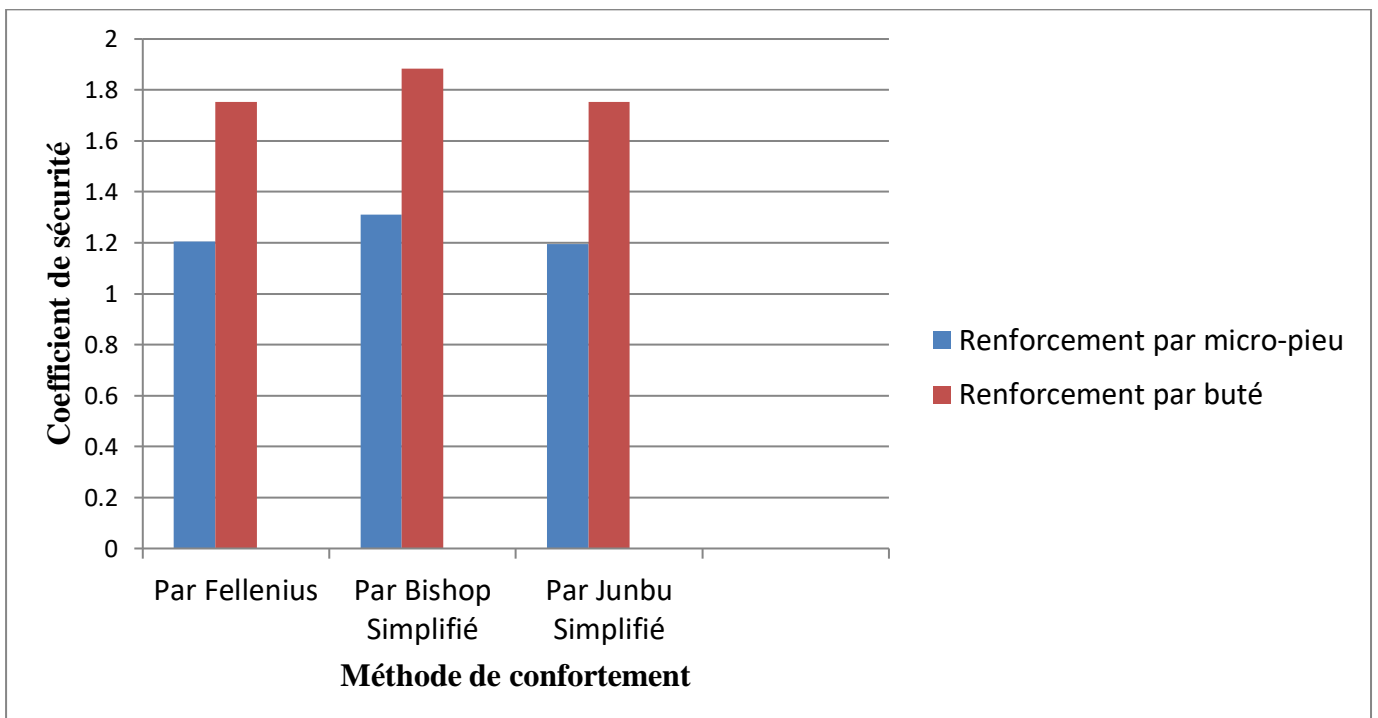


Figure VI.21 - Comparaison des coefficients de sécurité, (Renforcement du terrain naturel)

VI.5. Conclusion

Les résultats obtenus de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis avec le logiciel SLIDE montrent que le coefficient de sécurité calculé avant et après le glissement est inférieur à 1,5 ce qui confirme l'instabilité du talus. Deux solutions de renforcement ont été modélisées, on a constaté que les résultats n'étaient pas proches.

La solution la plus optimale était le renforcement par micro-pieu, avec un faible coefficient de sécurité. la solution d'ajout du butée été la meilleur pour le renforcement, elle a montré une amélioration notable du facteur de sécurité égale à 1,883 (Bishop.s) indiquant que le talus est stable.

En effet s'appuyant sur le facteur économique et les données géologiques et géotechniques du site, la troisième technique de géotextile et paroi clouée a été choisie car elle a donnée un facteur de sécurité satisfaisant pour la stabilité du talus.

Conclusion Général

Conclusion général

L'acte de construire s'est considérablement complexifié ces dernières années. Cette complexification concerne au premier rang la partie géotechnique des ouvrages, terrassements, soutènements et fondations en particulier. Sans une bonne maîtrise de la géotechnique, le projet ne peut réussir. La géotechnique est une science complexe. Elle est un savant mélange entre théorie et empirisme, entre mécanique des milieux continus et expérience personnelle des ingénieurs. La modélisation de l'interaction sol-structure est conditionnée par la nature des sols, par la nature et l'intensité des efforts, par la géométrie du contact entre sol et structure, par les techniques de réalisation et par le phasage des travaux.

Le coût d'une étude géotechnique est sans rapport avec les enjeux financiers d'un projet. Ainsi, une étude géotechnique complète, comprenant toutes les missions, représente un très faible pourcentage du coût des ouvrages.

Il existe plusieurs techniques de renforcement, mais il faut choisir la technique la plus efficace et la moins chère. Il faut faire le bon choix du terrain et effectuer une étude géotechnique rigoureuse afin d'éviter les accidents de glissement.

Référence bibliographiques

- [1](LAUNAY.J, HORSIN MOLINARO.H) (2017) .Les glissements de terrain, modélisation et prévision [Article scientifique, école normal supérieure paris Saclay]
- [2] Alp'Géorisques Septembre 2004, ''Les mouvements de terrain'' ; ministère de l'écologie et du développement durable, Page (5), France.
- [3] Djamel Eddine Benouis 2010, ''étude d'un glissement de terrain par différentes méthodes'' ; mémoire d'ingénieur ; ingénieur d'état en génie civil option construction civile et industrielle ; université de Saida ; (Alger).
- [4] Aissa Mohamed hamza ; Maddouche khadidja 2010/2011; '' analyse et modélisation d'un glissement de terrain'' ; mémoire master ; Université De Khemis Miliana ; page (16) ; Algérie.
- [5] Lee W. Abramson et Al 2002, "Slope stability and stabilization methods", USA
- [6] Mohamed KHEMISSA 2006, METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE ET TECHNIQUES DE STABILISATION DES PENTES, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG' 2006 Lyon (France)
- [7]M .H. AISSA (2011), Analyse et modélisation d'un glissement de terrain. Cas de Sidi Youcef (Béni Messous, Alger) [mémoire de mastère ,Centre universitaire Khemis Miliana Algérie]
- [8]BOURAS .A, (2017). MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU GLISSEMENT ET STABILISATION DU CW15 DU PK 01+300 AU PK 01+700 - SIDI AISSA, ANNABA[Mémoire,Badji Mokhtar - Annaba].
- [9] Slide 2D limit equilibrium slop stability for soil and rock slopes 'User guide' (1989-2002) Rocscience.Inc
- [10] JULIEN LAUNAY , HELENE HORSIN MOLINARO (2017) Les glissement de terrain, modélisation et prévision
- [11] Bendjeddou Azzeddine (2015) Etude des glissements routiers Au Nord Est de l'Algérie, Mémoire de Magister (université de Mohamed Khider –Biskra)

Site Web

[1]<http://www.ccdz.cerist.dz>

[2]<http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/glissements>

[3] <http://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/03/pr%C3%A9vention-mouvement-terrain-2012.pdf>

[4]<https://www.cfmr-roches.org/sites/default/files/jngg/JNGG%202006%20s3%20pp%209-16%20Khemissa.pdf>

[5] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/14892/1/Ms.Gc.Goual.pdf>

[6]https://cours-examens.org/images/Etudes_superieures/Ingeniorat_Genie_civil/4_annee/Mecanique_des_sols/Cours_cisaillement/chapitre5.pdf

[7]<https://www.univ-chlef.dz/FGCA/wp-content/uploads/2019/06/cours-STABILITE-DES-TALUS-barrage-en-terre.pdf>

[8]<https://www.finesoftware.fr/aide-contextuelle/geo5/fr/janbu-01/>