

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure des
Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code :

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme Master

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

**ETUDE PARAMETRIQUE GLISSEMENT
DE TERRAIN**

Encadré par :

Dr: KHECHANA Salim

Présenté par :

AYADI Ahmed Yacine.

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé:

Ce travail fait partir du cadre de notre fin d'étude, il est basé sur les différents types de glissement qui existent dans la nature, et présente toutes les méthodes possibles pour assurer la stabilité par les systèmes de parade, et décrit les méthodes des calculs qui peuvent être utilisées dans l'analyse de la stabilité

En fin, on effectue une analyse quantitative du cas de glissement avant et après renforcement, par le code de calcul TALREN V 4.

Mot clé: glissement, stabilité, systèmes de parade.

Abstract:

This work is part of our final study, it is based on the different types of slides that exist in nature, and present all the methods possible to ensure the stability of the parade systems and describe the methods of calculations that can used in the analysis of the stability

In the end, we carried out a quantitative analysis of the case of sliding before and after enhancement by the calculation code TALREN 4.

Keyword: slip, stability, parade systems.

ملخص:

تركز هذا العمل المنجز في إطار مذكرة نهاية الدراسة على أنواع مختلفة من التحول التي توجد في الطبيعة، وتقديم كل الطرق الممكنة لضمان الاستقرار من قبل أنظمة الصد، ووصف طرق الحساب يمكن استخدامها في تحليل الاستقرار.

في النهاية، نقوم بإجراء تحليل كمي لحالة انزلاق قبل وبعد تعزيز، مستخدمين في ذلك برنامج TALREN 4 .

مفاتيح الكلمات: انزلاق، والاستقرار وأنظمة الصد.



Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Dr: KHECHANA Salim pour ses appréciations compétentes, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Nous remercions vivement ma famille AYADI pour leur aide matérielle et morale durant toute la période de ma vie.

Je tiens également à exprimer mon gratitude envers tous les Enseignants et le personnel administratif de l'ENSTP qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce présent travail.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail

Sur tout Abdelmoumene et Mohammed.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ربي لا يطيب لي الليل إلا بشكرك ولا يطيب لي النهار إلا بطاعتك... ولا تطيب لي اللحظة إلا بذكرك...
ولا تطيب لي الآخرة إلا بعفوك.. ولا تطيب لي الجنة إلا برويتك

إلى من علمني النجاح والصبر
إلى أعتد عليه في مواجهة الصعاب
ولم يبخل عليا لأرتوي من حنانهِ.. **أبي**

وإلى من تتسابق الكلمات لتخرج معبرة عن مكنون ذاتها
من علمتني وعانيت الصعاب لأصل إلى ما أنا فيه

وعندما تكسوني المصوم أسبح في بحر حنانها ليخفف من آلامي... **أبي**

إلى من كانوا يضيئون لي الطريق
ويساندوني ويتنازلون عن حقوقهم
لإرضائي والعيش في هناء
أحبكم حبا لو مر على أرض قاحلة
لتفجرت منها ينابيع المحبة... **أخوتي**

الآن تفتح الأشرطة وترفع المرساة لتنطلق السفينة في عرض بحر واسع مظلم هو بحر الحياة وفي هذه الظلمة لا
يضيء إلا قنديل الذكريات ذكريات الأخوة البعيدة إلى الذين أحببتهم وأحبوني... **أصدقائي**

إلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات، ربما دون يشعروا
بدورهم بذلك فلهم منا كل الشكر

" كن عالما .. فإن لم تستطع فكن متعلما ، فإن لم تستطع فأجب العلماء ، فإن لم تستطع فلا تبغضهم "

عيادي أحمد ياسين

SOMMAIRE

- INTRODUCTION GENERALE

Chapiter01 : GÉNÉRALITÉ SUR L'ISTABILITÉ DES PENTES

1.1 INTRODUCTION.....	P1
1.2 DIFFERENTES FORMES D'INSTABILITÉS D'UNE PENTE.....	P1
1.2.1 Pentes naturelles.....	P1
1.2.1.1. L'éroulement (ou l'avalanche).....	P1
1.2.1.2. Le fluage.....	P2
1.2.1.3. La coulée boueuse.....	P2
1.2.1.4. Le glissement.....	P3
1.2.2 Talus artificiels.....	P4
1.2.2.1 Talus en déblai et talus en remblai sur sols non compressibles.....	P4
1.2.2.2 Talus en remblai sur sols compressibles.....	P5
1.2.2.3 Stabilité sous les soutènements.....	P5
1.3 PRINCIPALES CAUSES D'INSTABILITÉS.....	P5
1.3.3. Causes hydrauliques.....	P5
1.3.2. Causes géométriques.....	P5
1.3.1. Causes mécaniques.....	P5
1.4 RECONNAISSANCE DU SITE.....	P6
1.4.1. Géologie et géomorphologie.....	P6
1.4.2. Hydrogéologie.....	P6
1.4.3. Reconnaissance géotechnique.....	P6
1.5.4. L'étude cinématique.....	P6
1.5. CONCLUSION.....	P7

Chapiter02 : LES MÉTHODES D'ANALYSE DE LA STABILITÉ DES PENTES

2.1. INTRODUCTION.....	P8
2.2. NOTIONS SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DU SOL.....	P8
2.3. LE PRINCIPE D'EQUILIBRE LIMITE	P9
2.4. DEFINITION DU COEFFICIENT DE SÉCURITÉ.....	P9

2.5. Stabilité d'une pente infinie (glissement plan).....	P10
2.6. La méthode générale des tranches pour une surface de rupture circulaire.....	P11
2.6.1. Méthode des tranches de Fellenius (1927).....	P13
2.6.2. Méthode de Bishop détaillé (1954).....	P14
2.6.3. Méthode de Bishop Simplifiée.....	P15
2.7. Récapitulation des hypothèses.....	P15
2.8. CONCLUSION.....	P16

Chapiter03 : MÉTHODES DE STABILISATION DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

3.1. INTRODUCTION	P17
3.2. SYSTEME DE PARADES	P17
3.2.1. Approche douce.....	P18
3.2.2. Approche dure.....	P19
3.3. RENFORCEMENT DES TALUS PAR CLOUAGE	P21
3.3.1. Clous et micropieux.....	P22
3.3.2. Pieux et barrettes.....	P23
3.4. RENFORCEMENT PAR GEOTEXTILES.....	P23
3.5. CHOIX D'UN SYSTEME DE PARADE.....	P24
3.5.1. Conditions techniques	P24
3.5.2. Conditions économique	P25
3.5.3. Contraintes sociopolitiques.....	P25
3.5.4. Environnement et esthétique.....	P25
3.6. CONCLUSION.....	P26

Chapiter04 : ETUDE PARAMETRIQUE

4.1. INTRODUCTION.....	P27
4.2. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL TARLEN	P27
4.2.1 les avantages de talren v4.....	P27
4.2.2 Le méthode de calcul en TLREN v4.....	P27
4.3. PRESENTATION DU PROJET.....	P28
4.3.1. Description de glissement cas de notre étude	P29
4.3.2. Caractéristique physique	P30
4.4. CALCUL ET VERIFICATION	P30
4.4.1. Caractéristiques de cas d'étude	P30
4.4.2 EXECUTION DE CALCUL	P32
4.4.3 RESULTATS DU FACTEUR DE SECURITE APRES LA CONFORTEMENT	P37
4.4.4 ETUDE COMPARATIVE SUR LES DEUX SOLUTIONS.....	P42
4.5. CONCLUSION.....	P43

- CONCLUSION GENERAL

- BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES TABLAUX

Tableau 2.1: <i>Les hypothèses, les équations et les inconnus dans les méthodes d'analyses.....</i>	P16
Tableau 4. 1: <i>Classification des zones Sismiques en territoire Algérie.....</i>	P28
Tableau 4. 2: <i>Le profil géotechnique</i>	P31
Tableau 4.3 <i>récapitulation les résultats coefficient de sécurité.....</i>	P36
Tableau 4.4 : <i>Les dimensions de mur de soutènement</i>	P38
Tableau 4. 5. <i>Récapitulative les résultats de coefficient de sécurité</i>	P42
Tableau 4.6: <i>Étude comparative sur les deux solutions.....</i>	P42

INTRODUCTION GENERALE

Les glissements de terrain peuvent avoir des conséquences dévastatrices, étant donné qu'ils ont des effets sur les communautés, les conditions de vie et l'économie, tant au niveau régional que national.

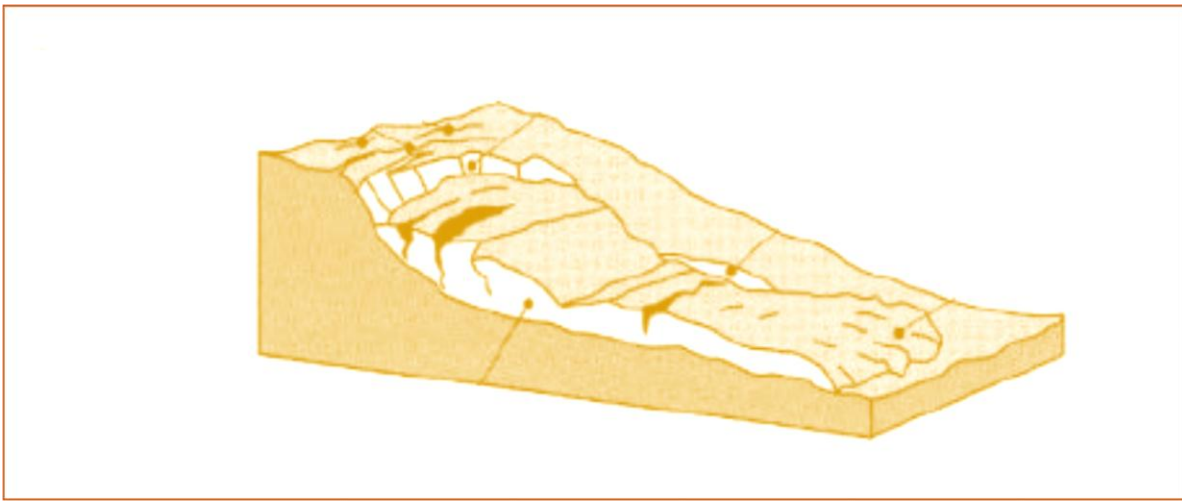
L'Algérie, qui connaît un grand développement d'infrastructures, est appelée à subir constamment ce phénomène. Le risque croît en raison de l'explosion démographique, d'une urbanisation croissante, de développement dans les zones à fortes pentes, de déforestation des versants et d'augmentation des précipitations régionales causée par les changements climatiques.

Le besoin de mettre en commun l'expérience des scientifiques et les outils pour faire face à ce problème, en étudiant en permanence des moyens et systèmes de confortement, a été ressenti.

Les méthodes traditionnelles, pour la plupart issues de l'expérience acquise sur des ouvrages isolés, reposent le plus souvent sur l'analyse de la résistance de ces ouvrages vis-à-vis de la rupture. L'analyse du comportement des systèmes de parades et celle de leurs impacts sur les talus, par ces méthodes, reste limitée et manque de précision.

Actuellement, l'utilisation de la réalité virtuelle pour la simulation des problèmes en ingénierie est plus avantageuse. Les progrès des ordinateurs et des méthodes d'analyse numérique permettent de dépasser les limitations géométriques et rhéologiques des méthodes de calcul traditionnelles et d'aborder l'étude de problèmes aux géométries et lois de comportement complexes. Aussi, l'usage de ces méthodes permet la vérification de la stabilité des pentes, de contrôler les valeurs de déplacements admissibles et des contraintes dans les structures du renforcement et d'aider à leur dimensionnement.

CHAPITRE I :



G
É
N
É
R
A
L
I
T
É

S
U
R

L
,
I
S
T
A
B
I
L
I
T
É

D
E
S

P
E
N
T
E
S

1.1. INTRODUCTION

Les glissements de terrains en pente revêtent des fois des formes spectaculaires et laissent à penser que toute perturbation de l'équilibre initial des terres, par réalisation d'un projet quelconque, peut conduire à des conséquences catastrophiques.

L'analyse de la stabilité d'un terrain vis-à-vis du glissement est une opération complexe, dans la mesure où une multitude d'aspects s'interfèrent, notamment l'incertitude sur les paramètres géotechniques.

1.2. DIFFÉRENTES FORMES D'INSTABILITÉS D'UNE PENTE

Lors d'une étude de stabilité de glissement, on est en présence de terrains naturels en pente et de talus artificiel (réalisés par l'homme).

1.2.1 Pentés naturelles

1.2.1.1. Ecoulement (ou l'avalanche)

Il s'agit de la chute soudaine des masses rocheuses importantes, Il est spectaculaire et dangereux. Le traitement de ce phénomène relève de la mécanique des roches. [2]

Le mécanisme initial peut s'expliquer par le développement d'une surface de glissement inclinée. Le mécanisme de mouvement de l'écroulement est déterminé par la topographie, de même que par l'interaction marquée entre les composants de la masse écroulée et par leur fragmentation intense. Comme illustre la figure(01). [3]



(a) : le mécanisme de l'écroulement



(b) : Ecoulement dans terrain naturelle

Figure 1.1: l'aspect de l'écroulement

1.2.1.2. Fluage

Il s'agit du mouvement lent du sol sans modification des efforts appliqués [2], se manifeste par des déformations continues sans rupture, ou par un mouvement discontinu, affectant les matériaux meubles et rocheux [5]. La figure 1.2, représente un mouvement de pente par fluage, marqué par l'inclinaison des arbres.

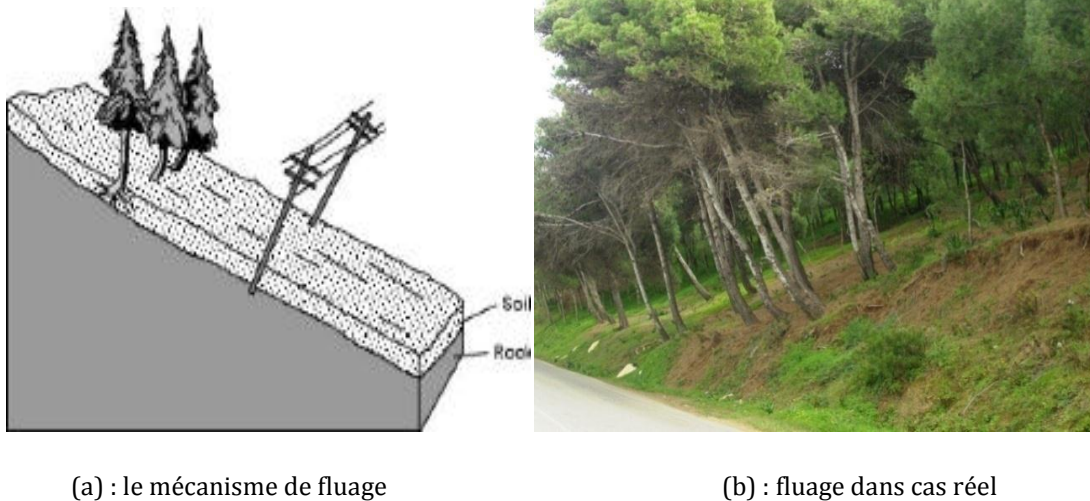


Figure 1.2 : l'aspect de fluage

1.2.1.3. Coulée boueuse

La coulée boueuse est due à des infiltrations d'eau (la matrice fine atteint une teneur en eau très élevée), provoquant des mouvements des sols dans lesquels les matières glissées se comportent comme un liquide. Elle se produit généralement en montagne. [1].

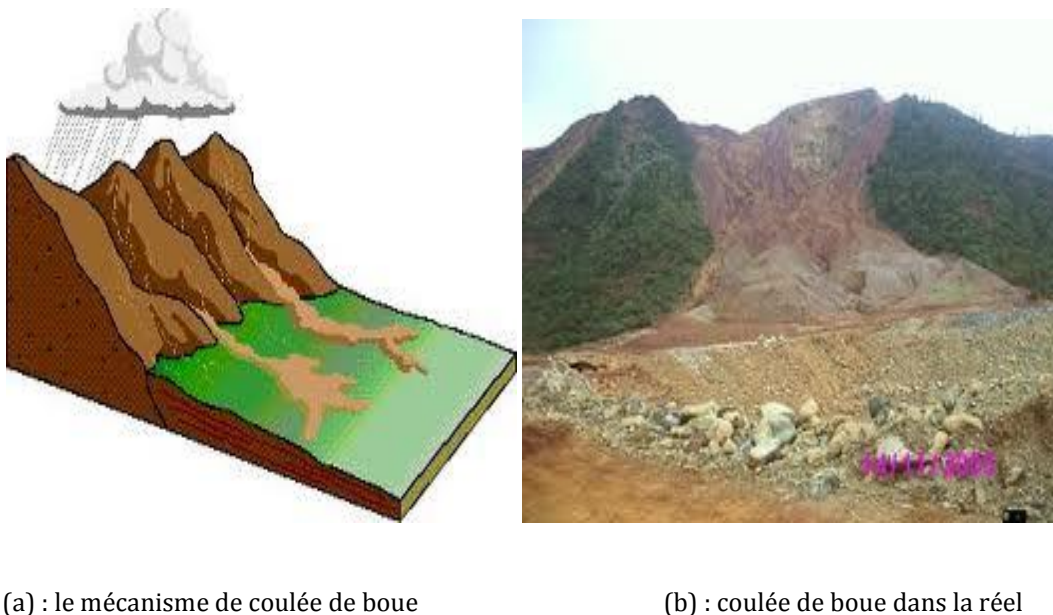


Figure 1.3 : le phénomène de coulée boueuse

1.2.1.4. Glissement

Il est caractérisé par la formation d'une surface de rupture le long de laquelle se produisent les déplacements, il se produit lorsque les contraintes de cisaillement dues aux forces motrices, excèdent la résistance du sol le long de la surface de rupture.

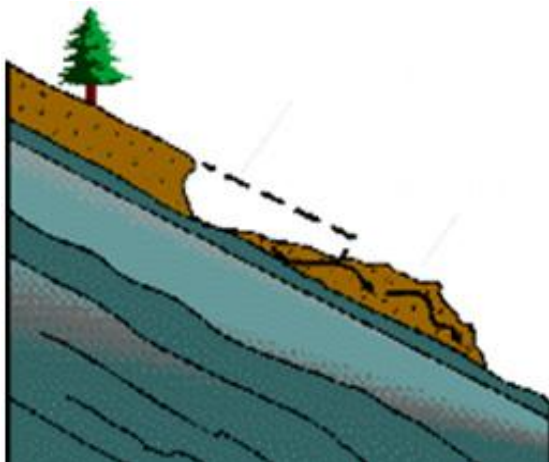
Les facteurs déclenchant sont :

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation de la pression interstitielle, etc...) ;
- Les terrassements ;
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosions de berges) ;
- Les accélérations produites par des séismes. [4]

On observe des glissements de formes variées, notamment :

❖ Glissement plan

Où la surface de glissement est plane (voir figure 1.4). Il s'agit souvent du toit d'une couche de mauvaise résistance. [2] Appeler « couche de savon ».



(a) : Mécanisme de glissement plan



(b) : Exemple d'un glissement plan réel

Figure 1.4 : Un glissement plan

❖ Glissement rotationnel simple

Ce type de glissement est très fréquent. La surface de rupture correspondante a une forme simple et peut être assimilée à un cylindre dans la plupart des cas voir figure 1.5. Sa projection sur le plan transversal correspond à un arc de cercle, d'où le nom de glissement circulaire [7].



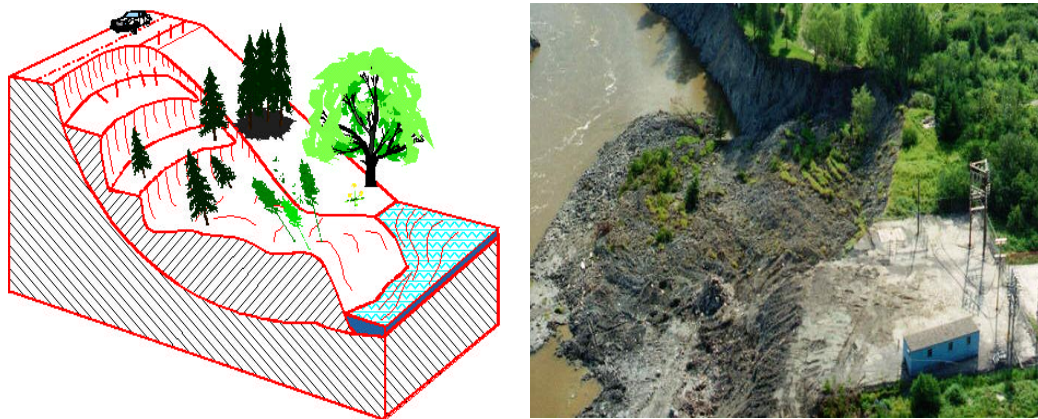
(a) : Mécanisme de glissement rotationnel simple

(b) : Exemple sur terrain réel.

Figure 1.5 : Le glissement rotationnel simple

❖ Glissement rotationnel complexe

Se manifeste sous forme de surfaces multiples (emboîtés), les unes dans les autres, dues à des glissements en chaîne. Voir les figures 1.6.a et 1.6.b.



(a):Mécanisme d'un glissement Rotationnel complexe

(b) : Exemple d'un glissement rotationnel multiple en bordure de la rivière

Figure 1.6 : Le glissement rotationnel complexe

1.2.2 Talus artificiels :

1.2.2.1 Talus en déblai et talus en remblai sur sols non compressibles

D'une façon générale, les ruptures ont l'allure de glissements circulaires parmi lesquels sont distingués :

- Les cercles de pied sont les plus courants dans les talus.
- Les cercles débouchant sur la surface du talus apparaissent dans les sols hétérogènes, la base du cercle correspondant à une couche plus résistante.

- Les cercles profonds ne se produisent que lorsque le sol situé sous le niveau du pied du talus est de mauvaise qualité. [1]

1.2.2.2 Talus en remblai sur sols compressibles

Un talus en remblai sur sol compressible, tel que l'argile molle ou organique, risque de glisser selon un cercle profond tangent à la base de la couche compressible, si elle est homogène. [2]

1.2.2.3 Stabilité sous les soutènements

Pour ce type d'ouvrage, le glissement se manifeste parfois selon un cercle profond, englobant l'ouvrage de soutènement.

1.3. PRINCIPALES CAUSES D'INSTABILITÉS

1.3.1. Causes mécaniques

Cette catégorie comporte les facteurs causant une augmentation des contraintes dans le sol tel qu'une surcharge provenant d'un nouvel ouvrage, de la neige ou de l'eau, ou l'augmentation du poids volumique due à l'augmentation de la teneur en eau, ou les facteurs réduisant la résistance au cisaillement du sol, tels que la diminution de la cohésion de l'argile, l'augmentation des pressions interstitielles.

1.3.2. Causes géométriques

Elles comportent les facteurs modifiant la géométrie du terrain, définie principalement par la hauteur H du talus et son angle β d'inclinaison par rapport à l'horizontal, notamment dans les travaux de terrassement (déblaiement, remblaiement).

1.3.3. Causes hydrauliques

On estime qu'environ 55 % des glissements ont une cause hydraulique. Le mouvement de la nappe modifie l'équilibre initial des efforts internes dans le sol, ce qui se répercute sur la résistance de cisaillement, sachant qu'elle est proportionnelle à la contrainte normale effective. [2]

1.4. RECONNAISSANCE DU SITE

1.4.1. Géologie et géomorphologie

L'analyse géologique consiste à définir la structure géologique du site la nature du substratum, la présence de failles, etc. Il est important que l'étude géologique s'étende sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable.

Sur un site potentiellement instable, on recherchera des indices de mouvements anciens ou actifs, tels que moutonnements de la pente, zones humides, arrachements superficiels, fissures dans les constructions rigides, etc.

Les principaux moyens d'investigation utilisés sont les suivants :

1. Levés morphologique et géologique du terrain : affleurements, indices de mouvements, zones humides ;
2. Photo-interprétation : géologie, géomorphologie, etc. ;
3. Géophysique : fournissant la profondeur du substratum en place (sismique-réfraction) ;
4. Sondages : destructifs ou carottés et diagraphies. [6]

1.4.2. Hydrogéologie

Cette analyse consiste à mettre en place à différents profondeurs des piézomètres, qui seront en général à volume constant, puisque les terrains dangereux sont en général de nature argileux à faible perméabilité. On pourra ainsi mesurer les pressions interstitielles, les niveaux des nappes et leur alimentation [8].

1.4.3. Reconnaissance géotechnique

La reconnaissance géotechnique a pour objectif de déterminer expérimentalement, par le biais des essais de laboratoire ou in-situ, les caractéristiques physiques et mécaniques des sols, et plus précisément celles de la résistance au cisaillement, à savoir l'angle de frottement et la cohésion. Actuellement les méthodes d'équilibre limite qu'on utilise dans le calcul du facteur de sécurité au glissement requièrent des paramètres mécaniques et physiques tel que ; C, φ, γ et E , mesurables au laboratoire. [2]

1.5.4. Etude cinématique

Le premier objectif de l'étude cinématique est la délimitation en plan et en profondeur du volume en mouvement. Pour cela on peut utiliser divers instruments, en particulier les nivelles et les inclinomètres.

Les nivelles micrométriques servent à mesurer les rotations de la plaque support sur l'horizontale, la plaque est fixée sur un ouvrage ou sur un plot scellé dans le sol. La mesure inclinométrique, réalisée au moyen d'une sonde descendue dans un tube scellé dans un forage, fournit l'inclinaison sur la verticale du tube et, par intégration, sa déformation, elle permet en particulier de déterminer la profondeur de la surface de rupture.

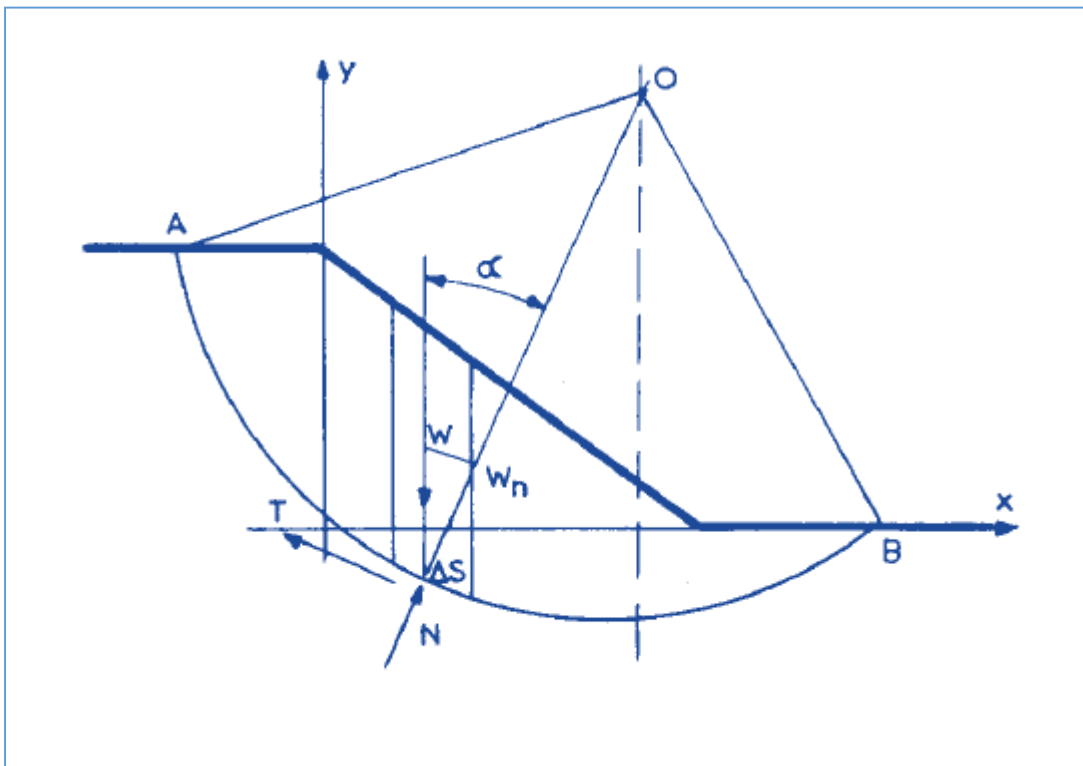
L'étude cinématique permet aussi d'obtenir un ordre de grandeur de la vitesse de mouvement, d'analyser la sensibilité aux facteurs extérieurs, ou de contrôler l'efficacité d'une stabilisation. [9].

1.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a montré les différents types de glissements qui existent dans la nature.

Le traitement et l'étude de ces différents cas, nécessite quelques reconnaissances comme les cartes: topographiques, géologiques, en vue de procéder à une étude détaillée du site instable.

CHAPITRE II:



2.1. INTRODUCTION

Le calcul de la stabilité des talus, après la détermination de la résistance au cisaillement, de la pression de l'eau interstitielle, de la géométrie de la pente..., doivent être effectués pour s'assurer que les forces stabilisantes sont suffisantes et supérieures à celle qui tend à provoquer une pente à l'échec (force motrice).

2.2. NOTIONS SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DU SOL

Au moment de la rupture, les contraintes de cisaillement τ le long de la surface de rupture atteignent la résistance au cisaillement maximum (τ_{ult}) que le sol peut supporter sous une contrainte normale σ .

Les grains du sol glissent les uns par rapport aux autres le long de la surface de rupture, et ils ne s'écrasent pas.

2.2.1 Critère de Mohr-Coulomb

L'enveloppe de rupture des sols dans le plan de Mohr (σ, τ), est assimilée à une droite d'ordonnée à l'origine C (cohésion) et de pente φ (angle de frottement), exprimée par la relation linéaire $\tau = c + \sigma \tan \varphi$, appelée la loi de Coulomb. [10]

avec:

$$\sin \varphi = (\sigma_1 - \sigma_3) / (2k + \sigma_1 + \sigma_3)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k \sin \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi$$

$$k = c \cot \varphi$$

avec :

C : la cohésion

σ : la contrainte normale

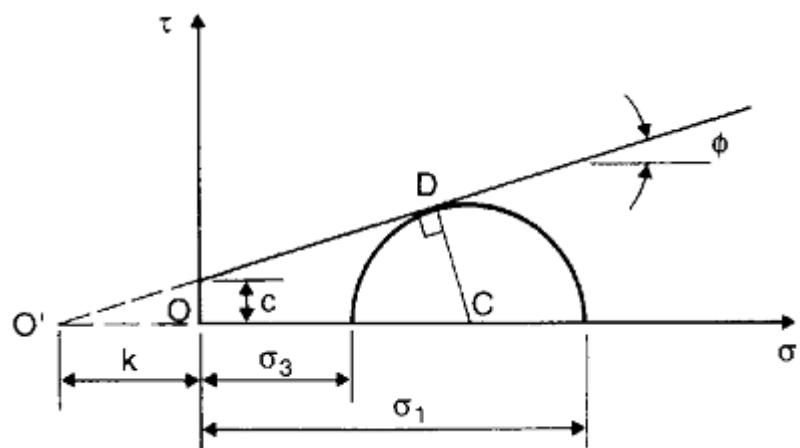


Figure 2.1 : critère de rupture de Mohr-Coulomb

2.3. PRINCIPE D'EQUILIBRE LIMITE

De manière classique, on définira les conditions d'équilibre limite et on utilisera un coefficient de sécurité. On suppose que l'équilibre limite existe au moment de la rupture le long de la ligne de glissement. L'expérience montre que la zone en équilibre limite forme une bande assez étroite de part et d'autre de la zone de rupture. La stabilité de l'ensemble est donc liée à celle de la bande considérée.

Les méthodes de calcul consistent à rechercher la surface le long de laquelle le coefficient de sécurité F_s est le plus faible. [2]

2.4. DEFINITION DU COEFFICIENT DE SÉCURITÉ

Le coefficient de sécurité (F_s), est défini à l'égard de la résistance au cisaillement du sol comme :

$$F_s = \frac{\tau_{\max}}{\tau} \quad (2-1)$$

Où :

τ_{\max} : résistance au cisaillement du sol ;

τ : Contraintes de cisaillement s'exerçant le long de la surface.

La contrainte de cisaillement d'équilibre est la contrainte de cisaillement nécessaire pour maintenir la pente juste stable ; l'équation (2-1) peut être exprimée comme :

$$\tau = \frac{T}{F_s} \quad (2-2)$$

La résistance au cisaillement peut être exprimée par l'équation de Mohr-Coulomb, si la résistance au cisaillement est exprimée en termes de la contrainte totale, l'équation (2-1) est écrite comme :

$$\tau = \frac{c + \sigma \tan \phi}{F_s} \quad (2-3)$$

Ou :

$$\tau = \frac{c}{F_s} + \frac{\sigma \tan \phi}{F_s} \quad (2-4)$$

Où C et ϕ sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement du sol, et σ est la contrainte totale normale sur le plan de cisaillement.

Si la résistance au cisaillement est exprimée en termes de contrainte effective, la seule modification de ce qui précède est que l'équation (2-4) est écrite en termes d'efficacité, comme suit :

$$\tau = \frac{c' + (\sigma - \mu) \tan \phi'}{F_s} \quad (2-5)$$

Où c' et ϕ' sont représentés les paramètres de résistance au cisaillement effective en termes de la contrainte effective, et μ est la pression de l'eau interstitielle.

2.5. STABILITE D'UNE PENTE INFINIE (GLISSEMENT PLAN)

C'est le cas où on peut admettre des rayons de courbure infinis, ce qui nous amène à des glissements plans.

Si on considère une pente infinie, la pente est supposée s'étendre infiniment dans toutes les directions et le glissement est supposé se produire le long d'un plan parallèle à la face de la pente. Car la pente est infinie, les contraintes sont les mêmes sur tous les deux plans qui sont perpendiculaires à la pente, comme les plans A-A' et B-B' dans la figure 2.2.

Les équations d'équilibre sont déterminées en considérant un bloc rectangulaire comme celui de la Figure 2.2, Pour une pente infinie, les forces sur les deux extrémités du bloc seront identiques en amplitude, en sens opposé, et colinéaires. Ainsi, les forces sur les extrémités du bloc s'équilibrent exactement les unes aux autres et peuvent être ignorées dans l'équilibre des équations.

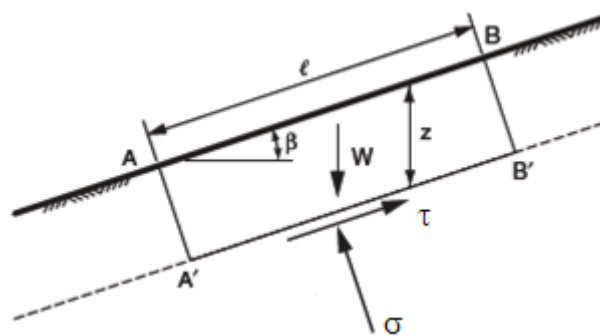


Figure 2.2: Pente infinie de surface de rupture plane.

Le résumé des forces dans des directions perpendiculaires et parallèles au plan de glissement donne les expressions suivantes pour la force de cisaillement τ , et la force normale σ , sur le plan:

$$\begin{cases} \tau = W \sin\beta. \\ \sigma = W \cos\beta. \end{cases} \quad (2.6)$$

Où β est l'angle d'inclinaison de la pente et du plan de glissement, mesuré par rapport à l'horizontale, et W est le poids du bloc. Pour un bloc de l'unité d'épaisseur dans la direction perpendiculaire au plan de la section transversale, le poids est exprimé :

$$W = \gamma Z L \cos\beta \quad (2.7)$$

Où " γ " est le poids volumique du sol, " L " la distance entre les deux extrémités du bloc, mesuré parallèlement à la pente, et " Z " la profondeur verticale au plan de cisaillement.

En substituant (2.1) dans (2.2) donne :

$$\begin{cases} \tau = \gamma z L \cos\beta \sin\beta \\ \sigma = \gamma z L \cos^2\beta \end{cases} \quad (2.8)$$

En substituant les expressions (2.8) et (2.9) dans l'équation (2.4) pour obtenir la formule du coefficient de sécurité, on trouve :

$$F_s = \frac{C + \gamma z L \cos^2\beta \operatorname{tg}\varphi}{\gamma z L \cos\beta \sin\beta} \quad (2.10)$$

En termes de contraintes effectives :

$$F_s = \frac{C' + (\gamma z L \cos^2\beta - u) \operatorname{tg}\varphi'}{\gamma z L \cos\beta \sin\beta} \quad (2.11)$$

Pour un sol purement pulvérulent ($c, c'=0$), le coefficient de sécurité se réduit à :

$$F_s = \frac{\operatorname{tg}\varphi'}{\operatorname{tg}\beta} \quad (2.12)$$

L'équilibre limite est atteint pour $F_s = 1$; soit $\beta = \varphi$. Ceci exprime bien que l'angle de talus naturel d'un sol pulvérulent est égal à l'angle de frottement interne du sol.

2.6. METHODE GENERALE DES TRANCHES POUR UNE SURFACE DE RUPTURE CIRCULAIRE

Le principe de la méthode consiste à découper le massif situé au-dessus de la ligne de rupture en tranches. L'expérience montre qu'il n'est pas nécessaire de prévoir des tranches très minces pour obtenir une précision suffisante.

Ces méthodes considèrent une surface de rupture circulaire et sont basées sur l'équilibre des moments sur le centre du cercle. [11]

Chaque tranche est soumise à son poids propre, aux surcharges en surface, et aux forces inter-tranches de contact, comme illustre la figure 2.4. Sachant que $e(x)$ est l'équation des points d'application des forces inter-tranches, $E(x)$ et $T(x)$ sont les efforts inter tranches horizontales et verticaux respectivement.

La base de la tranche appartient à la ligne de rupture $y(x)$ est soumise à une contrainte normale σ et une contrainte tangentielle τ . L'angle α est la dérivé de la fonction $y(x)$, que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale.

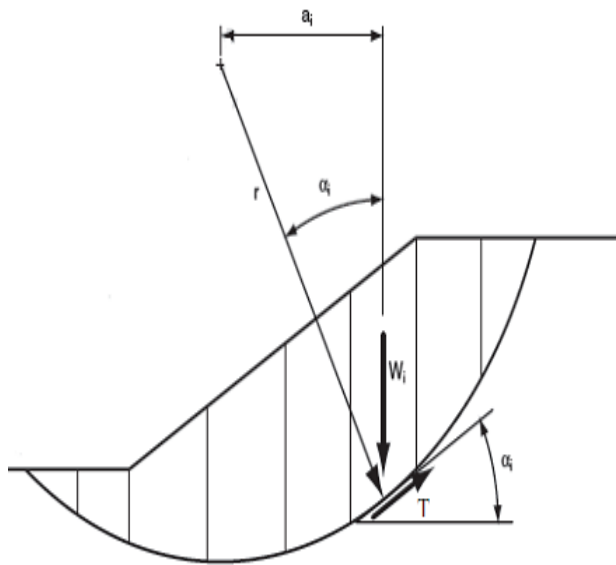


Figure 2.3 : Masse d'un talus découpé en tranches

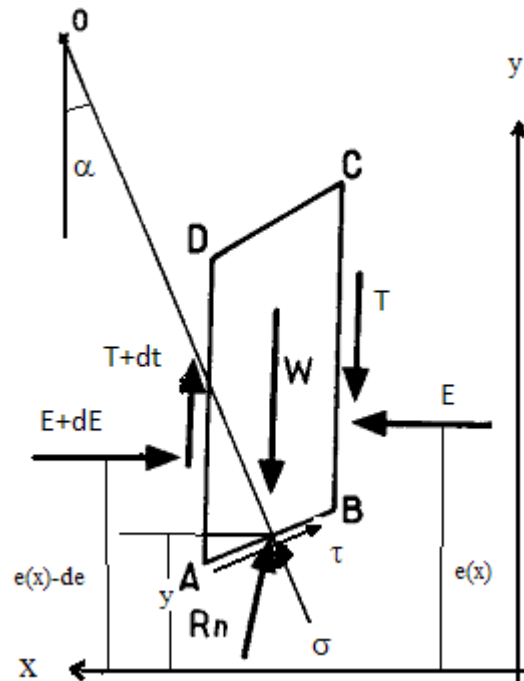


Figure 2.4 : Forces agissant sur une tranche

L'équilibre des forces horizontales et verticales et des moments, par rapport à la base de la tranche donne respectivement :

$$\Sigma F_{/x}=0 : - dE-\tau ABC \cos \alpha + \sigma AB \sin \alpha =0 \tag{2.13}$$

$$\Sigma F_{/y}=0 : dt-w + \sigma ABC \cos \alpha + \tau AB \sin \alpha =0 \tag{2.14}$$

$$\Sigma M_{/o}=0 : -T- E \frac{de}{AB} + (e-y) \frac{de}{AB} =0 \tag{2.15}$$

La combinaison des équations (2.13) et (2.14), permet d'écrire :

$$\sigma = \cos^2 \alpha \left(\operatorname{tg} \alpha \frac{dE}{AB \cos \alpha} + \frac{dt}{AB \cos \alpha} + w \right) \quad (2.16)$$

$$\tau = \cos^2 \alpha \left(-\frac{dE}{AB \cos \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \frac{dE}{AB \cos \alpha} + w \operatorname{tg} \alpha \right) \quad (2.17)$$

Le critère de rupture de Mohr-Coulomb est:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.18)$$

Dans ce type de problème, il y a cinq inconnues à déterminer, $E(x)$, $T(x)$, $\sigma(x)$, $\tau(x)$, et $e(x)$. Mais nous ne pouvons former que quatre équations, (2.13, 2.16, 2.17, 2.18), dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter une hypothèse. C'est d'ailleurs le point de divergence des différentes méthodes des tranches.

Les points communs entre ces hypothèses sont les suivant :

- La surface de rupture est circulaire.
- La rupture s'effectue simultanément en tous les points de la surface de glissement.
- Le traitement de problème est fait en plan (2 D), et les forces d'inertie sont négligées (pas de transition entre l'équilibre et l'équilibre limite).

2.6.1. Méthode des tranches de Fellenius (1927)

Dans cette méthode, toutes les forces inter tranche sont ignorées, autrement dit ;

$$\frac{dt}{AB \cos \alpha} = \frac{dE}{AB \cos \alpha} = 0. \text{ Ainsi, les équations (2.16) et (2.17), se réduisent en :}$$

$$\sigma = w \cos^2 \alpha \quad (2.19)$$

$$\tau = w \cos \alpha \sin \alpha \quad (2.20)$$

En substituant les expressions (2.19) et (2.20) dans l'équation (2.3) pour obtenir la formule du coefficient de sécurité comme suit :

$$F_s = \frac{c + w \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \varphi}{w \cos \alpha \sin \alpha} \quad (2.21)$$

Le facteur de sécurité globale de la zone de glissement égale à la somme des moments résistant sur la somme des moments moteurs de toutes les tranches existant, comme montre l'équation (2.22).

$$F_s = \frac{\sum \left(\frac{c b}{\cos \alpha} + w \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi \right)}{\sum w \sin \alpha} \quad (2.22)$$

Les paramètres géométriques intervenant dans le calcul de F_s sont :

La largeur de tranche b , le poids de la tranche W , et l'angle orienté α que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la vertical, voire figure 2.5

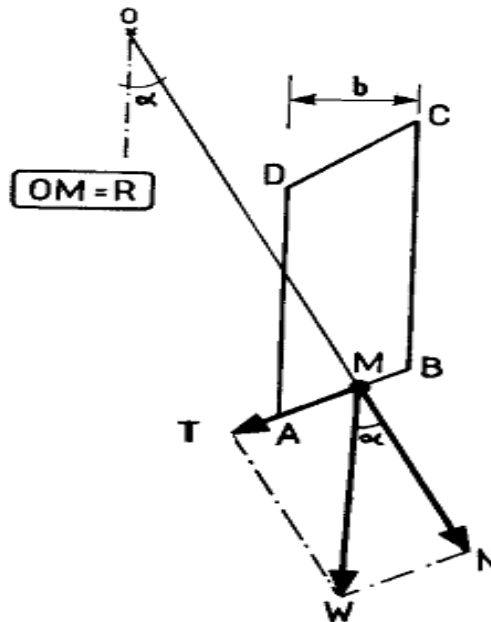


Figure 2.5 : Hypothèse de Fellenius sur une tranche

2.6.2. Méthode de Bishop détaillée (1954)

Dans la méthode de Bishop, l'expression du coefficient de sécurité est obtenue en écrivant les deux équations d'équilibre statique :

- ✓ L'équilibre des forces verticales qui sont appliquées à chaque tranche.
- ✓ L'équilibre global des moments.

Le coefficient de sécurité est déterminé comme suit :

- l'équilibre vertical :

$$W + (T - T + dt) = \sigma \cos \alpha + \tau \sin \alpha \quad (2.23)$$

D'où l'équation (2.13) et (2.16)

$$W + (T - T + dt) = \sigma \cos \alpha + \frac{c}{F_s \cos \alpha} \sin \alpha + \sigma \frac{\operatorname{tg} \varphi}{F_s} \sin \alpha \quad (2.24)$$

D'où la valeur de σ égale :

$$\sigma = \frac{W+(T-T+dt)-C \operatorname{tg} \alpha \frac{b}{F_s}}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{\operatorname{tg} \varphi}{F_s}} \quad (2.25)$$

Pour une surface de glissement circulaire :

$$F_s = \frac{\sum \left(\frac{c b}{\cos \alpha} + \sigma \operatorname{tg} \varphi \right)}{\sum w \sin \alpha} \quad (2.26)$$

On porte dans l'expression de F_s la valeur de σ précédemment calculée :

$$F_s = \frac{1}{\sum w \sin \alpha} \sum \left[\frac{c' b + (w + (T - T + dt) - u b) \operatorname{tg} \varphi'}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{F_{s0}}} \right] \quad (2.27)$$

Pour déterminer F_{s0} il faut procéder par itérations successives, puisque F_s figure aux deux membres de l'équation.

2.6.3. Méthode de Bishop Simplifiée

L'hypothèse supplémentaire est que $T - T + dt = 0$, quelle que soit la tranche considérée, l'équation (2.18) se simplifie en :

$$F_s = \frac{1}{\sum w \sin \alpha} \sum \left[\frac{c' b + (w - u b) \operatorname{tg} \varphi'}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{F_{s0}}} \right] \quad (2.28)$$

Tous les termes sont connus et F_s est calculé par itérations successives, la première itération est faite en adoptant la valeur F_{s0} obtenu par la méthode de Fellenius.

2.7. RECAPITULATION DES HYPOTHESES, DES EQUATIONS D'EQUILIBRES ET DES INCONNUS DANS LES METHODES D'EQUILIBRE LIMITE

Comme il est noté au début de ce chapitre, toutes les méthodes d'équilibre limite utilisent les équations d'équilibre statique pour calculer le coefficient de sécurité.

Les hypothèses sont nécessaires pour rendre le problème déterminé statiquement et obtenir un équilibre entre le nombre d'équations et le nombre d'inconnues pour qu'ils soient résolus.

Le tableau 2.1. énumère quelques méthodes examinées dans le présent chapitre ainsi que les hypothèses qui sont faites, les équations d'équilibre qui sont satisfaites, et les inconnus. [10]

Tableau 2.1: Les hypothèses, les équations et les inconnus dans les méthodes d'analyses

La méthode	Les hypothèses	Les équations d'équilibres	Les inconnus recherchés
Une pente infinie	<ul style="list-style-type: none"> • Etendue infinie. • La surface de rupture est parallèle à la surface de la base de la pente. 	\sum Forces perpendiculaires à la pente. \sum Forces parallèles à la pente.	<ul style="list-style-type: none"> • Le coefficient de sécurité. • La force normale (N) à la base.
Fellenius	<ul style="list-style-type: none"> • La surface de rupture est circulaire. • Les forces sur les côtés des tranches sont négligées. 	\sum moments par rapport au centre du cercle de glissement.	<ul style="list-style-type: none"> • Le coefficient de sécurité.
Bishop simplifiée	<ul style="list-style-type: none"> • La surface de rupture est circulaire. • Les forces sur les côtés des tranches sont horizontales (pas de cisaillement entre les tranches). 	\sum moments par rapport au centre du cercle de glissement. \sum des forces dans le sens vertical.	<ul style="list-style-type: none"> • Le coefficient de sécurité. • La force normale (N) à la base de la surface de rupture.

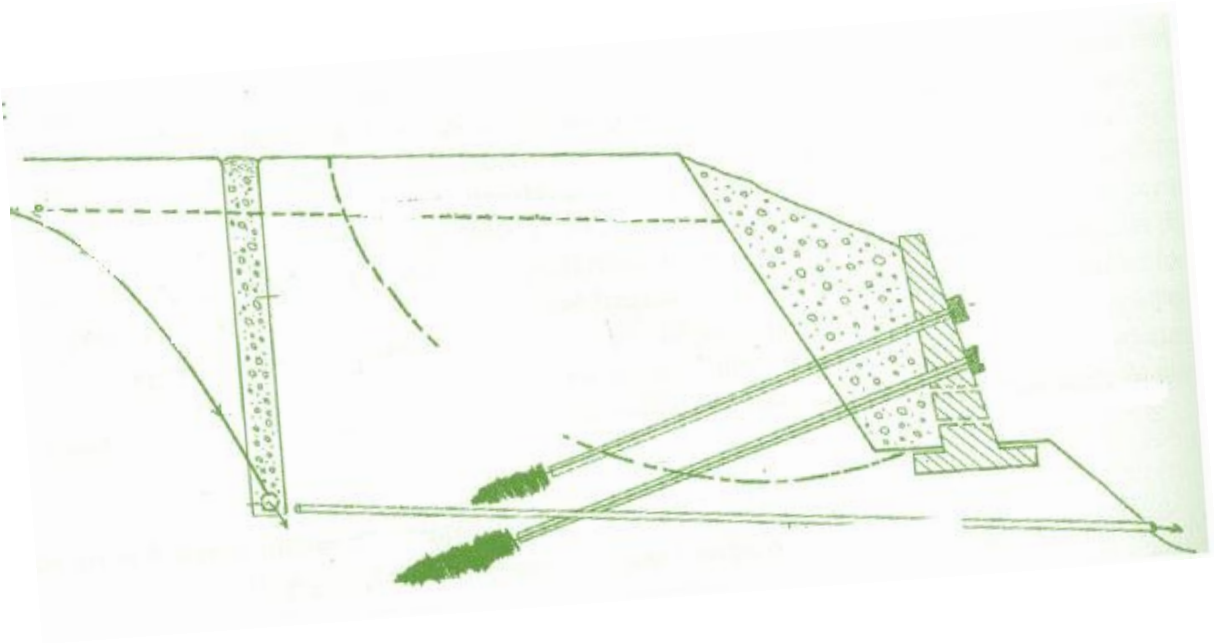
2.8. CONCLUSION

On a présenté, précédemment, la notion de coefficient de sécurité qui est le paramètre le plus important pour évaluer une stabilité de pente, et on a cité les différentes méthodes de calcul à l'équilibre limite avec leurs différentes hypothèses.

Le choix de l'une ou l'autre méthode dépendra donc de la disponibilité des caractéristiques mécaniques et de la bonne appréciation qu'il est possible de faire de la position de la ligne de rupture critique.

Bien que ces méthodes sont dites classiques, elles permettent encore à d'évaluer les mouvements ou l'aléa de la pente par une analyse numérique (logiciels) basée sur ces méthodes.

CHAPITRE III:



3.1. INTRODUCTION

L'étude d'un glissement de terrain conduit à définir une solution confortative, la plus efficace et la moins coûteuse.

Dans ce chapitre, on présente les différentes méthodes de stabilisation offertes par le système de Parade ayant pour objectif la stabilisation de volumes instables par : (Élimination de la masse instable (exp : Purge), Diminution des efforts moteurs (Drainage), Augmentation des efforts résistants (exp : Confortement),

Le choix d'une méthode de stabilisation résulte de la prise en compte des conditions techniques (paramètres techniques du site et maîtrise de la mise en œuvre), ainsi que des contraintes économiques, sociopolitiques, environnementales et esthétiques.

3.2. SYSTEME DE PARADES

Face à un problème de stabilité, une première solution consiste à s'affranchir des mouvements de la pente instable sans les empêcher, deux types de solutions sont possibles :

- Implanter ou déplacer le bâtiment, l'ouvrage d'art ou la route en dehors de la zone en mouvement, dans un secteur reconnu comme stable.
- Concevoir l'ouvrage de telle sorte qu'il ne soit pas endommagé par les mouvements : soit en résistant aux efforts apportés par le mouvement de terrain (solution réservée aux petits glissements), soit en adaptant le mode de construction de sorte que les fondations soient dissociées du sol en mouvement.

Si ce type de solution n'est pas retenu, on est amené à conforter le talus avec l'une des techniques présentées dans les paragraphes ci-après. Dans cette étude, on propose une classification des systèmes de parades, basée sur leurs définitions et leurs types d'approches : douce et dure (figure 3.1). [5]

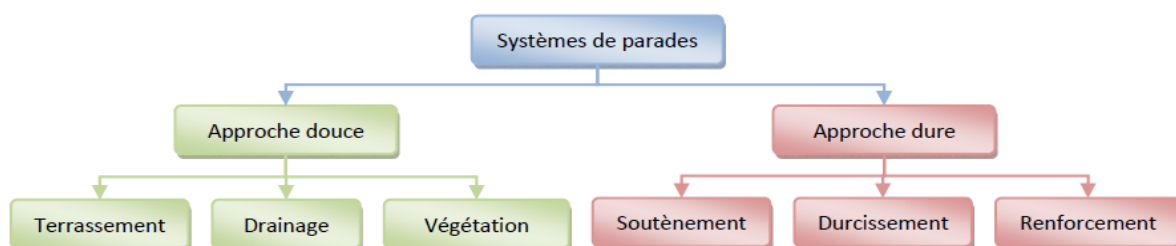


Figure 3.1 Systèmes de parades

3.2.1. Approche douce

Une approche douce se définit par l'utilisation de méthodes naturelles, esthétiques, et qui s'attaque directement aux facteurs d'instabilités. Les systèmes de parades qui utilisent cette approche sont représentés sur la figure 3.2.

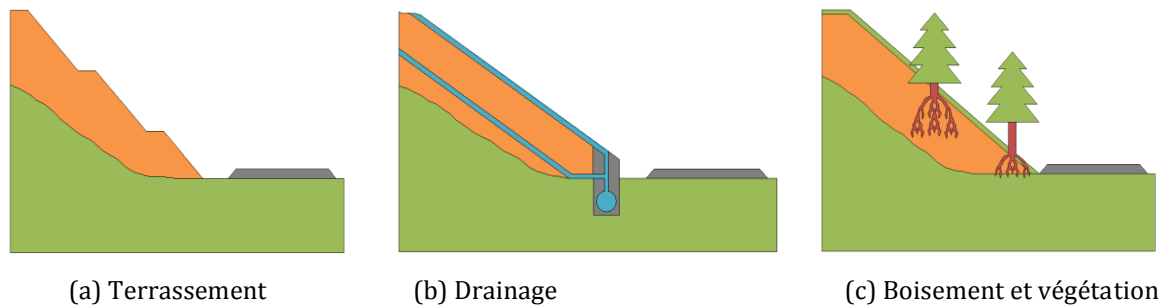


Figure 3.2 : Systèmes de parades par approche douce

3.2.1.1. Terrassement

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement reste un moyen d'action 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.

3.2.1.2. Drainage

Les techniques de drainage ont pour but de réduire les pressions interstitielles, au niveau de la surface de rupture. Les différentes techniques qui peuvent être mises en œuvre relèvent de deux options fondamentales : éviter l'alimentation en eau du site et expulser l'eau présente dans le massif instable. Pour cela, on utilise : les drainages de surface et les ouvrages de collecte des eaux, les tranchées drainantes, les drains subhorizontaux, les masques et éperons drainants, les drains verticaux, les galeries et autres ouvrages profonds. Ces techniques peuvent être utilisées seules, associées, ou en complément à d'autres systèmes de parades.

De nombreux paramètres conditionnent l'efficacité d'un système de drainage, en particulier la nature et l'hétérogénéité des terrains, la géométrie des couches aquifères, la perméabilité et l'anisotropie des sols, ainsi que les alimentations et les exutoires. Comme la plupart des ouvrages, les dispositifs de drainage nécessitent un entretien régulier qui, s'il n'est pas continuellement réalisé, peut leur ôter toute efficacité.

3.2.1.3. Boisement et végétation

La végétation (au sens large) signifie, l'utilisation d'arbres ou de plantations pour maintenir la stabilité du talus, Cette protection est utilisée pour les talus en sol meuble ou rocheux. La végétation peut aussi être utilisée comme protection de la surface des talus, contre l'érosion et l'infiltration des eaux pluviales.

3.2.2. 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 en 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 représentés par la figure 3.3.

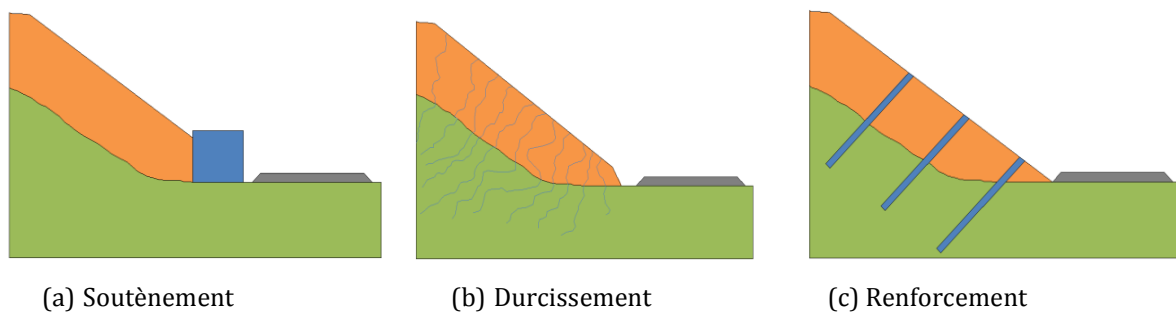


Figure 3.3 Systèmes de parades par approche dure

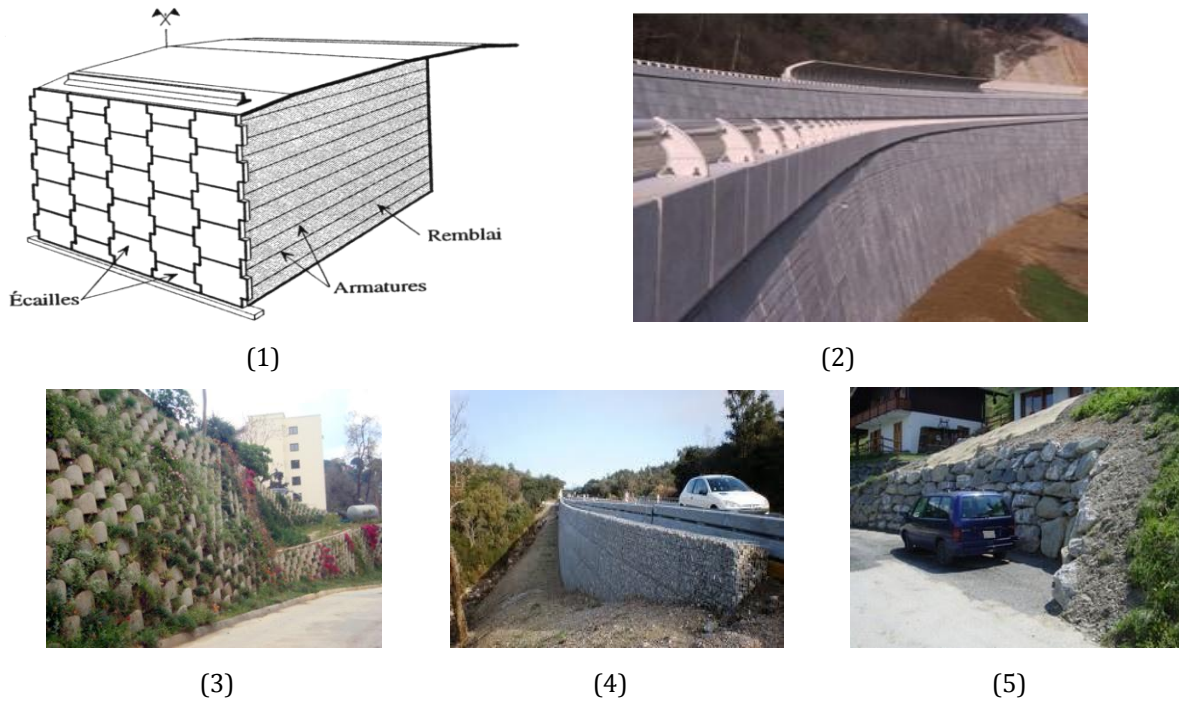
3.2.2.1. Soutènement

Le soutènement consiste à s'opposer au mouvement des talus en y apportant une résistance mécanique, par utilisation d'ouvrages souples ou rigides. Les ouvrages souples sont des structures obtenues à partir de gabions, de murs cellulaires...etc. Ces ouvrages fonctionnent comme des massifs poids. On les dimensionne en deux phases : vis-à-vis de la stabilité interne, et vis-à-vis de la stabilité externe. Ces techniques, qui admettent les déformations du sol, sont utilisées nettement plus couramment que les murs rigides.

Les ouvrages rigides ne sont pas les mieux adaptés à la stabilisation des talus, du fait de leur incompatibilité avec toute déformation ; en outre, le dimensionnement doit prendre en compte les efforts très importants engendrés par le mouvement du talus. Lorsque l'ouvrage est correctement ancré et suffisamment résistant vis-à-vis des efforts qui lui sont appliqués, il est fixe. La pratique est de dimensionner l'ouvrage en prenant en compte un effort limite de butée du sol en amont, qui est l'effort maximal apporté par les masses en mouvement.

Les différentes catégories de soutènement sont classées ci-après:

Ce type de mur assure la stabilité du système mur /sol par son poids propre .Le poids de mur peut contribuer a sa stabilité et a la reprise des poussées, sans subir des déplacements pouvant rompre le sol derrière (Figure 3.4). [12]



(1+2).mur en terre armé;(3).mur en caisson;(4).mur en gabion ;(5) mur en enrochement ;

Figure 3.4 : Quelques types de mur poids

3.2.2.2. Durcissement

Le durcissement consiste à modifier les propriétés physico-chimiques du talus. L'utilisation de cette dernière est très pratique, et cela dans certaines situations qui peuvent être difficiles pour l'utilisation des autres systèmes de parades, ou bien comme technique de stabilisation a court terme, le temps de réaliser un autre système de parade.

Parmi ces techniques on cite les techniques d'injection. La chaux est très utilisée pour l'amélioration de la qualité des argiles, elle peut modifier chimiquement les propriétés d'une particule durant une journée ou une semaine, cette réaction chimique réduit la plasticité du sol. La chaux peut aussi être utilisée avec les sols humides pour accélérer le processus de séchage. [12]

3.2.2.3. Renforcement

Le renforcement, tout comme le soutènement, consiste à s'opposer au mouvement des talus instables en y apportant une résistance mécanique.

La différence entre ces deux systèmes de parades est que dans les ouvrages de soutènement, le sol retenu ne participe pas à la stabilité de l'ouvrage, par contre dans les ouvrages de renforcement, une partie du sol à retenir participe à la stabilité d'ensemble de l'ouvrage en étant associée à des éléments structuraux.

En se basant aussi sur la définition des mots, un renforcement ou un durcissement est une façon de remédier à l'instabilité d'un talus sans que cela ne puisse être visible de l'extérieur, contrairement aux ouvrages de stabilisation par soutènement.

Le développement récent des techniques de renforcement est lié aux économies qui peuvent être réalisées, ainsi que le fait de pouvoir l'utiliser dans des espaces restreints (route sur montagne ou au bord des falaises). Ce type d'ouvrage, relativement flexible, peut s'adapter à tout type de sol de fondation. Ainsi, la préfabrication des éléments structuraux comme la rapidité de construction permettent d'économiser aussi bien sur les matériaux que sur la main-d'œuvre.

Le renforcement en géotechnique, désigne l'utilisation d'une très grande variété d'éléments associés au sol, que l'on classe généralement suivant leurs formes géométriques : unidimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle. En outre, un grand nombre de matériaux constitutifs sont possibles : béton armé, acier, fibres de verre, géotextiles et produits apparentés (matières plastiques), etc.

Verticalement sont soumis à un chargement combiné en compression, cisaillement et flexion. En stabilisation des pentes (renforcements verticaux), les efforts de cisaillement et de flexion sont les plus importants. En fondation, les renforcements verticaux travaillent le plus souvent en compression, tandis que ceux placés horizontalement travaillent le plus souvent en traction, et en flexion cisaillement s'ils sont assez rigides. [5]

3.3. RENFORCEMENT DES TALUS PAR CLOUAGE

Le clouage des talus consiste à fixer les masses instables sur le substratum à l'aide de groupes d'inclusions. Le terme clouage est utilisé comme terme générique pour désigner à la fois, les techniques de renforcement en soutènement par lits subhorizontaux d'inclusions, et celles en stabilisation des talus par rangées obliques ou verticales d'inclusions. Le renforcement par clouage, dit aussi par inclusion, a été largement employé durant les dernières années comme une technique de stabilisation des talus

instables. La raison en est qu'il soit plus facile et rapide à mettre en œuvre et qu'il n'affecte pas la géométrie du site.

Dans le renforcement par clouage, on distingue habituellement deux catégories d'inclusions, en fonction de l'inertie des armatures utilisées (clous et micropieux, Pieux et barrettes)

3.3.1. Clous et micropieux

La stabilisation d'un talus par des clous et micropieux repose sur le principe suivant:

La partie supérieure du massif en mouvement engendre une déformation des clous et les efforts qui en résultent sont transmis par les clous au substratum qui s'oppose alors au mouvement.

L'efficacité du clouage réside dans la mobilisation d'efforts de traction et de cisaillement dans le clou. Pour que ces efforts stabilisateurs soient mobilisés, il est nécessaire qu'il se produise des déplacements relatifs sol/clou. Le clouage a donc un effet progressif et des mouvements résiduels se produisent encore après le clouage.

Par ailleurs, on ne peut pas stabiliser par cette technique des glissements de grande ampleur, qui nécessiteraient l'introduction d'efforts considérables, générés par les pieux et barrettes. [5]

Par ailleurs, on ne peut pas stabiliser par cette technique des glissements de grande ampleur, qui nécessiteraient l'introduction d'efforts considérables, générés par les pieux et barrettes.

Dont l'élément de renforcement est constitué par une barre ou un tube d'acier de petit diamètre (20 à 40 mm) et qui, par suite de leur faible inertie, sont mis en place obliquement (figure 3.5) ou verticalement, avec une forte densité (environ un clou pour 4 m²).

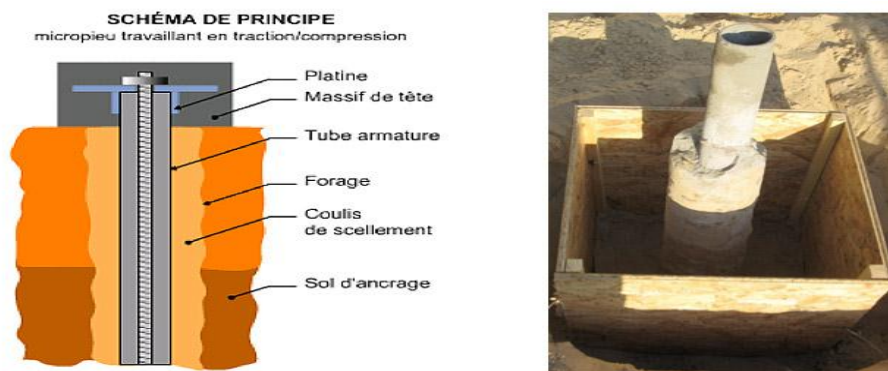


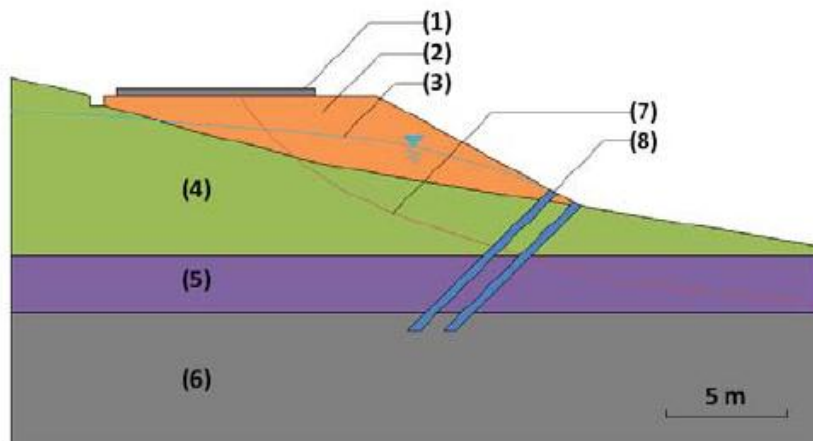
Figure 3.5 : schéma de principe micropieux

3.3.2. Pieux (métalliques ou en béton armé) et barrettes (palplanches, paroi moulée)

La stabilisation d'un talus par des pieux ou des barrettes procède du même principe que le précédent. Mais, compte tenu de leur inertie importante, les pieux travaillent principalement en flexion/cisaillement quand les clous de faible inertie travaillent en traction/flexion.

Généralement, on dispose deux ou trois rangées de pieux (tubes métalliques ou pieux en béton armé) dans le tiers central du talus instable.

Ce sont des éléments de grande rigidité (section allant de 0.5 à 3.0 m), placés verticalement, sur une ou plusieurs files en quinconce, pouvant être retenus en tête dans certains cas par une poutre de liaison et des tirants. [12]



(1) route, (2) remblai, (3) nappe, (4) (5) et (6) les couches de sol,
(7) surface de rupture, (8) clou

Figure 3.6 Clouage d'un talus instable

3.4. RENFORCEMENT PAR GEOTEXTILES

Les géotextiles appartiennent à la famille des géosynthétiques, terme générique désignant un produit dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel.

Il se présente sous forme de feuille, de bandelette ou d'une structure tridimensionnelle, utilisée en contact avec le sol ou avec d'autres matériaux dans les domaines de la géotechnique et du génie civil. (Figure 3.9). [13]



Figure 3.7: remblai avec la géosynthétique

3.5. CRITERES DE CHOIX D'UN SYSTEME DE PARADE

Le choix d'une méthode de stabilisation résulte de la prise en compte des conditions techniques (paramètres techniques du site et maîtrise de la mise en œuvre), ainsi que les contraintes économiques, sociopolitiques, environnementales et esthétiques. [5]

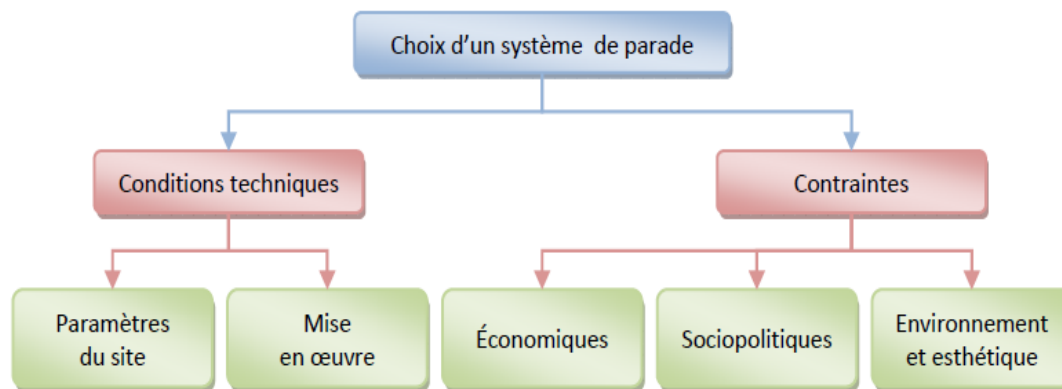


Figure 3.8 : Conditions et contraintes de choix d'un système de parade

3.5.1. Conditions techniques

La stabilisation des glissements très étendus ne peut pas être assurée par une seule structure ponctuelle (mur, pieux, etc.). Les glissements très actifs s'accommodent mal avec les techniques qui utilisent des éléments fragiles (drains, tirants, etc.). Dans le cas des coulées, les structures telles que les pieux ou tirants d'ancrages, ne peuvent empêcher la masse en mouvement de s'écouler. Il faut noter aussi que la compatibilité des déplacements du sol et des structures doit être prise en compte lors du choix des techniques de stabilisation.

En effet, dans le cadre de travaux de stabilisation de glissements de terrain très actifs, l'exécution des tirants précontraints n'est pas envisageable : les déplacements du sol conduiraient à la rupture des tirants. Il est préférable de construire, dans ces cas, des ouvrages qui supportent mieux les déformations (ouvrages de soutènement souples). Proposer un système de parade suppose que l'on maîtrise parfaitement non seulement ces limites d'utilisation, mais aussi sa mise en œuvre.

Pour cela, de plus en plus d'entreprise se spécialisent pour maîtriser une technique de stabilisation précise et ainsi obtenir une meilleure qualification.

3.5.2. Contraintes économiques

Les conclusions d'ordre technique doivent être mises selon un compromis qui devra tenir compte des considérations économiques (rapport efficacité/coût) telles que : le coût de la maintenance, les conditions locales relatives aux matériaux disponibles, des conditions météorologiques prévisibles pendant l'exécution des travaux, et du degré de stabilisation recherché.

3.5.3. Contraintes sociopolitiques

L'urgence des travaux, la rapidité d'exécution, les risques de rupture des ouvrages voisins, les problèmes d'emprises et les questionnements de la population doivent être pris en compte pour la bonne gestion du projet de stabilisation des talus.

Les techniciens doivent gérer des situations et conversations d'une manière plus diplomatique que technique. Il faut par exemple s'attendre, et cela arrive dans de nombreux cas, à ce que des décideurs s'opposent aux solutions présentées, en essayant d'en proposer une autre qui, selon eux, était efficace dans d'autres cas et circonstances.

3.5.4. Environnement et esthétique

L'approche douce est nettement plus appropriée vis-à-vis de l'environnement ; en effet l'utilisation des produits chimiques dans le cas des durcissements peut être nuisible sur l'écologie. L'esthétique doit aussi être prise en considération.

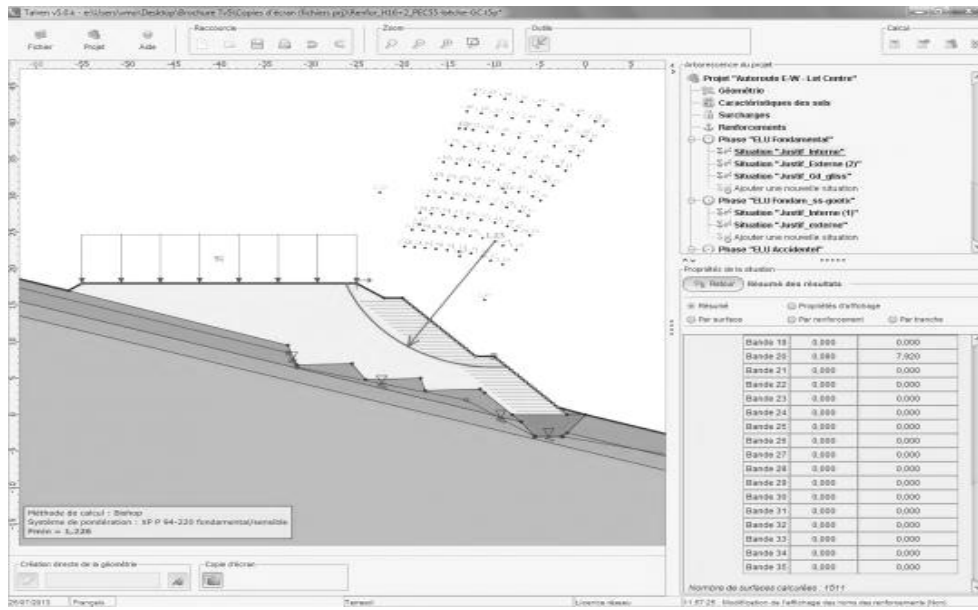
3.6. CONCLUSION

Il existe plusieurs méthodes analytiques pour résoudre ce problème d'instabilité des terrains et aller vers une solution ou un confortement adéquat, le choix de l'une ou l'autre méthode dépendra donc de la disponibilité des caractéristiques mécaniques et de la bonne appréciation qu'il est possible de faire de la position de la ligne de rupture critique.

Les différentes solutions envisageables sont examinées dans l'ordre d'une progressivité croissante des moyens mis en œuvre des solutions réparatrices (qui s'opposent aux conséquences de l'instabilité) aux solutions curatives (qui traitent la cause de l'instabilité), en allant des solutions les plus simples aux plus complexes. Le choix d'une méthode de stabilisation résulte de la prise en compte de :

L'analyse des paramètres techniques du site, la connaissance des techniques de stabilisation et les impératifs technico-économiques. La méthode retenue devra être le fruit d'un compromis entre ces trois aspects.

CHAPITRE IV:



E
T
U
D
E

P
A
R
A
M
E
T
R
I
Q
U
E

4.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on va effectuer une analyse quantitative du cas de glissement avant et après le confortement, par le code de calcul TALREN V 4.

A travers cela, on souhaite quantifier la stabilité en terme de coefficient de sécurité, et de comprendre la cinématique du problème.

4.2 PRESENTATION DU CODE DE CALCUL TARLEN

TALREN4 est un outil d'analyse de stabilité des ouvrages géotechniques avec ou sans renforcement. Il permet de vérifier la stabilité de talus naturels, remblai, barrages et digues, avec prise en compte de différents types de renforcement : tirants précontraints, clous, pieux et micropieux, géotextiles, géogrilles, terre armé et bandes de renforcement.

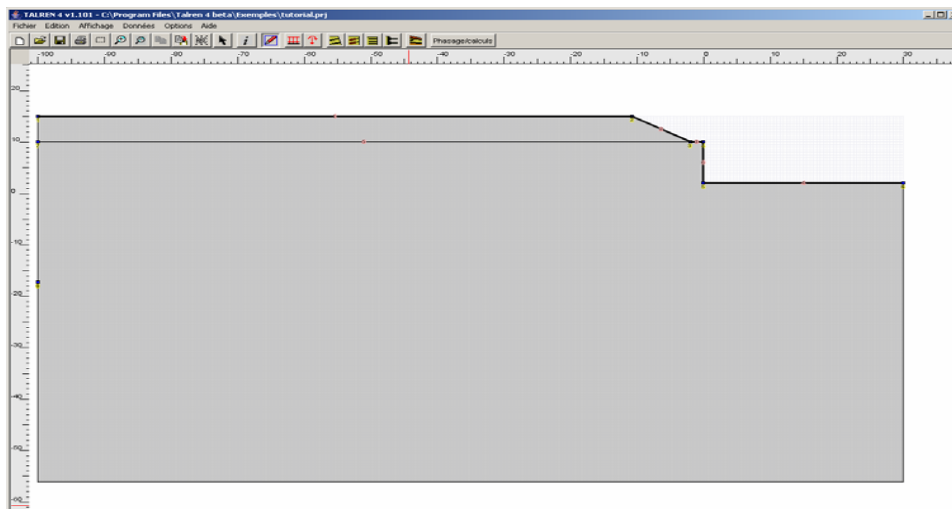


Figure 4.1 : interface de TALREN 4

4.2.1 Avantages de TALREN 4

- Gestion des phases d'exécution et situations de calcul d'un projet dans un seul fichier
- Tableaux récapitulatifs des données : couches de sol, surcharges et renforcements.

4.2.2 Méthode de calcul par TALREN 4

TALREN 4 s'appuie sur des méthodes analytiques éprouvées :

- Calcul d'équilibre limite selon les méthodes de Fellenius, Bishop ou perturbations.
- Prise en compte des sollicitations hydriques.
- Prise en compte des sollicitations sismiques selon la méthode pseudo-statique.
- Chaque inclusion (renforcement) peut travailler en : traction, compression, cisaillement, flexion.

- Combinaison de différents critères de rupture pour les inclusions et le sol afin d'évaluer l'effort maximal qui peut être mobilisé dans le renforcement (principe du travail maximal).

4.3 PRESENTATION DU PROJET

La présente partie de ce mémoire, traite la vulnérabilité du site sujet à des problèmes complexes d'instabilité mécanique, qui se situe sur la route nationale RN05, dans localité Boudouaou, dans la wilaya de Boumerdes.

La zone affectée concernée par l'étude se situe à l'ouest de la wilaya de Boumerdes, soit à 15Km environ de son chef-lieu, à proximité de la localité de Boudouaou.

La vue satellitaire « Google » suivante figure 4.2, présente la zone instable de la route nationale RN5 au PK35+800.



Figure 4.2 : Photo satellite "Google" du site RN 05 au PK35+800 - Boudouaou.

Le règlement parasismique algérien (RPA) a établi des règles, qui sont en fonction de l'intensité de l'action sismique de la région, pour tenir compte de la probabilité d'occurrence d'un séisme dans une région d'étude. Ces règles ont été révisées récemment après le séisme du 21 mai 2003 de Boumerdes, divisent le territoire Algérien en cinq (05) zones sismiques :

Tableau 4.1 : Classification des zones Sismiques en territoire Algérien.

N° zones	Intensité
Zone 0	sismicité négligeable
Zone I	sismicité faible
Zone II a et II b	sismicités moyenne
Zone III	forte sismicité

La figure 4.3 illustre la nouvelle carte de zonage sismique du territoire national. On remarque que la région de Boumerdes, comprenant le site étudié, de coefficient d'accélération de zone est de $A=0.35g$, choisi en fonction de la zone sismique « forte sismicité » du groupe d'importance de l'ouvrages (groupe 3) affecté par le glissement.

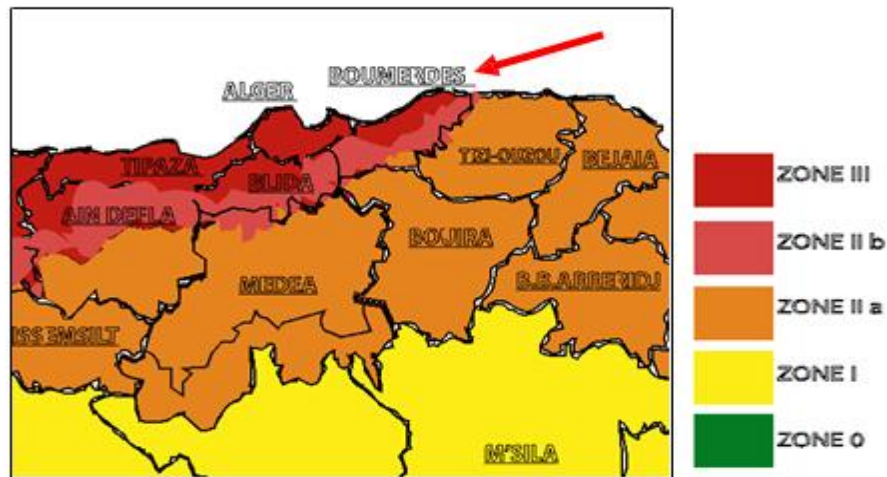


Figure 4.3: illustre la nouvelle carte de zonage sismique du territoire national

La route nationale RN 05 est d'une importance primordiale, son trafic est dense, et empreinte par tout type de véhicule que ce soit léger ou lourd. La zone affectée par le glissement de terrain est localisée sur la RN 05 au PK 35+800 dans la localité de la ville de Boudouaou.

Des désordres sont également visibles le long du talus en remblai, surface mamelonnée, ouvrages de soutènement (mur soutènement) ensevelis. Grande de risque sur les habitants et les utilisateurs de la route notionnel RN 05 (Thnia vers Alger) .par ce que il ya un voie fermée (troisième position). Dans ce qui suit nous essayons de faire une analyse globale de ce glissement et proposer une solution de confortement de la zone affectée par ces mouvements de terrain.

4.3.1 Description de glissement cas de notre étude

D'après les observations de terrain nous citons les dégradations suivantes :

- Renversement de trois (03) tronçons du mur de soutènement existant.
- Absence total de barbacanes sur les voiles.
- Absence d'un système de drainage derrière le mur.
- Dégradation importante au niveau du caniveau aval.
- Présence de nombreux escarpements,

- Présence de résurgences d'eau sur le remblai.
- Présence de gravats et de remblais décomprimés en amont du mur de soutènement.
- Absence de couverture végétale sur le talus.

4.3. 2 Caractéristique physique

Après l'étude des résultats d'essais in-situ et au laboratoire, on conclut que le terrain est hétérogène et composé de deux couches (remblai, marne), la figure 4.4 illustrée la coupe géotechnique de notre site.

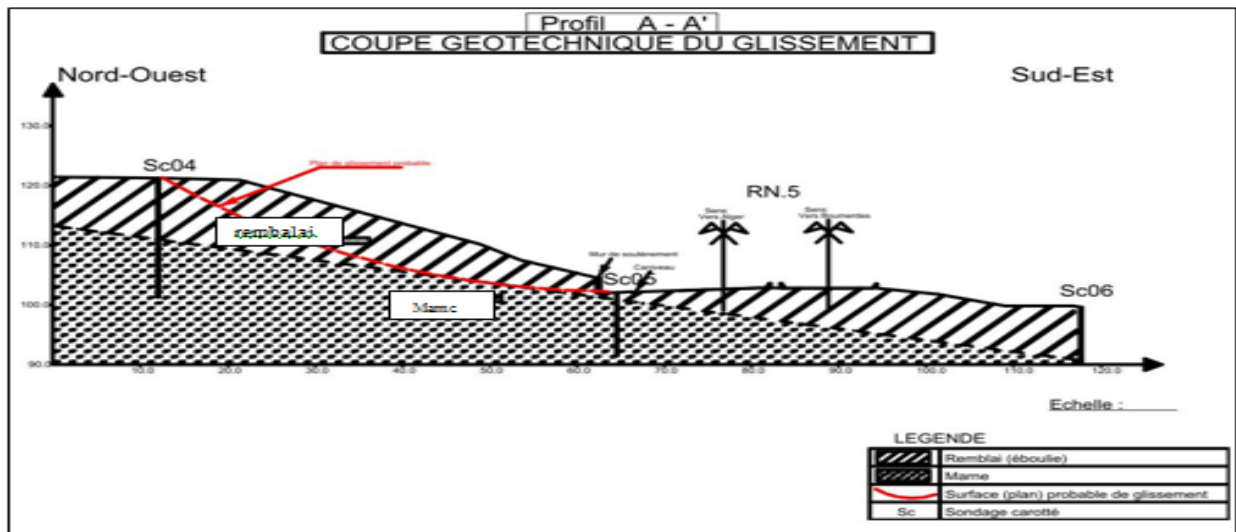


Figure 4.4 : profil type de calcul.

4.4 CALCUL ET VERIFICATION (CAS D'ETUDE)

4.4.1 Caractéristiques de cas d'étude

4.4.1.1 Caractéristiques des sols

Les méthodes de calculs du coefficient de sécurité sont basées sur les caractéristiques géotechniques des différentes couches qui constituent le terrain (cohésion "C", angle de frottement interne "φ", résistance au cisaillement "τ", poids volumique "γ".....etc.), la géométrie et la géomorphologie du versant instable.

Le terrain étudié est constitué de deux types de sol:

- **La couche de remblai dont les caractéristiques mécaniques sont:**

$$\varphi = 17^{\circ}, \quad \gamma = 19.5 \text{ KN/m}^3, \quad C = 5 \text{ KPa} ;$$

- **La couche de marne dont les caractéristiques mécaniques sont :**

$$\varphi = 5.16^\circ, \quad \gamma = 20.18 \text{KN/m}^3, \quad C = 53.67 \text{ KPa}$$

4.4.1.2 Caractéristiques géométriques de talus modélise

Tableau 4.2 : Le profil géotechnique

	N° point	X(m)	Y(m)
Profil	1	00	121.4
	2	12.13	121.25
	3	21.39	120.96
	4	62.7	101.99
	5	66.28	102.21
	6	93.94	102.21
	7	101.75	101.44
	8	0.00	111.40
	9	12.13	111.25
	10	62.70	99.89
	11	101.75	95.75

4.4.1.3 Modélisation des actions et des charges

La modélisation de l'effort sismique ce fait par insertion du coefficient d'accélération sismique A qui est pris égale à $0.35g$.

Plus exacte il faut introduire le coefficient d'accélération sismique horizontale et verticale, d'après le RPA 99 – 2003 :

$$K_h = 0.5A \text{ (%), } K_v = 0.3K_h \text{ (%).}$$

$$K_h = 0.175 \text{ (%), } K_v = 0.0525 \text{ (%).}$$

- Les surcharges dues au trafic routier sont modélisées comme des forces réparties verticalement de 20 kPa.
- La nappe est modélisée par une ligne d'un colore bleu.

4.4.1.4 Hypothèses de calcul

Plusieurs facteurs on été pris en compte pour l'évaluation du risque de glissement comme la variation du niveau de la nappe, la surcharge du trafic routier, le séisme et en fin le renforcement du talus.

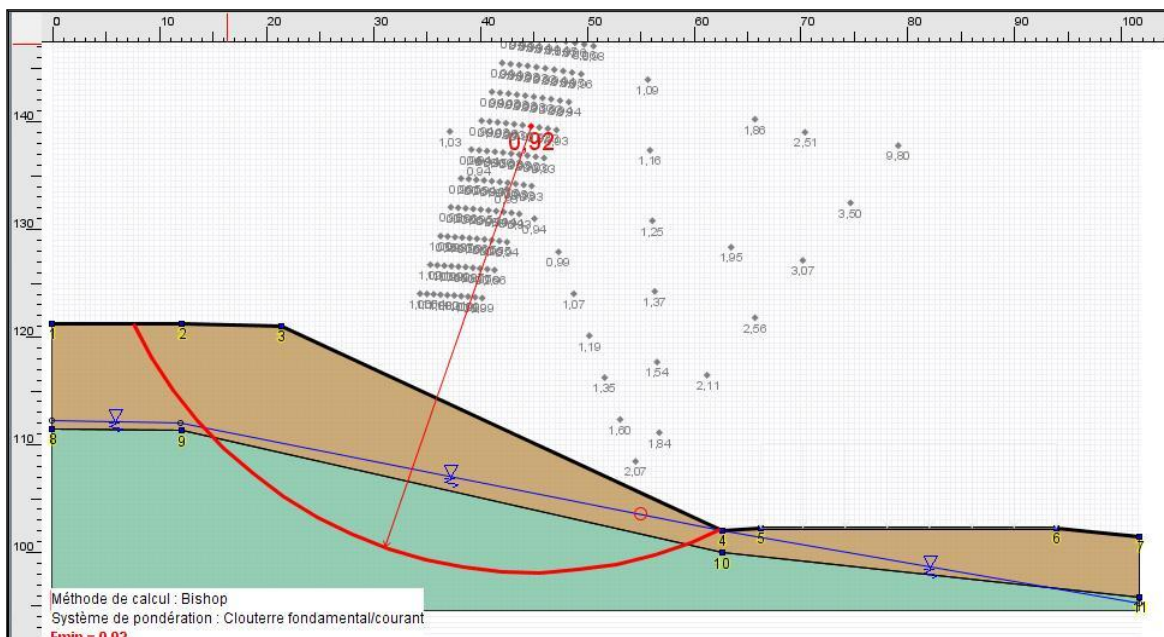
Les calculs sont faits on supposant une surface de rupture circulaire

4.4.2 EXECUTION DE CALCUL

L'analyse de notre cas, jouant sur la présence ou l'absence des surcharges routières et la présence ou l'absence permanente de la nappe ainsi l'effort sismique pour le calcul informatisé. Après la modélisation du talus et le calcul avec la méthode de Bishop, et de Fellenius les différentes simulations ont abouti aux résultats suivants:

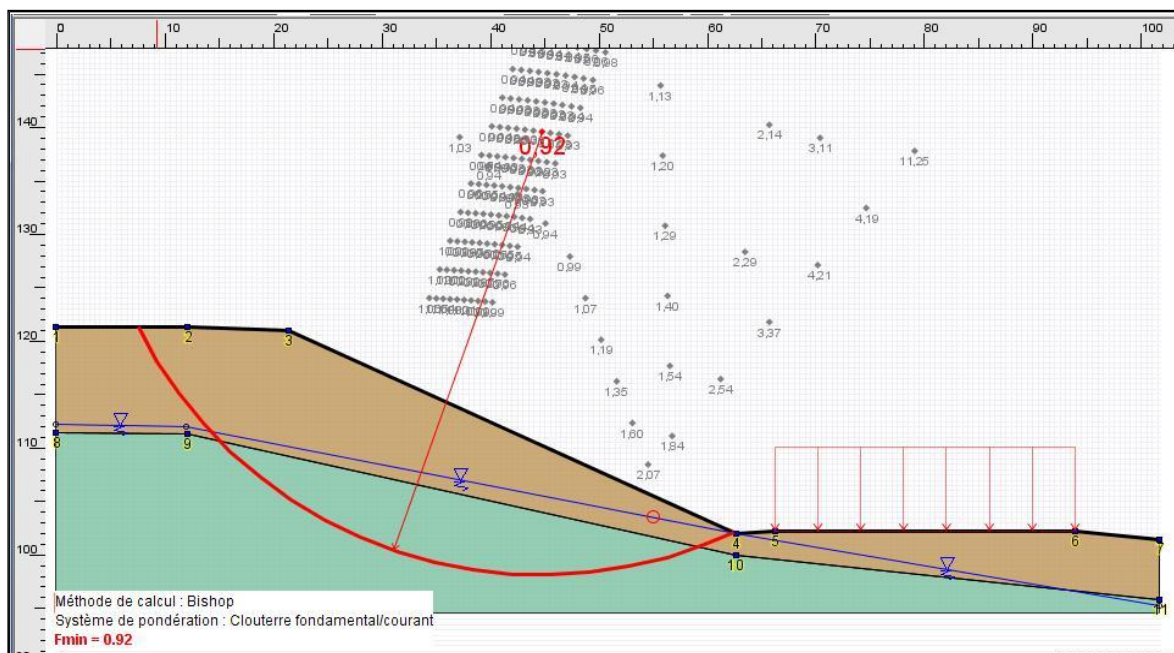
a) Méthode de Bishop

- Sans chargement :



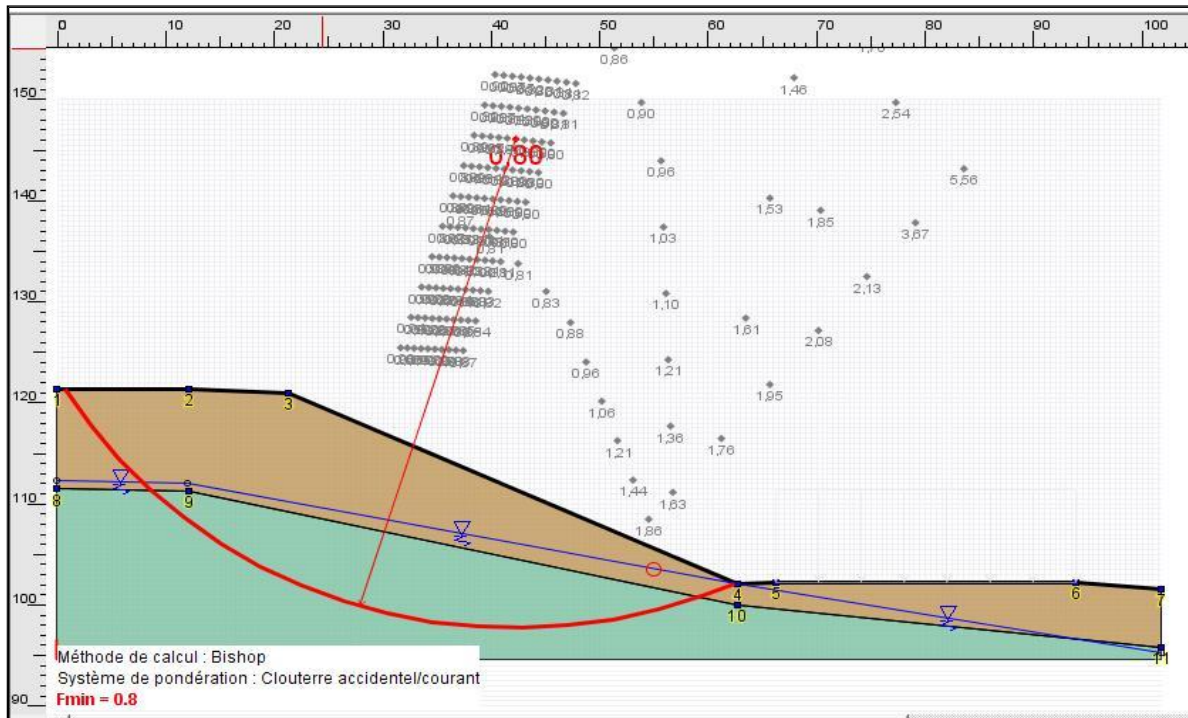
Le résultat trouver par le logiciel est **Fs = 0.92**

- Avec chargement



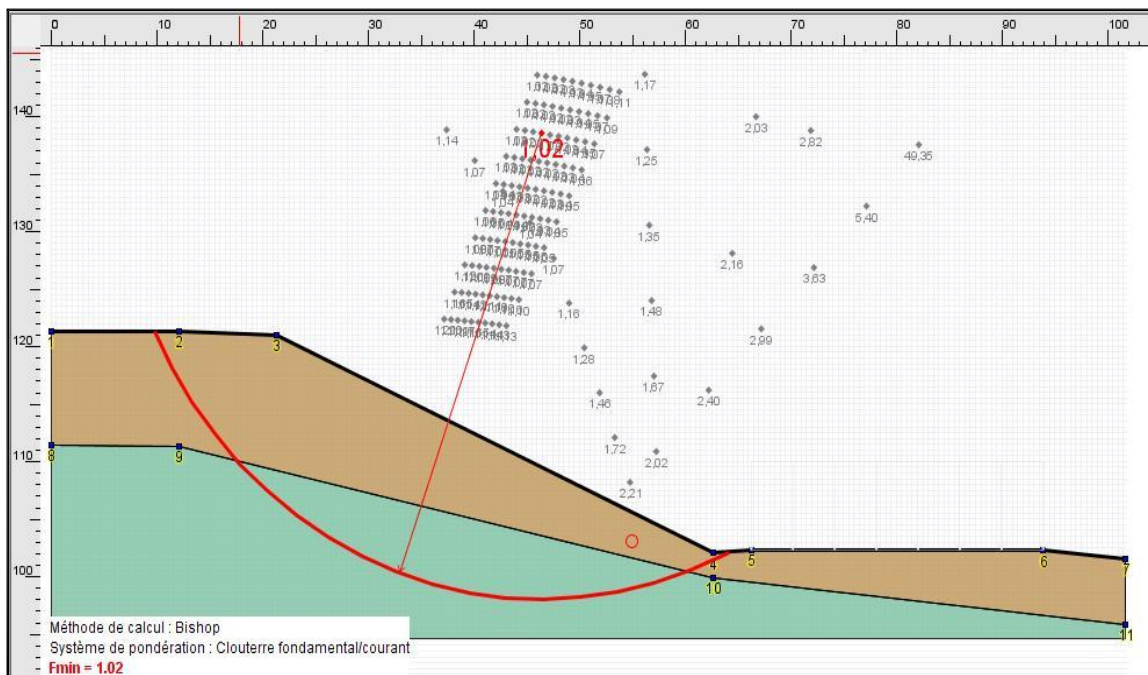
Le résultat trouver par le logiciel est **Fs = 0.92**

• **Sous sollicitation sismique :**



Le résultat trouvé par le logiciel est $F_s = 0.8$

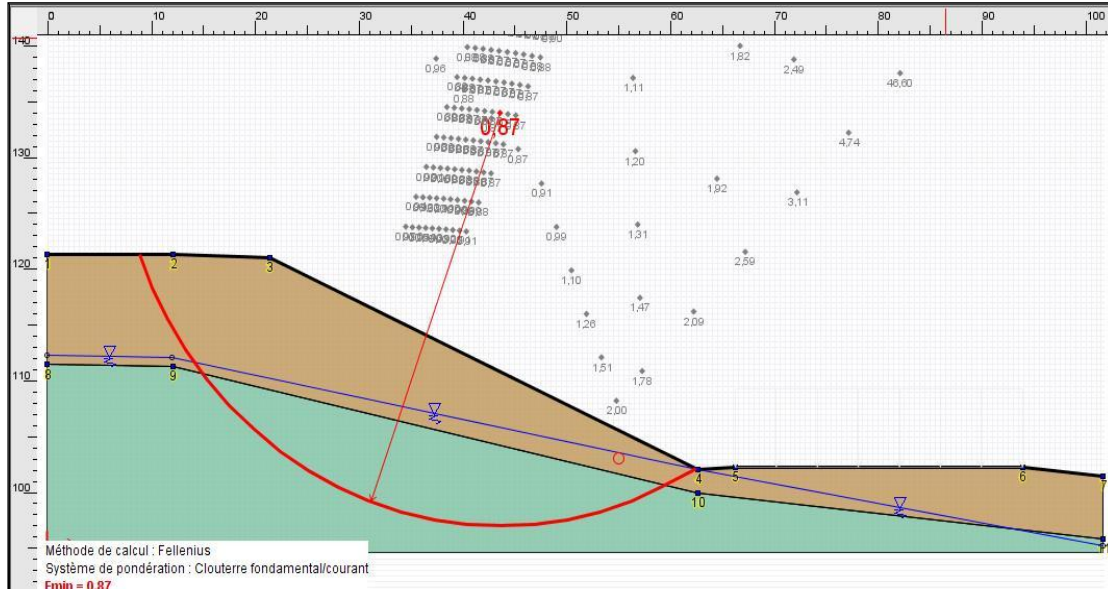
• **Absence de la nappe :**



Le résultat trouver par le logiciel est $F_s = 1.02$

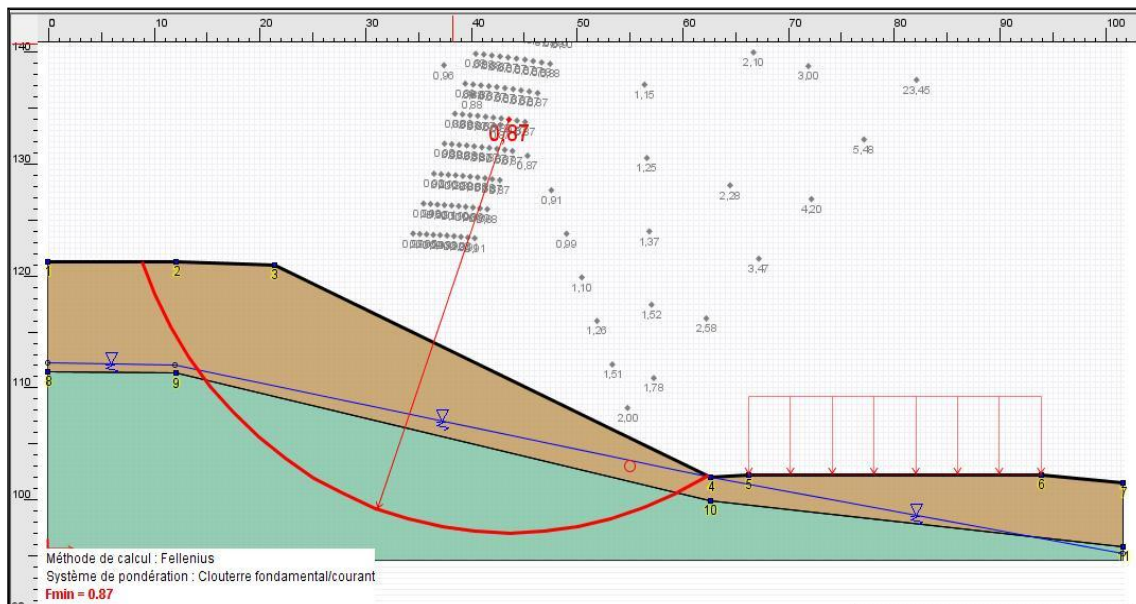
b) Méthode de Fellenius

- Sans chargement :



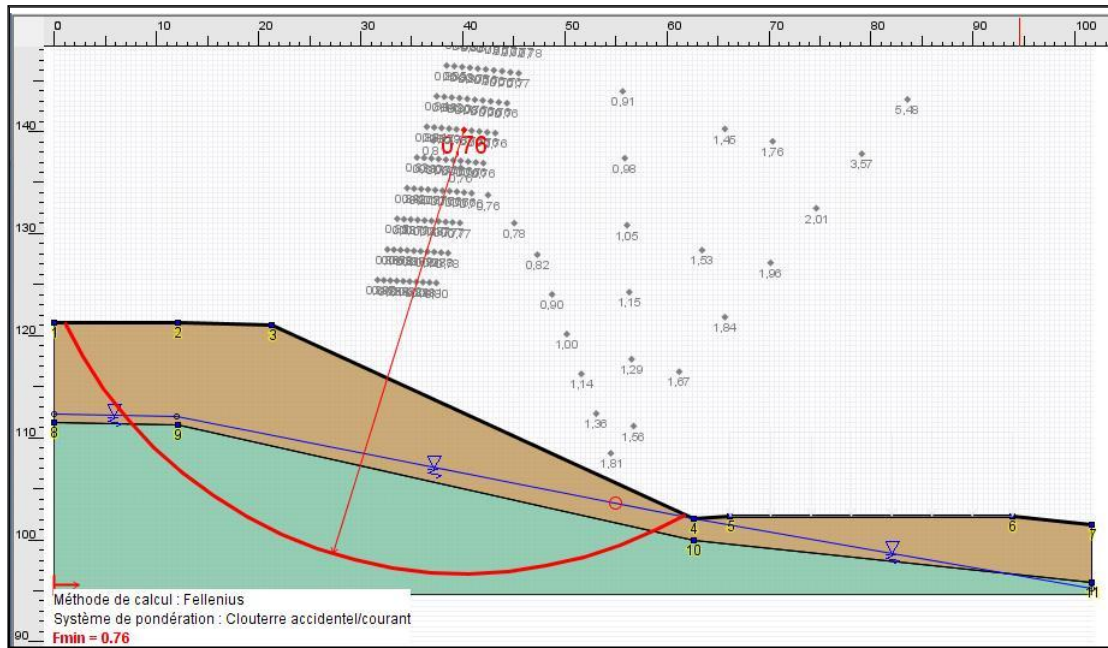
Le résultat trouver par le logiciel est $F_s = 0.87$

- Avec chargement :



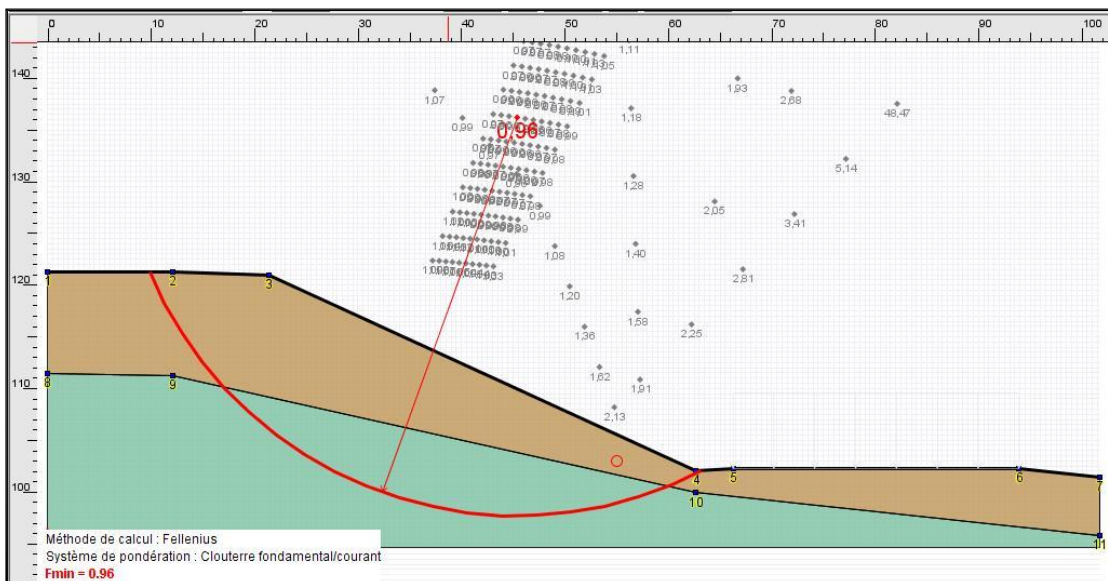
Le résultat trouver par le logiciel est $F_s = 0.87$

• **Sous sollicitation sismique :**



Le résultat trouver par le logiciel est **Fs = 0.76**

• **Absence de la nappe**



Le résultat trouver par le logiciel est **Fs = 0.96**

4.4.2.1. Récapitulation des résultats de coefficient de sécurité

Le tableau suivant 4.3 récapitule les résultats de coefficient de sécurité

Tableau 4.3: récapitulation les résultats coefficient de sécurité.

Les variantes	Méthodes de calcul	
	Bishop	Fellenius
Sans chargement	0.92	0.87
Avec chargement	0.92	0.87
Sous sollicitation sismique	0.8	0.76
Absence de la nappe	1.02	0.96

4.4.2.2. Interprétation des résultats de coefficient de sécurité

Les résultats des coefficients de sécurité ont donnés une plage de valeurs qui varient entre [0.76 1.02]. Ces valeurs sont inférieure à inférieure à un (< 1) sauf la valeur 1.02 dans la méthode de bishop à l'absence de la nappe, se qui représente l'instabilité de terrain.

On remarque que les deux méthodes ont donnés le même coefficient de sécurité $F_s=0.92$ et 0.87 , à l'état sans chargement et avec chargement (le chargement n'a aucun effet).

On remarque à l'état sous sollicitation sismique que le coefficient de sécurité diminué pour les deux méthodes.

A l'état de la l'absence de la nappe que nous remarquons le coefficient de sécurité augmente pour les deux méthodes, alors l'eau est un facteur principale de l'instabilité de notre site.

On remarque que pour les quatre variantes, le coefficient de sécurité de la méthode Fellenius est inférieure à la méthode de Bishop. Alors, pour être dans la sécurité, on opte pour établir les calculs suivants en utilisons la méthode de Fellenius.

4.4.2.3 CHOIX DE LA METHODE DE CONFORTEMENT

L'ensemble des données géologiques, morphologiques et géotechniques et les calculs effectuées pour déterminer le coefficient de sécurité F_s , confirme un mouvement de glissement de terrain. Cette instabilité à été provoquée par la nature du sol (remblai), la géomorphologie du site (la pente 42%) et les infiltrations des eaux de surface (débordement de source d'eau au pied du talus).

Pour traiter le glissement du versant de Boudouaou, exactement au pk 35+800, les dispositifs de confortement techniquement possible sont :

a) Mur sur pieux

La solution que nous pensons adéquate pour ce site, est un mur de soutènement en béton armé fondé sur des pieux. Ces pieux doivent être ancrés dans la couche de marne considérée comme le substratum. Donc, après décaissement du sol, le mur sera exécuté puis reconstitué

par un sol composé de couches successives et bien compactées. Ce mur jouera le rôle de soutènement pour les poussées des terres en amont, tandis que les pieux permettent d'empêcher tout risque de glissement profond pouvant entraîner le mur.

Dans notre cas, il est à remarquer que la ligne de rupteur se situ à plus de 15 m de profondeur par rapport la tête de talus.

b) Un remblai renforcé par des géosynthétiques

Les géotextiles possèdent plusieurs caractéristiques permettant de les utiliser, et pour notre cas c'est le drainage et le renforcement. Ils collectent et transportent les eaux pluviales et ils ont la capacité de résister pour améliorer les propriétés mécaniques du sol.

Une bonne analyse de ce problème, permet de conforter le talus par des nappes de géotextile assis sur le bon sol, par contre la première solution proposée est de soutenir le sol par un mur reposant sur une rangé de pieux.

Ces deux variantes seront modélisées à l'aide du logiciel de calcul TALREN V4.

4.4.3 RESULTATS DU FACTEUR DE SECURITE APRES LA CONFORTEMENT

4.4.3.1. Confortement avec mur sur pieux

Suite à l'étude d'instabilité du terrain qui montre l'existence d'un glissement potentiel dont la surface de rupture traverse les deux couches qui se trouvent aux dessus se le remblai, où la profondeur est approximativement à 15m de la tête de talus.

C'est la raison pour laquelle nous avons choisi une solution de confortement qui fait appel à des fondations profondes (pieux).

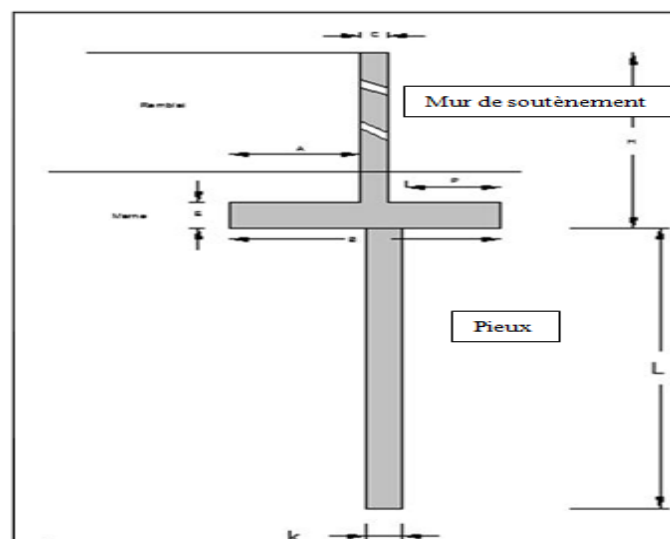


Figure 4.5 : Schéma de dimensionnement d'un mur sur pieux.

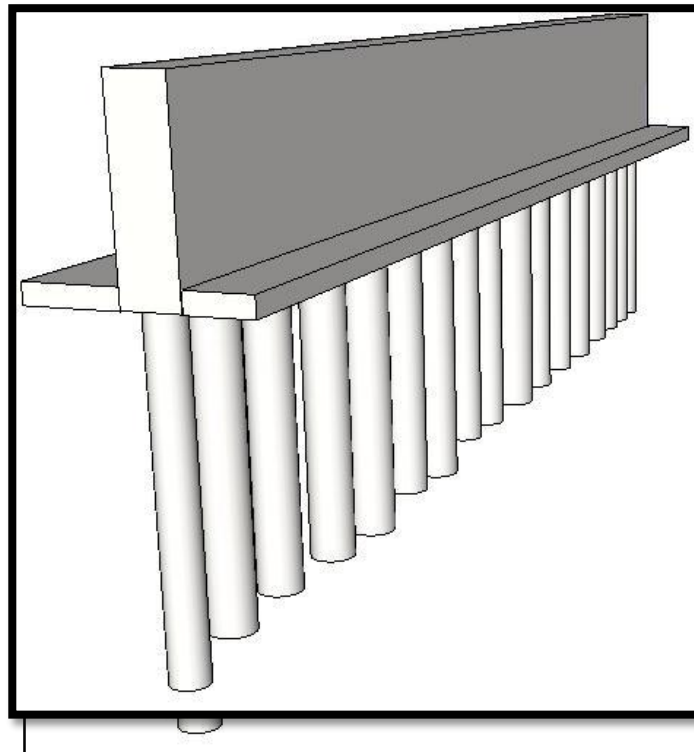


Figure 4.6 : Vue en trois dimensions.

Les dimensions d'un mur de soutènement :

Tableau 4.4: Les dimensions de mur de soutènement

Dimension	H	D	C	B	A	S	P	E	L	k
Valeur (m)	5	3	0.3	3	1	0.5	1.5	0.5	10	1

La longueur du mur est 140 m

En introduisant les dimensions dans logiciel TALREN, on obtient les résultats suivants

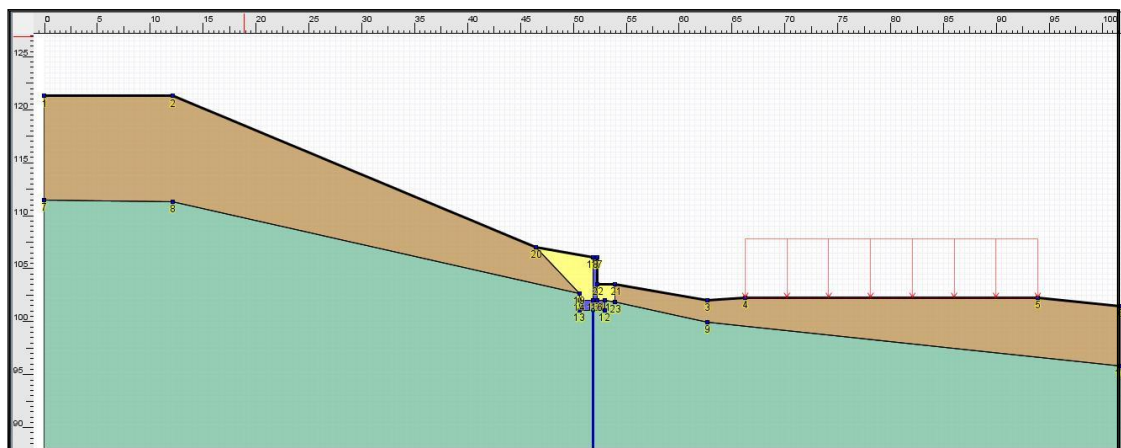
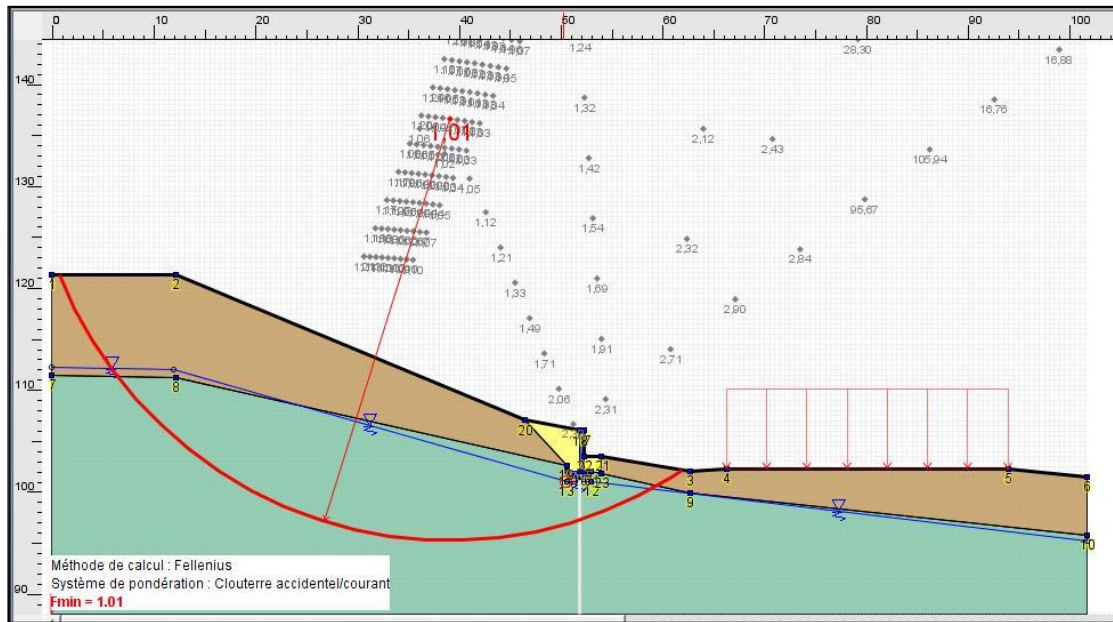


Figure 4.7: profil type de calcul renforcement par mur sur pieux

a) Confortement par mur soutènement

- Avec la méthode de Fellenius

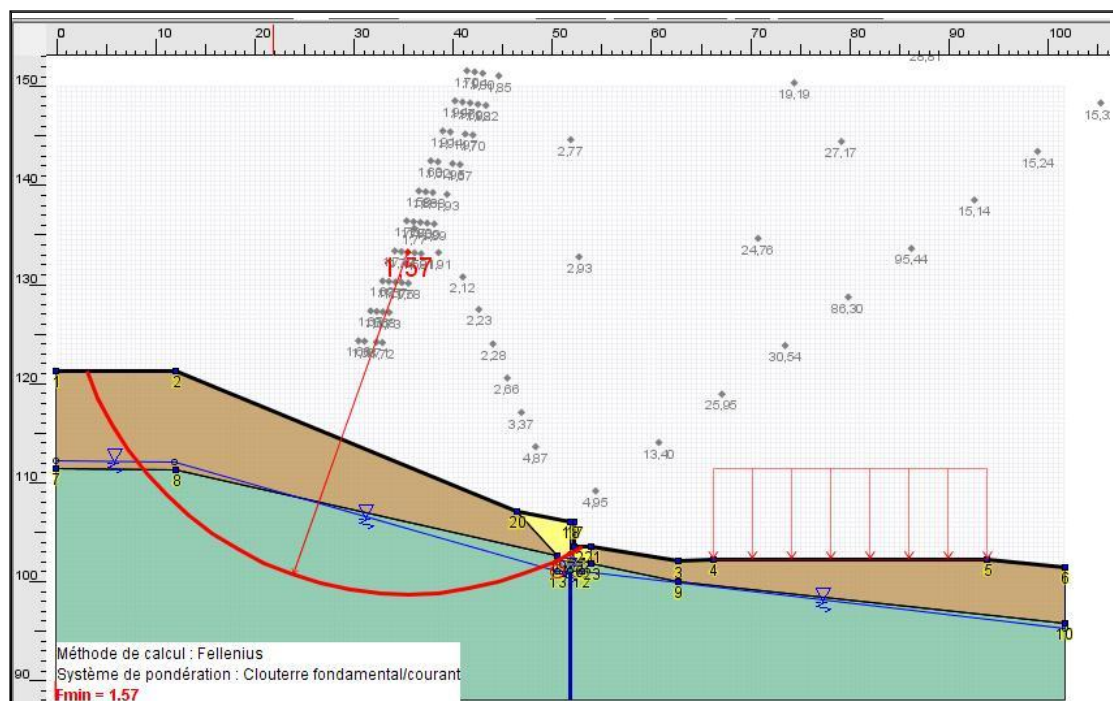


Le résultat trouver par le logiciel est $F_s = 1.01$

b) Mur sur pieux

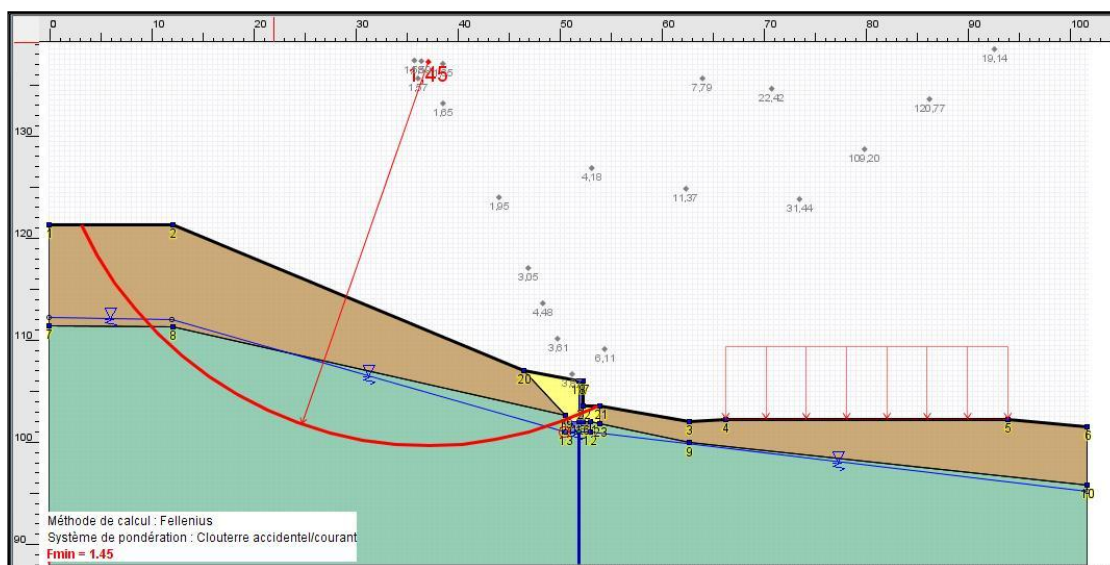
- Avec la méthode de Fellenius

- Sans séisme



Le résultat trouver par le logiciel est $F_s = 1.57$

- Avec séisme



Le résultat trouver par le logiciel est $F_s = 1.45$

c) Interprétation les résultats

A la première fois, les calculs du mur soutènement à donné le coefficient de sécurité $F_s = 1.01$, et la ligne de rupture passée au dessous de ce mur, se qui ne vérifie pas la stabilité, quant au renforcement du talus avec mur fondé sur pieux ont obtient un $F_s = 1.57$.

Les résultats obtenus montrent que le coefficient de sécurité calculé est supérieur à 1.5, ce qui signifie que le système de confortement choisi est efficace pour garantir la stabilité du tronçon au glissement dans le talus.

4.4.3.2. Confortement par géotextile

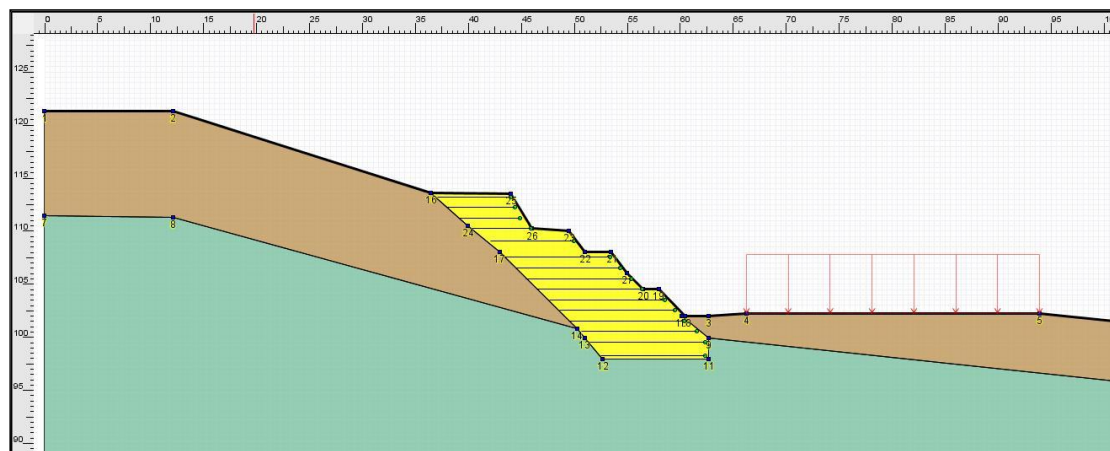
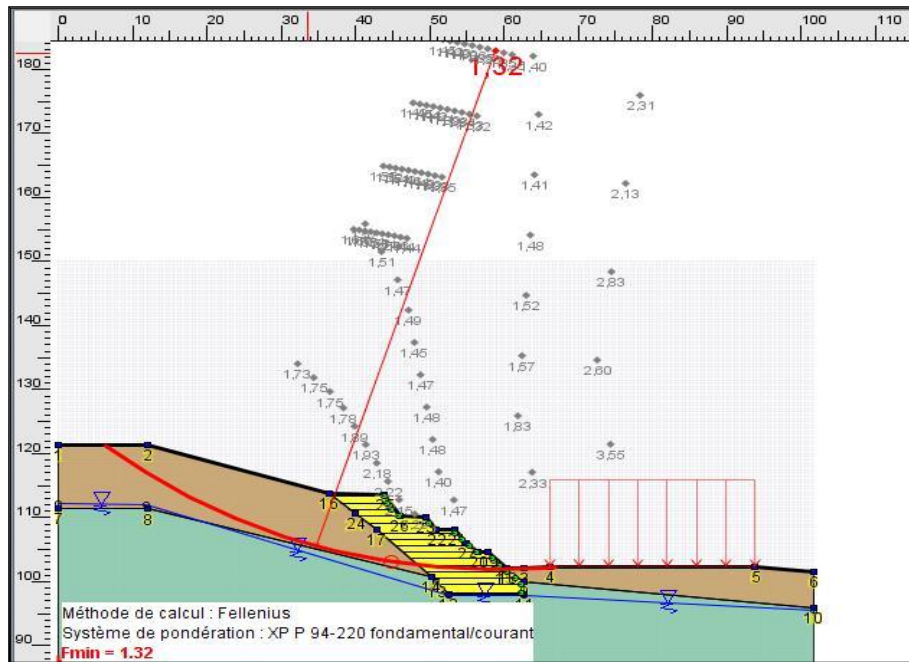


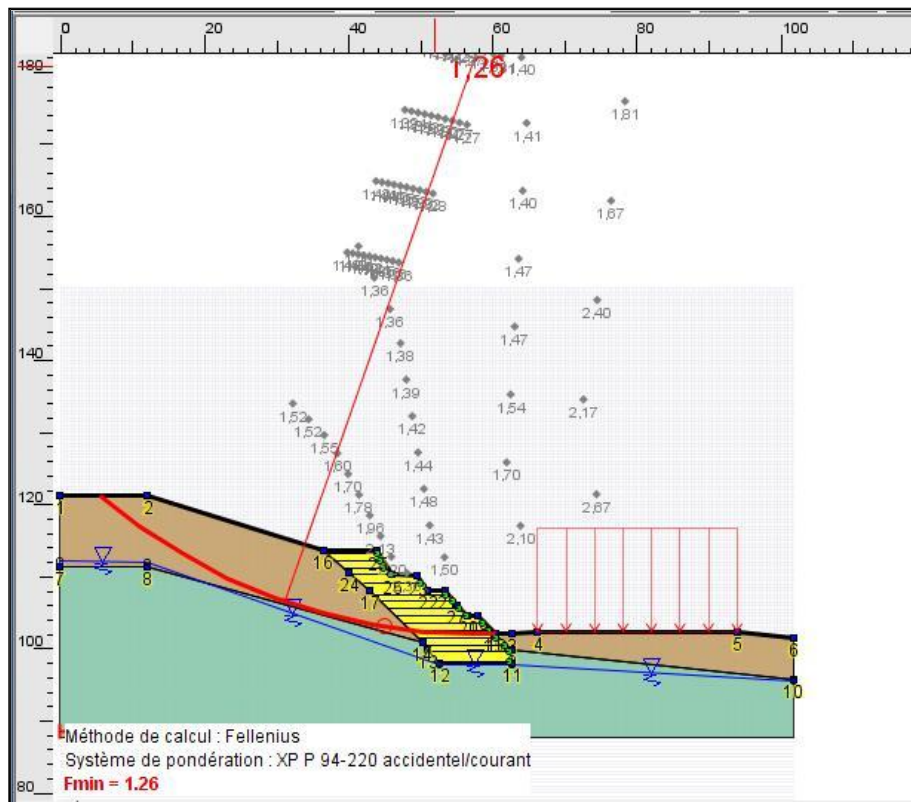
Figure 4.8: profil type de calcul renforcement par géotextile

- Avec la méthode de Fellenius :
 - Sans séisme :



Le résultat trouvé par le logiciel est $F_s = 1.32$

- Avec séisme :



Le résultat trouve par le logiciel est $F_s = 1.26$.

a) Interprétation les résultats après le confortement

Tableau 4.5: Récapitulative les résultats de coefficient de sécurité.

Les variantes	Méthode de confortement	
	Mur sur pieux	Géotextile
Sans séisme	1.57	1.32
Avec séisme	1.46	1.26

Les facteurs de sécurité obtenus d'après les calculs de stabilité, ont donné un facteur d'environ 1.5 pour la solution mur de soutènement sur pieux, et de 1.3 pour la solution du remblai renforcé par géogrilles. C'est résultats sont tous les deux satisfaisant, du point de vue stabilité a long terme. **Cependant, pour établir le choix final, le paramètre réalisabilité est à prendre en compte, car les deux solutions ne demande pas les mêmes catégories d'entreprise, et demande un savoir faire spécifique.**

4.4.4 ETUDE COMPARATIVE SUR LES DEUX SOLUTIONS

Afin de choisir la bonne solution qui sera adapté a notre site, une étude comparative (analyse multicritère) s'impose entre les deux variantes de confortement que nous avons proposé pour empêcher le glissement de la masse en mouvement.

Tableau 4.6: Étude comparative sur les deux solutions

Solution de confortement	Avantages	Inconvénients	Fs
Solution N°1 : « Talus conforté par mur sur pieux »	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de terrassement, - Assurer une bonne stabilité du tronçon routier, - Eviter toutes évolutions des déformations de la route (dispositif rigide). 	<ul style="list-style-type: none"> - Exécutions complexe et difficile (la nécessité du matériel spécial). 	1.57
Solution N°2 : « Talus conforté par géotextile »	<ul style="list-style-type: none"> - Améliorée les caractéristiques du sol, - Dispositif souple - Drainage et renforcement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Terrassement important. - Les nappes de géotextile présentent une mauvaise résistance à la compression - Renforcement à court terme 	1.32

4.5 CONCLUSION

Le principal intérêt de ce chapitre est de vérifier la stabilité du talus avec les différentes solutions de confortement pour ensuite faire une analyse paramétrique, afin d'aider au choix de la solution optimale du côté efficacité des traitements.

La stabilité du talus, selon le profil critique, n'est pas vérifiée à l'état actuel, tant en situation statique que sous sollicitation sismique avec un coefficient de sécurité F variant de 0.76 à 0.94 et ce, sans confortement, et après le confortement par mur sur pieux, géotextile obtient les résultats de coefficients de sécurité en suivant 1.56 et 1.32 à l'état normale et l'état accidentelle 1.46, 1.26.

Durant la procédure du renforcement du glissement de terrain, on a été confronté au choix de solutions qui sont le confortement par le mur de soutènement sur pieux, renforcement par géotextile, c'est cette dernière qui s'est montrée la plus crédible au glissement de notre terrain, de plus convient synthétiquement à l'environnement.

CONCLUSION GENERAL

La stabilité des talus et leur potentiel de rupture deviennent un souci lorsque les mouvements engendrés menacent dangereusement une population, ou auraient un effet sur la rentabilité et la valeur du secteur instable. Afin de remédier à ce type de problème, beaucoup de méthodes de calcul permettent de vérifier la stabilité en suivant une procédure générale, qui peut être utilisée comme guide méthodologique, et reste ouverte à toute amélioration et développement. Dans la plus part des cas, la recherche d'un système de parade reste indispensable.

Afin d'essayer de comprendre l'évolution cinématique du mouvement, on a jugé intéressant d'analyser le problème en utilisant la simulation numérique (réalité virtuelle). Pour cela, on a utilisé logiciel TALREN, un programme qui travail par la méthode des tranches, dimensions spécialement conçu pour faire des analyses de stabilité.

L'analyse quantitative réalisée avec ce code de calcul nous a permis de donner une réponse chiffrée en termes de coefficient de sécurité sur l'instabilité du talus.

Notre choix s'est porté, au tout début, sur un système de renforcement par un système des clouage et un autre système de renforcement par geotextile.

Les résultats obtenus après le calcul et l'étude paramétrique permettant une meilleure optimisation, ont montré que la pente peut être stabilisé.

Avec le choix de la méthode de confortement par les clous qu'on a montré qu'elle est la solution adéquate.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Philipponnat. G et Hubert. B (1998) Fondations et ouvrages en terre, édition Eyrolles, paris, 546p.
2. Bouafia. A (2009) conception et calcul des ouvrages géotechniques, édition pages bleus, Alger, 386 p.
3. Benyahia. M et Djilali Ben Fredj. S (2010) Analyse et modélisation d'un glissement de terrain.
4. Gide technique, Stabilisation des glissements de terrain, technique et méthode de LCPC, ISSN 1151-1516, 91p.
5. BEDR.S (2008) Modélisation et interaction renforcement-sol pour les talus instables,
6. DURVILLE.J-L et SEVE.G (1996), Stabilité des pentes, Glissement en terrain meuble, éditions Techniques de l'ingénieur, réf. C254, 16p.
8. Cassan M (1978) Les essais in-situ en mécanique des sols, Tome II : Applications et méthodes de calcul, éditions Eyrolles, Paris, 331 p.
7. Reiffsteck Ph (1972) Mécanique des Sols Avancée, Stabilité des pentes, Rapport du LCPC N°34, édition LCPC, 46p.
9. M'zoughem K et Chenafa W (2006) Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain El Kebira (Sétif), Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en géologie, Publications de l'Université de Sétif, pp : 18-42.
10. SMITH.G.N (1998), Elements of soil mechanics, édition Blackwell science, Great Britain, 494p.
11. BENAÏSSA.A, (2008) Glissements de terrain, calcul de stabilité, édition OPU, Ben-aknoun, alger, 95p.
12. FARIK. A et BOUDJEMA. I (2009) Stabilité des remblais de grande hauteur renforcée par géosynthétiques, 117p.
13. Benkiar. M , kiridi. K,(2008) glissement de terrain au pole urbain de Médéa, 97 p.