REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

ANALYSES PROBABILISTES DE STABILITE DE TALUS

Présenté par :

THELDJOUNE Zineb

HENNICHE Souria

Proposé et Dirigé par :

Mr. MESSAD. A

Mr. BOUHENNICHE. M-A

Promotion septembre 2020

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre DIEU miséricordieux qui nous a donné la volonté, la force et la patience à achever ce travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de prés ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur ***Mr. MESSAD Ali*** *pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée.*

Nous tenons à exprimer notre gratitude à l'enseignant ***Mr. BOUHENNICHE Mohamed amine.***

Nous remercions sincèrement Mr ***BELDJOUHAR Mohamed*** *pour les nombreuses explications qu'ils mous ont patiemment données.*

Nous remercions sincèrement tous les enseignants de l'université de MEDEA du département de génie de la matière en particulier génie civil qui a participés à notre formation.

Nous adressons les plus chaleureux remerciements et tout gratitude à tous nos amis chacun de son nom.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

Aux êtres les plus chers êtres au monde, ma mère et mon père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

À Tous Mes Frères et Sœurs surtout ***karima****.*

A la famille : THELDJOUNE, sans exception.

Je remercie A ma chère amie HENNICHE Souria

A mes amies in -DJAEIRY Faiza, BOUACHERIA Naima, SAKI Leila, ATTALLEH Ferial- sans exception.

A tout mes amies et surtout de option génie civil.

zineb

Dédicace

Il me fait le plaisir de dédier avec humilité ce modeste travail qui ne sera jamais réalisé sans l'aide de dieu le tout puissant.

Aux êtres les plus chers êtres au monde, ma mère et mon père qui m'ont donné l'amour, la tendresse et le soutien moral et matériel durant toutes les étapes de ma vie qu'Allah les gardes en bonne santé.

À Tous Mes Frères et Sœurs.

À mon marie Yousef ainsi que sa famille

À toute la famille sans exceptions.

À toutes mes copines surtout Zineb.

« Souria »

ملخص :

تعتمد طرق الحساب الحتمية المستخدمة حاليًا لتحليل استقرار المنحدر على قوانين سلوك التربة أو القيم الثابتة لعوامل الأمان المحسوبة دون مراعاة المصادر المختلفة لعدم اليقين مثل اختلاف المعلمات الجيوتقنية ، الأمر الذي يتطلب استخدام الأساليب الاحتمالية التي تعتمد على الاختلافات العشوائية.

يقدم هذا العمل تقييم ثبات المنحدر حسب طريقة الحساب الحتمية والطريقة الاحتمالية القائمة على قانون تغير المعالم ، مع .الجيوتقنية لزاوية الاحتكاك الداخلي والمتغيرات العشوائية التي تم تناولها في هذه الدراسة هي التماسك والكثافة والاحتمالية الأخذ بعين الاعتبار توزيع المعلمات وفقًا للقانون العادي ، تم إجراء تحليل احتمالي وفقًا لمفهوم الموثوقية بواسطة محاكاة مونت كارلو (SMC).

أخيرا، نقارن النتائج التي تم الحصول عليها بالطرق الحتمية مع نتائج الحساب الاحتمالي.
الكلمات المفتاحية: ثبات المنحدر ، التحليل القطعي ، التحليل الاحتمالي ، محاكاة مونت كارلو.

***Résumé*:**

Les méthodes déterministes de calcul actuellement utilisées pour l'analyse de la stabilité des pentes se basent sur des lois de comportement du sol ou des valeurs fixes. Les facteurs de sécurités calculés Sans prise en compte différentes sources d'incertitudes comme variation de paramètres géotechniques, qui nécessité l'utilisation de méthodes probabilistes qui dépendent de variations aléatoires.

Ce travail présente l'évaluation de la stabilité d'un talus, selon la méthode de calcul déterministe et la méthode probabiliste basée sur une loi de variation de paramètre géotechnique ,les variables aléatoires considérées dans cette étude sont la cohésion, masse volumique, l'angle de frottement interne et la masse , En considérant une distribution des paramètres suivant la loi normale, une analyse probabiliste a été faite suivant le concept fiabiliste par une Simulation de Monte-Carlo(SMC).

Enfin, nous comparons les résultats obtenus par les méthodes déterministes avec les résultats d'un calcul probabiliste.

Mots clés : stabilité des talus, analyse déterministe, analyse probabiliste, simulation Monte-Carlo.

Abstract:

The deterministic calculation methods currently used for the analysis of slope stability are based on soil behavior laws or fixed values. Calculated safety factors Without taking into account various sources of uncertainty such as variations in geotechnical parameters, which necessitates the use of probabilistic methods which depend on random variations.

This work présents the évaluation of the stability of a slope, according to the deterministic calculation method and the probabilistic method based on a law of variation of geotechnical parameter, the random variables considered in this study are the cohesion, density, the internal friction angle and mass, By considering a distribution of the parameters according to the normal law, a probabilistic analysis was made according to the reliability concept by a Monte-Carlo Simulation (SMC).

Finally, we compare the results obtained by deterministic methods with the results of à probabilistic calculation.

Keywords: slope stability, deterministic analysis, probabilistic analysis, Monte-Carlo simulation.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTIN GENERALE:..... **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre I: Généralité sur les remblais

I .1.Définition d'un remblai:..... **Error! Bookmark not defined.**

I **.2.Les Types de remblais:** ..... **Error! Bookmark not defined.**

I.2.1. Remblais Ordinaires : . ..... **Error! Bookmark not defined.**

I.2.2. Remblais particuliers : ..... **Error! Bookmark not defined.**

I .3. Les matériaux des remblais : ..... **Error! Bookmark not defined.**

I .3.1. Les sols : ..... **Error! Bookmark not defined.**

I .3.2. Les matériaux rocheux:..... **Error! Bookmark not defined.**

I .3.3. Les sous-produits industriels:..... **Error! Bookmark not defined.**

I .4.Conditions d'utilisation des matériaux en remblai : ..... **Error! Bookmark not defined.**

I.5.Problèmes spécifiques aux remblais sur sols compressibles : ..... **Error! Bookmark not defined.**

I .5.1 .Des problèmes de stabilité: ..... **Error! Bookmark not defined.**

I.5.2.Des problèmes de déformations:..... **Error! Bookmark not defined.**

I.5.3.Des problèmes d'éventuels désordres sur les ouvrages avoisinants : ... **Error! Bookmark not defined.**

I.5.4.Problèmes d'écoulement d'eau:..... **Error! Bookmark not defined.**

I.6.1.Description des techniques constructives des remblais :..... **Error! Bookmark not defined.**

I.6.2. Modifications du sol supportant le remblai : ..... **Error! Bookmark not defined.**

I .7. Les remblais de grande hauteur :..... **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre II: les méthodes de calcul de la stabilité de talus

II.1.Introduction :..... **Error! Bookmark not defined.**

II.2.Coefficient de sécurité : ..... **Error! Bookmark not defined.**

II..2.1. Notion de Coefficient de sécurité: ..... **Error! Bookmark not defined.**

II .3. Choix des caractéristiques mécaniques à prendre en compte : ..... **Error! Bookmark not defined.**

II.4.Le choix du type de méthode de calcul :..... **Error! Bookmark not defined.**

II .5 .Elément de base de calcul : ..... **Error! Bookmark not defined.**

II.6.Méthodes de calcul de stabilité de pentes: ..... **Error! Bookmark not defined.**

II.6.1.Méthodes d'équilibres limites : ..... **Error! Bookmark not defined.**

II.6.1.1.Les méthodes des tranches:..... **Error! Bookmark not defined.**

II.6.1.2.Méthode globale : ..... **Error! Bookmark not defined.**

II.6.2.Méthode des éléments finis: ..... **Error! Bookmark not defined.**

II.6.3.Les méthodes basées sur des abaques:..... **Error! Bookmark not defined.**

II.7. Limitations des méthodes d'équilibre limite: ..... **Error! Bookmark not defined.**

Conclusion: ..... **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre III : Approche de calcul par analyse probabiliste de la stabilité d'une pente

III.1.Introduction : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.2.les approches probabilistes : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.2.1.Arguments des promoteurs de l'approche probabiliste: ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.3.Variabilité spatiale des propriétés des sols : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III. 4.Variables aléatoires : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.Concepts de base de la méthode probabiliste : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.1.Indice de fiabilité (β):..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.2.Fonction de performance : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.3.La distribution de probabilité:..... **Error! Bookmark not defined.**

La fonction de densité de probabilité (PDF) : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.4. Le coefficient de variation (COV) : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.5.5.Probabilité de rupture (P*f*) : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6.méthodes approximatives pour la détermination de l'indice de fiabilité et la probabilité de rupture: ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6.1Méthode de fiabilité de premier ordre : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6.2.Méthode des deuxièmes moments de premier-ordre (FOSM) :..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6.3Simulation de Monte Carlo : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6.3.1.Traitement probabiliste avec la simulation de Monte Carlo :..... **Error! Bookmark not defined.**

III.6.3.2.Limitation de la simulation de Monte Carlo : ..... **Error! Bookmark not defined.**

III.7.Principes généraux des méthodes d'analyse probabiliste de la stabilité des pentes :**Error! Bookmark not defin**

Conclusion : ..... **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre IV : Présentation de code de calcul de talus SLOPE/W

IV .1. Introduction : 47

IV .2. Définition du logiciel :..... 48

IV2.1. L'interface du logiciel : ..... **Error! Bookmark not defined.**

IV.2.2. Introduction à l'utilisation SLOPE/W pour l'analyse probabiliste: 50

IV.3.Analyse probabiliste par méthode SMC..... 53

Conclusion : 55

Chapitre V : modélisation de calcule de cadre de stabilité de talus par SLOPE/W

V.1.Introduction :..... 56

V .2.Modélisation numérique :..... 56

V.2.1.Méthode déterministe d'équilibre limite :..... 57

V.2.2.Calcul probabiliste - Monte-Carlo simulation (MCS) :..... 58

Conclusion :..... **Error! Bookmark not defined.**

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Exemples de Remblai. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.2: Remblai ordinaire à TAMZGHIDA. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.3 : Remblais particuliers (remblai en zones inondables. remblai de grande hauteur, Remblai contigus). ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.4 : Extraction en couche. **Figure I.5 :** Extraction frontale. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.6 : Action sur la granularité. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.7 : Aération. **Figure I.8** : humidification**.** ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.9 : Traitement à la chaux **Figure I.10** : Traitement réactifs**.** ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.11: Compactage d'une couche de remblai. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I .12 : Rupture par poinçonnement. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.13 : Rupture par glissement rotationnel. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.14 : Tassement et déformation latérale de l'assise du remblai. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.15 : Exemple pour la construction du remblai par étapes. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.16. : Banquette du remblai. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.17: Surcharge temporaire. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.18 : Remblai allégé. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure 1.19 : Renforcement par géotextiles. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.20: Substitution du mauvais sol. (J.P MAGNAN, 2000). ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.21: Drains verticaux. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.22 : Consolidation atmosphérique. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.23 : Colonnes ballastées. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.24: Plots ballastés pilonnés. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I .25: Injection solide. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I .26 : Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I .27: Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.28 : Remblai sur inclusions rigides. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I.29: principe de l'électro-osmose. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure I .30: Remblai de grande hauteur. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure II. 1. Surface de rupture. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure II.2: Calcul par la méthode des tranches. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure II.3:Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche. **Error! Bookmark not defined**

Figure II.4: Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius. . **Error! Bookmark not defined.**

Figure II.5 : Equilibre d'une tranche de sol dans la méthode de FELLENIUS. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure II.6 : Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Bishop simplifie.**Error! Bookmark not defined.**

Figure II.7 : a) : forces sur la n éme tranche..... **Error! Bookmark not defined.**

b) polygone d'équilibre de force. Le facteur de sécurité est donne par la formule suivante:**Error! Bookmark not d**

Figure II.8:la représentation des forces horizontale sur une tranche. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure II.9: Forces appliquées sur une tranche pour la méthode de SPENCER. Les forces appliquées sur une tranche sont : ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure II.10 : Principe de la méthode globale..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.1: Définition de l'indice de fiabilité ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III.2: Arbre des méthodes approximatives d'analyse de fiabilité. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure III. 3: L'approche générale de la simulation de Monte-Carlo (Hutchinson et Bandalos,**Error! Bookmark not d**

Figure IV. 1 : Fenêtre de démarrage du logiciel Géo-studio 2012..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .2: Menus disponibles sur logiciel SLOPE/W. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .3: Affichage des informations des sols..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .4: Conditions complémentaires nécessaires pour le calcul..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .5: Géométrie du problème ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .6: Vérification des données du problème. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV.7: Création d'un nouveau projet sur SLOPE/W ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .8 : Choix de type du facteur de sécurité ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .9 : Spécification des surfaces de rupture ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .10 : Barre d'outils du logiciel SLOPE/W..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .11 : Création des matériaux dans l'outil SLOPE/W. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .12 : Définition des matériaux pour le calcul probabiliste ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .13 : Résolution du problème ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV .14 : Affichage des résultats de calcul probabiliste..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure IV.15 : Résultats de l'analyse probabiliste (Géo-Slope)..... **Error! Bookmark not defined.**

a)-sous forme d'une fonction de densité de probabilité ..... **Error! Bookmark not defined.**

b)- sous forme d'une fonction de distribution de probabilité..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure. V.1: Domaine de problème pour l'analyse de stabilité..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V.2 : Présentation de la surface critique de glissement..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V. 3: Paramètres probabilistes pour l'analyse . ..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V.5: Une fonction de densité de probabilité typique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V.6 : Une fonction d'échantillonnage typique..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V .7: FS déterministe et emplacement de la surface de glissement critique pour l'analyse probabiliste..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V.8 : Fonction de densité de probabilité..... **Error! Bookmark not defined.**

Figure V.9 : Fonction de distribution de probabilité. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Liste des tableaux

Tableau II.1:Différentes définitions d'un coefficient de sécurité…….23

Tableau II.2: les méthodes des tranches……34

Tableau V.1 : Données géotechniques de talus……..56

Tableau V.2: Résultats de calcul du facteur de sécurité Fs selon la méthode d'équilibre limite……..57

Tableau V.3 : Résultats probabilistes pour l'analyse probabiliste……...61

LISTE DES NOTATIONS :

Rt : hauteur totale du remblai à construire.

Hr : hauteur prévue au-dessus de la surface du terrain naturel pour atteindre le niveau fixé.

H1: Epaisseur maximale pour la résistance initiale du sol Pour la surcharge.

T : pourcentage de tassement prévu.

$\mathbf{C^{(0)}}$**:** la cohésion initiale du sol avant la construction du remblai.

H2 : Épaisseur maximale pour la résistance du sol après consolidation

Fs : Coefficient de sécurité.

$\boldsymbol{\tau_{max}}$**:** Résistance au cisaillement du sol.

τ: Contraintes de cisaillement..

γ : Poids volumique du sol.

C : cohésion du sol.

$\boldsymbol{\varphi}$ **:** Angle de frottement interne du sol.

$\boldsymbol{C_U}$ **:** Cohésion non drainées.

$\boldsymbol{\varphi_U}$**:** angle de frottement interne non drainées du sol.

$\boldsymbol{\varphi_{CD}}$ **:** Angle de frottement interne du sol.

C' : Cohésion effective du sol.

-$\boldsymbol{\varphi}$' : Angle de frottement interne effectif du sol.

$\boldsymbol{H_n}$ **:** Les efforts horizontaux inter-tranches.

$\mathbf{V_n}$ **:** Les efforts verticaux inter-tranches.

U : Pression interstitielle au milieu de l'arc de rupture de la tranche.

α : Angle entre l'arc de la tranche et le horizontale .

b : Epaisseur de la tranche .

W : Poids de la tranche.

T : Force tangentielle à la base de la tranche due à la contrainte.

N : Force normale à la base de la tranche due à la contrainte.

$\mathbf{E_i}$ **et** $\mathbf{E_{i+1}}$:Forces normales horizontales inter-tranche.

U : La pression interstitielle.

θi: l'angle formé par la résultante et l'horizontale.

f (Xi): la fonction de variation par rapport à la distance le long de la surface de glissement.

β : L'indice de fiabilité.

COV : Coefficient de variation.

μ : La moyenne de v variable.

E(F) : la valeur du facteur de sécurité.

σ(F) : l'écart type.

Pr : Fonction de performance.

X : est le vecteur des variables aléatoires.

g(X) : fonction d'état limite.

P_f : La probabilité de ruptureP_f.

INTRODUCTIN GENERALE

Jusqu'à présent, l'analyse de la stabilité des pentes est fondé sur une démarche déterministe classique .La méthode d'équilibre limite est l'une des plus techniques déterministe utilisée d'évaluation de la stabilité de remblai. Les techniques d'équilibre limite les plus courantes sont des méthodes de tranches où la masse du sol est divisée en tranches verticales.

Récemment, certains ingénieurs ont développé des approches fiabiliste pour l'analyse de la stabilité de pente. Qui permettant une meilleure prise en compte des risque de rupture des pentes aux différents paramètres aléatoires de propriété mécanique et physique des sols et évaluer une probabilité quantifiée de la ruine.

L'analyse probabiliste nécessite la fourniture les paramètres géotechniques prélevés des essais in situ et essais de laboratoires.qui permet de l'estimation de la limite inférieure du coefficient de sécurité. Dans le cas où une série de donnée est insuffisante pour l'estimation de la variabilité, .Duncan (2000) a proposé une règle pratique dite que les paramètres du sol sont pris dans un domaine de 3 écart-type de la moyenne comme le centre de la fonction de distribution probabiliste.

Ce travail a pour objectif de comparer les résultats obtenus par les méthodes déterministes avec les résultats d'un calcul probabiliste.
Cette thèse est structurée en cinq chapitres comme suit :

Chapitre1 : Généralité sur les remblais **leur** types et Les Conditions d'utilisation des matériaux en remblai ainsi que les Problèmes spécifiques aux remblais sur sols compressibles.

Chapitre 2 : on a voir Les principales méthodes de calcul de la stabilité des talus, d'équilibre limite, Les méthodes des éléments finis Et un aperçu sur Les méthodes basées sur des abaques.

Chapitre 3: concerne l'analyse probabiliste de calcul de stabilité de pente par la simulation de Monte-Carlo, les concepts de base et les étapes de traitement probabiliste dans le calcul de stabilité des talus

Chapitre 4: initiation aux principes fonctionnement, de calculs et domaines d'application du code Géo-Slope.

Chapitre 5 : est consacré à une étude comparative de calcul de stabilité parles méthodes déterministes d'équilibre limite et la méthode probabiliste par Simulation de Monte-Carlo de l'analyse de stabilité des talus, à l'aide de logiciel SLOPE/W, on a traité le cas de talus.

Enfin, on a terminé avec une conclusion générale permettant de synthétiser les principaux résultats obtenus, et d'envisager une perspective future de recherche.

Chapitre I : Généralité sur les remblais

I.1. Définition d'un remblai:

Un remblai est un ouvrage à base de terre qui provient de la mise en place de matériaux pour faire des levées, soit pour aplanir le terrain naturel soit pour combler une cavité. Il doit satisfaire à des critères de performance élevés, car ils seront appelés à supporter les charges de bâtiment, d'ouvrages routiers ou autres. Il ne devra donc s'y produire aucune rupture et le tassement ne devra pas en compromettre la stabilité. [1]

La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux qui le composent et de leur mise en œuvre. Les matériaux, issus des déblais du site ou d'un emprunt, doivent être mis en place à une teneur en eau correcte (pour assurer une portance suffisante) et compactés (pour garantir leur stabilité).



Figure I.1 : Exemples de Remblai.

I.2. Les Types de remblais: [2]

Selon le GMTR on distingue deux types de remblai dans les travaux routiers :

I.2.1. Remblais Ordinaires : (dont la hauteur ne dépasse 15 m) .



Figure I.2: Remblai ordinaire à TAMZGHIDA.

I.2.2. Remblais particuliers :

a) les remblais en zones inondables.

b) les remblais de grande hauteur (dont la hauteur dépasse 15m).

c) les remblais contigus aux ouvrages.



a) **b)** **c)**

Figure I.3 : Remblais particuliers (remblai en zones inondables. remblai de grande hauteur, Remblai contigus).

I .3. Les matériaux des remblais : [3]

Les matériaux utilisés pour les corps de remblai se répartissent en trois catégories : les sols, les matériaux rocheux et les sous-produits industriels.

I .3.1. Les sols :

Les sols sont des matériaux naturels provenant de la destruction mécanique et / ou physico-chimique des roches. Ils sont constitués de grains de dimensions très variables, de quelques

micromètres à quelques décimètres, pouvant être séparés aisément par simple trituration ou éventuellement sous faction d'un courant d'eau. Les sols sont de nature et d'origines géologiques très diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, ébouais de pentes.
Les possibilités d'emploi d'un sol pour la construction des remblais sont contrôlées par deux éléments essentiels : la nature et l'état hydrique, qui constituent le support de base de la classification des sols utilisée en F rance [GTR, septembre 1992].

I .3.2. Les matériaux rocheux:

Nous pouvons distinguer deux types de matériaux : les matériaux sains, qui se caractérisent par le fait que leur granulant peut être considérée comme travaux ou au cours de la vie de l'ouvrage. Comme matériaux rocheux non évolutifs, nous définitive une fois l'extraction réalisée, et les matériaux rocheux évolutifs.

Le caractère évolutif du matériau est caractérisé par le changement de structure sous l'effet des engins au cours des travaux ou au cours de la vie de l'ouvrage. Comme matériaux rocheux non évolutifs, nous pouvons citer le granite et le basalte, et comme matériaux évolutifs, nous pouvons citer les marnes et la craie. Il faut toutefois être conscient qu'il existe le plus souvent une transition continue entre matériaux sains et matériaux évolutifs.

I .3.3. Les sous-produits industriels:

Ce sont des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois, les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée.

Les principaux sous-produits industriels utilisés dans la construction des remblais routiers en France [GTR, septembre 1992] sont les cendres volantes, les schistes houillers, les mâchefers d'incinération des ordures ménagères…

I .4.Conditions d'utilisation des matériaux en remblai : [1]

Les conditions d’utilisation en remblai présentées dans les tableaux se groupent en rubriques symbolisées par une lettre.

E : Extraction,

G : Action sur la granularité,

W : action sur la teneur en eau,

T : Traitement,

R : Régalage,

C : Compactage,

H : Hauteur des remblais

E : Extraction :

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais dans la mesure où :

- l'extraction en couche (d'épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux.

- l'extraction frontale se caractérise évidemment par des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans les formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.



Figure I.4 : Extraction en couche.



Figure I.5 : Extraction frontale.

G: Action sur la granularité:

Dans cette rubrique sont envisagées différentes actions visant à modifier la granularité du matériau entre son extraction et la fin de sa mise en remblai. Parmi ces actions figurent :

- l'élimination des éléments > 800 mm : Cette valeur constitue en effet une limite. Maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement.

- l'élimination des éléments > 250 mm : Cette valeur constitue la dimension maximale des blocs permettant encore un malaxage du sol avec un agent de traitement,

- la fragmentation complémentaire après extraction : Cette modalité s'applique aux matériaux rocheux évolutifs. L'objectif recherché est d'obtenir un matériau ayant à la fois un D compatible avec les compacteurs utilisés et une courbe granulométrique la plus étalée possible de manière à prévenir au maximum ses possibilités d'évolution à long terme. Cette condition implique évidemment l'élimination des éléments > 800 mm.



Figure I.6 : Action sur la granularité.

W : Action sur la teneur en eau :

Il s'agit des différentes mesures pouvant être prescrites pour modifier l'état hydrique des matériaux et notamment : l'aération par conditions météorologiques favorables ou l'humidification.

Pour ce qui concerne l'humidification, il convient de distinguer deux modalités. La première consiste en un arrosage simple durant la mise en œuvre et deuxième modalité Vise quant à elle, le changement d'état hydrique du matériau.



Figure I.7 : Aération.



Figure I.8 : humidification.

T: Traitement :

Cette rubrique concerne les actions de traitement des matériaux avec de la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels éventuellement). Avec des sols fins moyennement ou très argileux,



Figure I.9 : Traitement à la chaux



Figure I.10 : Traitement réactifs**.**

R : Régalage :

Cette notion d'épaisseur de régalage est cependant très importante pour la qualité de la mise en oeuvre. On peut être amené à imposer pour une classe de matériau donnée un régalage en couche mince indépendamment des considérations liées au compactage, par exemple pour :

- garantir l'obtention de la fragmentation complémentaire de certains matériaux rocheux évolutifs,
- rechercher une mise à profit maximum de la situation météorologique (aération ou humidification des matériaux).

C: Compactage:

Trois niveaux d'énergie sont distingués : faible, moyen, intense



Figure I.11: Compactage d'une couche de remblai.

H: Hauteur des remblais:

L'existence de cette rubrique tient au fait que les possibilités d'utilisation des matériaux sont fonction de la hauteur du remblai.

I.5. Problèmes spécifiques aux remblais sur sols compressibles : [4]

Les sols compressibles en assise de remblais peuvent engendrer quatre types de problèmes particuliers : de stabilité, de déformations, d'efforts parasitaires sur les ouvrages voisins et de perturbation de l'écoulement des eaux

I .5.1 .Des problèmes de stabilité:

La mise en place d'un remblai sur sol mou entraîne une augmentation des contraintes au sein de ce sol. Si cet accroissement des contraintes dépasse un seuil critique qui dépend des caractéristiques mécaniques du sol, ce dernier se rompt en cours de construction en provoquant un affaissement important et brutal du remblai. Parallèlement à cet affaissement, il se produit des déformations du sol porteur qui se traduisent par des soulèvements importants du terrain naturel autour du remblai.

-Deux modes de ruptures potentiels peuvent être envisagés :

A-Rupture Par poinçonnement:

Ce mode de rupture est marqué par affaissement généralisé du remblai et une pénétration de ce dernier dans le sol support, occasionnant ainsi des bourrelets de terre qui se forment de part et d'autre des talus en raison de la réaction par soulèvement du terrain naturel.

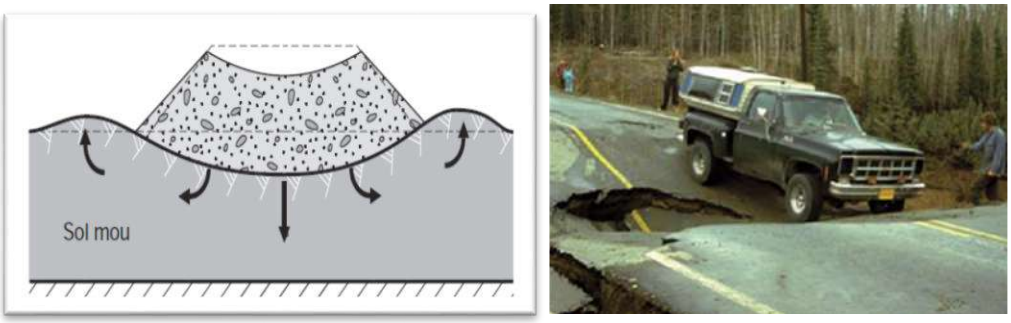


Figure I .12 : Rupture par poinçonnement.

B-Rupture De type circulaire (glissement rotationnel) :

Il se caractérise par un enfoncement localisé et partiel du remblai, en raison de déplacement d'une partie du remblai et du sol support le long d'une surface de rupture assimilée généralement à une courbe circulaire**.**

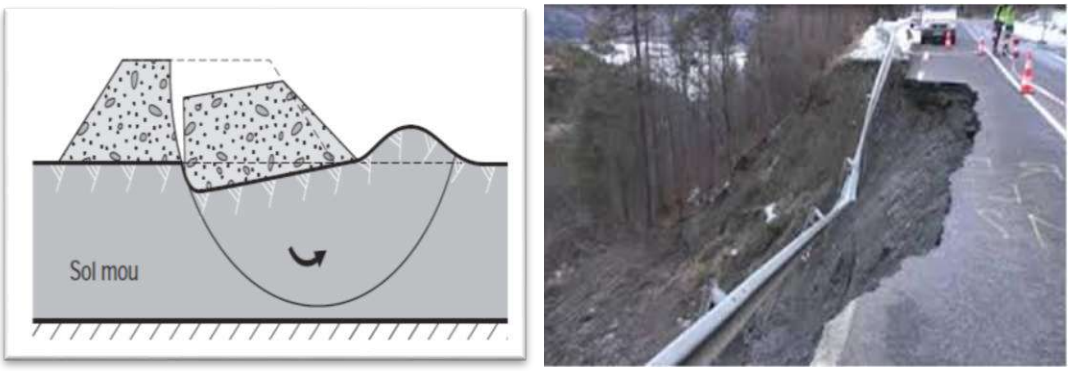


Figure I.13 : Rupture par glissement rotationnel.

I.5.2. Des problèmes de déformations:

Les sols compressibles se déforment sous les remblais à la fois verticalement (tassement) et horizontalement aussi, mais généralement les déformations horizontales sont moins importantes, ne dépassant pas quelques décimètres dans les cas les plus défavorables. Les déformations ne sont pas instantanées, elles commencent pendant la construction et peuvent durer des années après, suivant le degré de consolidation du sol d'assise.

En plus les tassements ne sont pas uniformes à cause de la section trapézoïdale des remblais, et de l'hétérogénéité des sols supports Ainsi on distingue :

- Un enfoncement vertical au centre du remblai.

-Un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral du sol de fondation sous l'emprise du remblai.

- Un déplacement latéral du sol de fondation hors de l'emprise du remblai, jusqu'à une distance directement liée aux épaisseurs du remblai et du sol compressible.

I.5.3. Des problèmes d'éventuels désordres sur les ouvrages avoisinants :

La construction d'un remblai sur un sol compressible peut ainsi provoquer des tassements sous des ouvrages voisins existants, elle peut aussi induire la rupture par flexion des pieux d'ouvrages d'arts ou un déplacement progressif des appuis, comme elle peut aussi occasionner le déversement des culées ou des murs de soutènement.

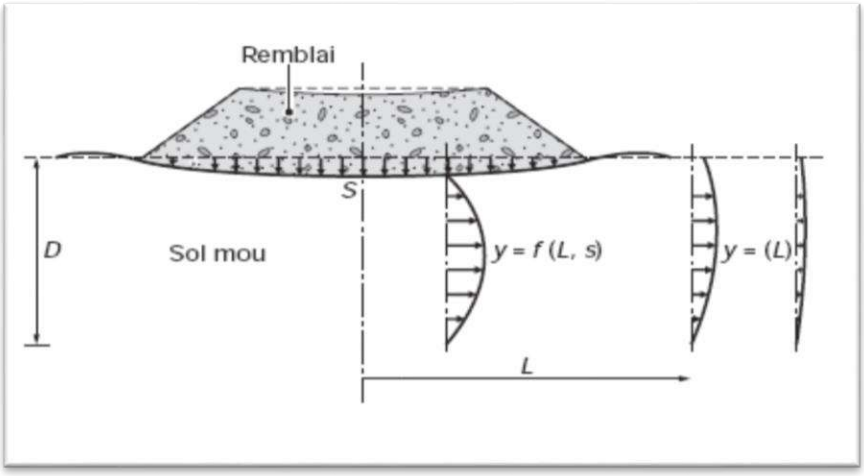


Figure I.14 : Tassement et déformation latérale de l'assise du remblai.

I.5.4. Problèmes d'écoulement d'eau:

La consolidation des sols compressibles entraine influence leurs perméabilité, alors les écoulements de crues peuvent éroder le pied du remblai, d'où la nécessité de le protéger, il faut penser également à placer des buses ou des cadres en travers du remblai.

I.6.Les techniques de construction:

Les techniques classiquement utilisées pour la construction des remblais sur sols compressibles pouvant être accompagnées de techniques de traitements des sols, il convient d'étudier les principes constructifs suivant deux aspects :

- Dispositions constructives relatives au remblai.

-Modifications du sol supportant le remblai. [5]

I.6.1 Description des techniques constructives des remblais : [6]

Il existe cinq techniques principalement utilisées :

- construction par étapes.
- banquettes latérales.
- surcharge temporaire.
- remblais allégés.
- renforcement par géotextiles.

- **Construction par étape :**

Le remblai est construit par couches ; l'épaisseur de la couche suivante est déterminée par un calcul de stabilité en fonction de la résistance du sol acquise par consolidation à la fin de l'étape précédente.

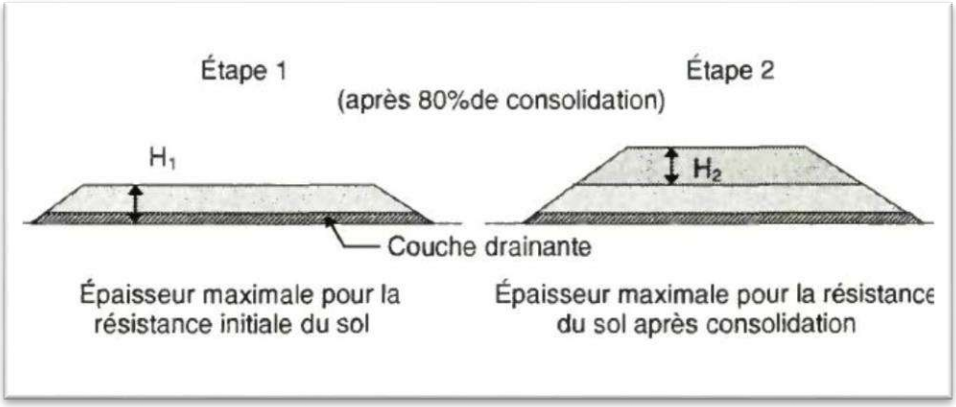


Figure I.15 : Exemple pour la construction du remblai par étapes.

Cette technique est utilisée pour tous types de remblais sur sols argileux quand le projet définitif est fixé longtemps avant le début de l'exploitation.

- **Banquettes latérales :**

Cette technique améliore la stabilité du remblai en l'élargissant par des banquettes de plus faible hauteur Ces banquettes servent de contrepoids vis à vis de ruptures circulaires (Figure 1.16) et améliorent également la stabilité au poinçonnement.

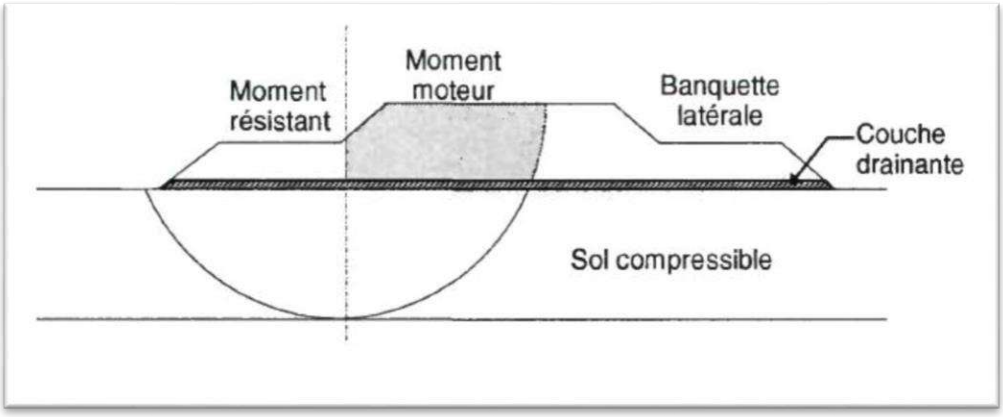


Figure I.16. : Banquette du remblai.

- **Surcharge temporaire :**

L'application d'une surcharge temporaire permet de diminuer le tassement postérieur à la mise en service du remblai.

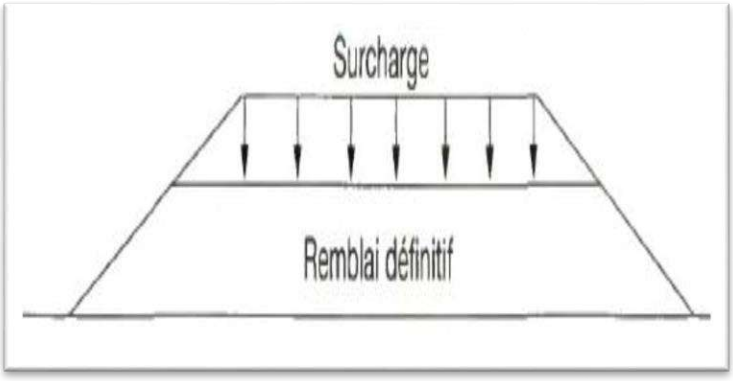


Figure I.17: Surcharge temporaire.

Il est utilisé pour Traitement des problèmes de tassement après la mise en service du remblai.

- **Remblais allégés :**

La réduction du poids du remblai permet de diminuer les tassements et d'améliorer la stabilité. Le choix des matériaux est lié à l'allégement désiré, qui dépend de l'analyse géotechnique du site.



Figure 1.18 : Remblai allégé.

- **Renforcement par géotextiles :**

La mise en place d'une ou plusieurs nappes de géotextiles ou de géotextiles à la base du remblai permet d'augmenter sa résistance à la traction et d'améliorer sa stabilité vis-à-vis de ruptures circulaires.

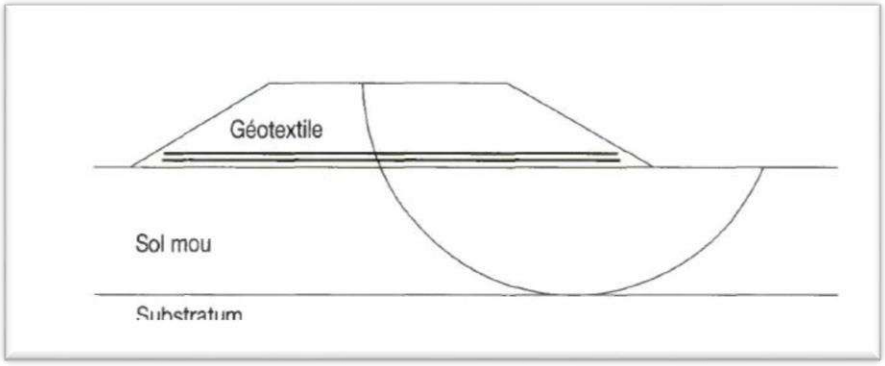


Figure 1.19 : Renforcement par géotextiles.

I.6.2. Modifications du sol supportant le remblai : [5]

Il existe plusieurs techniques pour Modifications du sol supportant :

- Substitution du mauvais sol.
- Drains verticaux.
-Consolidation atmosphérique.
- Colonnes ballastées.
-plots ballastés pilonnés.
-Injection solide.
-Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment.
-Remblai sur inclusions rigide.
-Electro-osmose.

- **Substitution du mauvais sol :**

La substitution consiste simplement à excaver le mauvais sol et à le remplacer par de bons matériaux d'apport compactés. Elle est plus difficile à mettre en oeuvre sous l'eau (cas fréquent dans les tourbes) et est limitée en pratique à des profondeurs de quelques mètres. D'autre part, elle est contraignante vis-à-vis de l'environnement (nécessité de trouver des emprunts et des lieux de dépôt).

Le remplacement de tout ou partie du sol compressible par un matériau plus résistant et moins déformable élimine tout ou partie des problèmes de tassement et de stabilité.

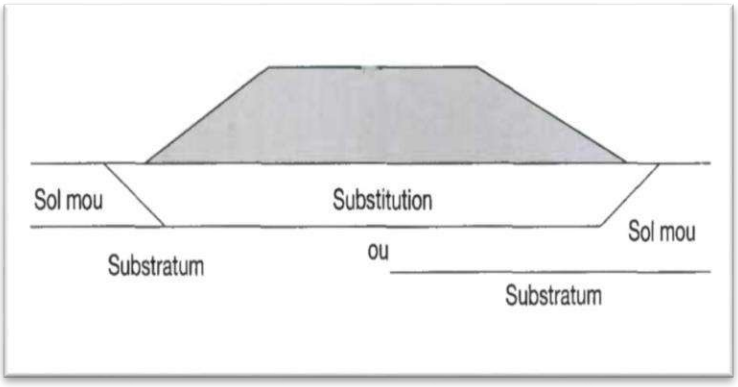


Figure I.20: Substitution du mauvais sol. (J.P MAGNAN, 2000).

- **Drains verticaux :**

Cette technique est utilisée pour accélérer les tassements de consolidation des sols fins saturés de faible perméabilité. L'introduction de colonnes verticales drainantes dans un massif de forte épaisseur permet de raccourcir fortement cette distance de drainage et de contrôler ainsi les vitesses de consolidation. Les drains verticaux ont été initialement exécutés en sable. Les drains plats préfabriqués sont en général moins onéreux actuellement.

L'eau sortant des drains doit être évacuée sous le remblai (couche drainante). Cette technique n'a d'effet que sur la vitesse de tassement.

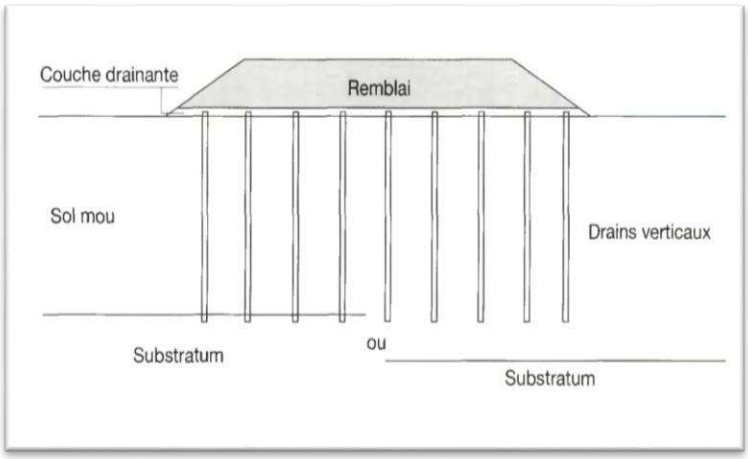


Figure I.21: Drains verticaux.

- **Consolidation atmosphérique :**

Un vide partiel est appliqué par pompage sous une membrane posée à la surface du sol. Les pompes sont connectées à un réseau de drainage horizontal et à un réseau de drains verticaux. La réduction progressive de la pression interstitielle à contrainte totale constante augmente les contraintes effectives dans le sol. Ce chargement est équivalent à 4 mètres de remblai, au maximum. On réduit ainsi les délais de consolidation sans risque d'instabilité du sol sous la charge appliquée.

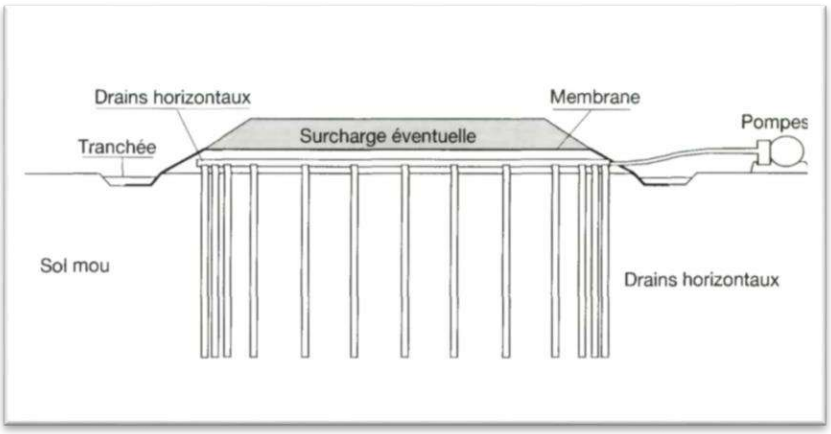


Figure I.22 : Consolidation atmosphérique.

- **Colonnes ballastées :**

Un réseau de colonnes de ballast compacté est constitué dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante ou d'un tube battu pilonné. Ces colonnes n'agissent comme points de renforcement du sol mou. Elles améliorent la stabilité et diminuent les tassements en reportant une partie de la charge sur le substratum. Elles servent aussi de drains verticaux.

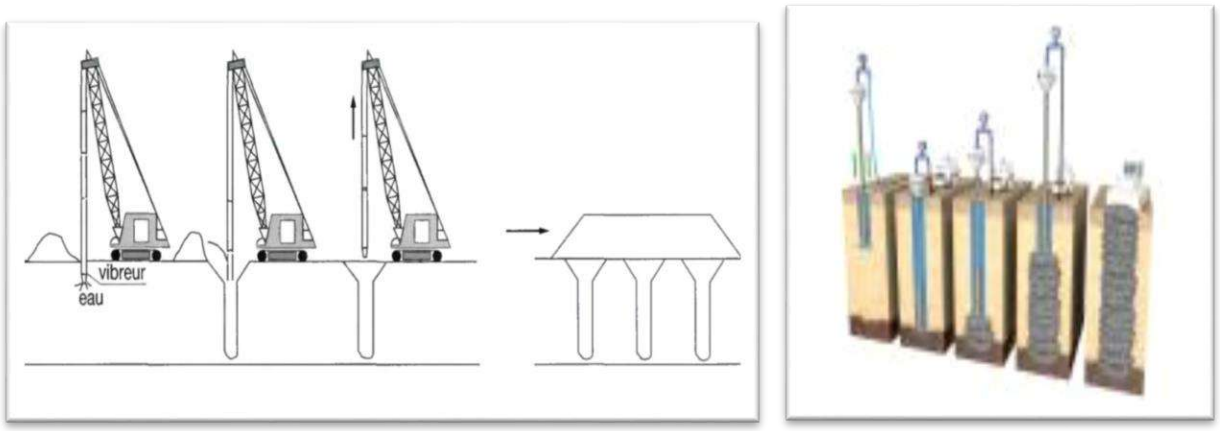


Figure I.23 : Colonnes ballastées.

- **plots ballastés pilonnés** :

Est mise en oeuvre par pilonnage au moyen d'un atelier de compactage dynamique : une pelle sur chenilles levant une masse d'une quinzaine de tonnes. Les plots sont constitués de matériau granulaire d'apport et atteignent des profondeurs de 7m pour des sections de 4 à 5 m2.

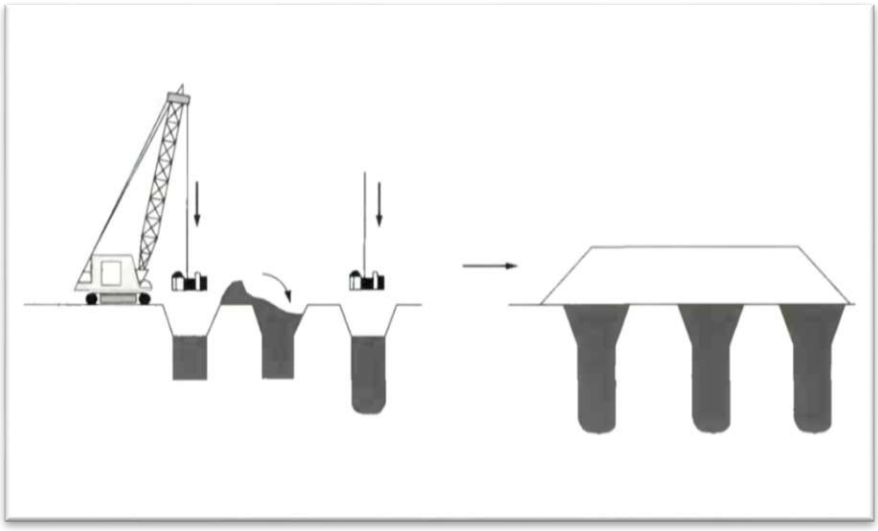


Figure I.24: Plots ballastés pilonnés.

- **Injection solide**

Le procédé consiste à introduire en force dans le sol, par injection sous pression dans un forage tube de petit diamètre, un mortier très visqueux. Par sa consistance, ce mortier ne peut imprégner le sol ni claquer le terrain. Le sol va donc être refoulé et comprimé latéralement. La

prise du mortier crée ensuite des colonnes verticales plus rigides. On combine donc un effet de renforcement au droit de chaque colonne avec une compression de la masse du sol. Les taux d'incorporation ne dépassent en général pas 5 à 6% du volume traité.

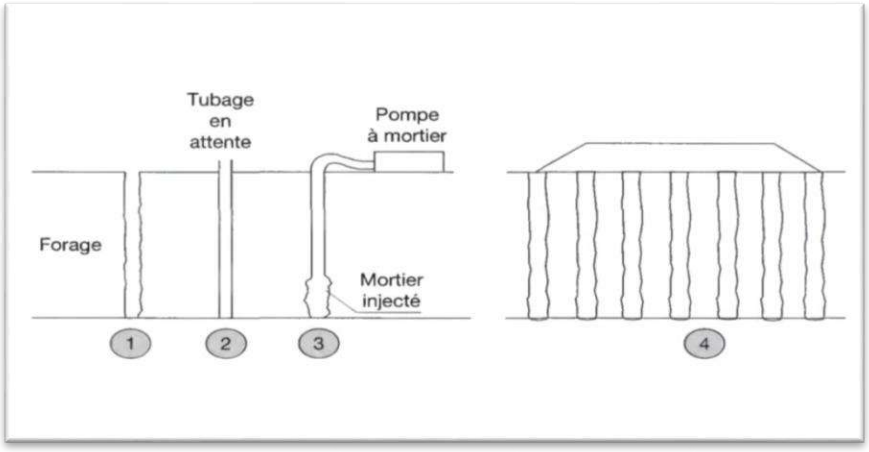


Figure I .25: Injection solide.

- **Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet «jetgrouting » :**

Ce procédé utilise un jet de fluide à haute pression pour déstructurer le terrain et le mélanger à un coulis de ciment. La prise du ciment dans le sol injecté crée des colonnes de mortier sol-ciment à fortes caractéristiques mécaniques. Ces colonnes reportent en profondeur une partie des charges dues au remblai, ce qui améliore la stabilité et diminue le tassement final.

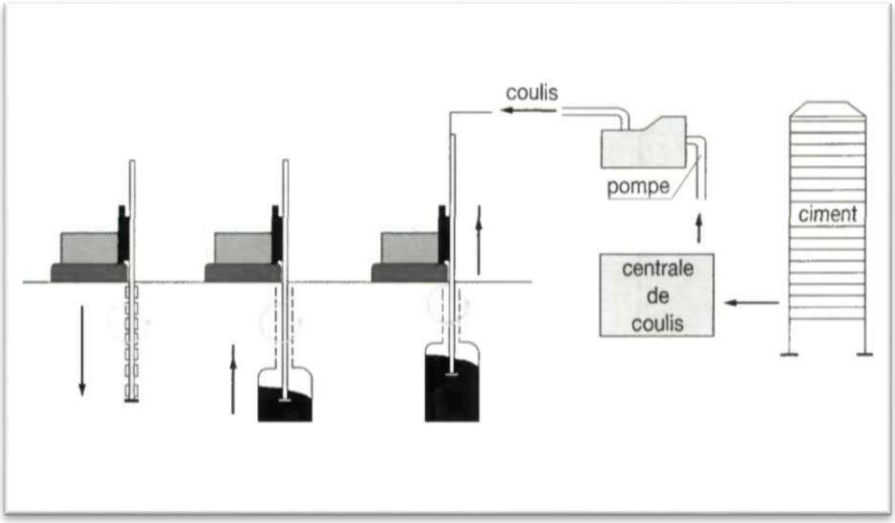


Figure I .26 : Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet.

- **Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment :**

Cette technique, applicable aux argiles molles peu consistantes (cohésion de l'ordre de 10 à 20 kPa), consiste à mélanger le sol en place avec de la chaux vive ou du ciment au moyen d'une machine de forage à tarière adaptée. On obtient ainsi des colonnes dont la résistance permet d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements.

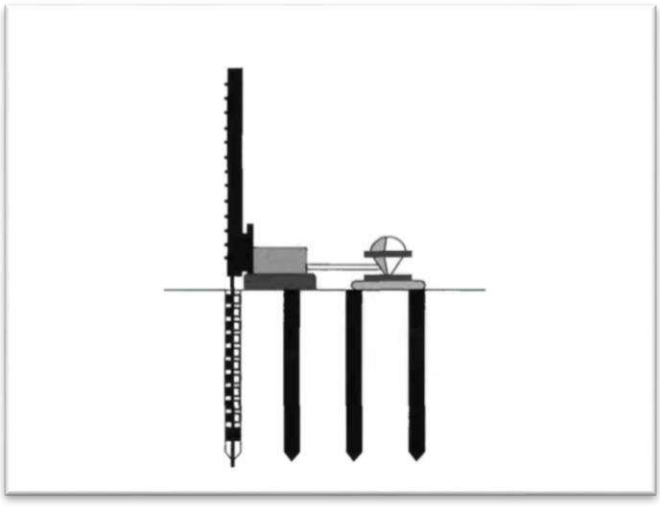


Figure I .27: Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment.

- **Remblai sur inclusions rigides :**

Les charges apportées par le remblai sont transmises au niveau du substratum rigide, par l'intermédiaire de pieux disjoints, surmontés chacun d'une dallette destinée à reporter sur le pieu le poids d'une partie du remblai.

Cette technique permet ainsi d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements.

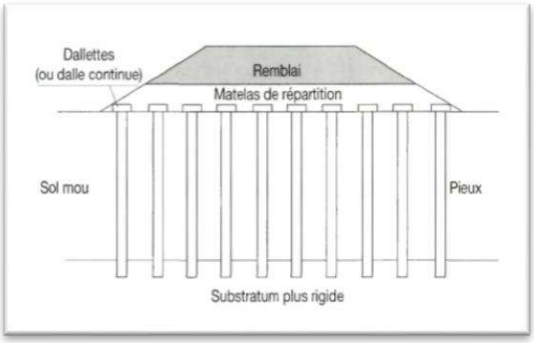




Figure I.28 : Remblai sur inclusions rigides.

- **Electro-osmose :**

Un réseau d'anodes et de cathodes (tubes creux) est placé selon un maillage régulier dans le massif de sol à traiter (figure 1.29). Une différence de potentiel est appliquée entre les anodes et les cathodes et provoque un écoulement de l'eau vers les cathodes, où elle est évacuée. Cet écoulement produit une diminution de la teneur en eau moyenne dans le sol et donc un tassement et une augmentation de la résistance au cisaillement.

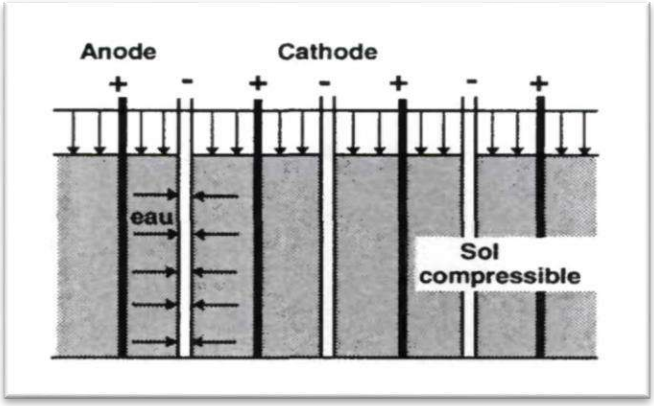


Figure I.29: principe de l'électro-osmose.

I .7. Les remblais de grande hauteur :

Les grands remblais sont plus qu'un empilement de couches bien compactées. Leurs déformations peuvent être importantes et évoluer au cours du temps. Ils sont le plus souvent hétérogènes parfois constitues de matériaux évolutifs. Ils comportent des ouvrages transversaux et longitudinaux.

Les remblais de grande hauteur peuvent également être construits avec des matériaux de caractéristiques moins sécuritaires (sols fins argileux notamment). Dans ce cas, leur conception et leur réalisation ne s'appuient plus seulement sur les règles empiriques évoquées précédemment, mais font aussi un large appel à des études spécifiques de mécanique des sols et des roches au même titre qu'un ouvrage d'art.

Il n'est pas possible de déplacer les sols utilisés en remblai sur de grandes distances et il faut donc s'accommoder des matériaux disponibles. Cela doit inciter les projeteurs à adapter très

tôt le tracé, pour éviter d'avoir ensuite à prendre des risques excessifs sur la qualité des matériaux employés. **[7]**



Figure I .30: Remblai de grande hauteur.

Chapitre II: Les méthodes de calcul de la stabilité de talus

II.1. Introduction :

Les problèmes de la stabilité des 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 naturelles 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

Il existe Plusieurs méthodes de calcul de stabilité. Ces méthodes sont différencient par les hypothèses admises par leurs autours (méthodes de calcul en équilibre limite, méthodes de calcul à la rupture, méthodes de calcul en déformations…) et par la facilité de leur mise en œuvre (calculs à l'aide d'abaques, calculs automatiques à l'aide de logiciels), mais elles s'accordent toutes à définir un coefficient de sécurité global en fonction duquel la stabilité du talus étudié est considérée comme assurée ou compromise, ou par des coefficients de sécurité partiels affectant, d'une part, les sollicitations appliquées et, d'autre part, les propriétés mécaniques des sols

Les principaux objectifs d'une analyse de stabilité de pentes incluent l'évaluation du risque de rupture à travers le calcul du facteur global de sécurité pour une pente d'une part, et de localiser le long de la surface à potentiel de glissement les zones à fort potentiel rupture d'autre part. La stabilité de pentes est habituellement analysée par des méthodes d'équilibre limite.

Dans ce chapitre, on peut citer les principales méthodes de calcul de stabilité des talus.

II.2.Coefficient de sécurité :

II.2.1.Notion de Coefficient de sécurité:

Le coefficient de sécurité d'une pente est le rapport de la force stabilisatrice sur la force motrice, ou du moment stabilisateur sur le moment moteur. L'importance est de déterminer le plan de rupture ayant le plus faible coefficient de sécurité, celui qui permettra de juger de la stabilité de la pente. Les plans de rupture possibles étant extrêmement nombreux.

$$Fs=\frac{\Sigma \text{la force stabilisatrice}}{\Sigma \text{la force motrice}}$$

- ✓ **la force stabilisatrice**: la somme des forces de résistance au cisaillement du sol selon plan de glissement défini.
- ✓ **la force motrice** : le poids de sol déstabilisant

Il peut être défini à l'égard de la résistance au cisaillement du sol comme suit :

$$Fs=\frac{\tau max}{\tau}$$

Où :

- τ_{max}: Résistance au cisaillement du sol.

-τ: Contraintes de cisaillement s'exerçant le long de la surface de rupture. [1].

Le tableau au-dessous présente divers méthode de définitions de facteurs de sécurité

Tableau II.1: Différentes définitions d'un coefficient de sécurité. [9]

N °	Définition	Formule	Commentaire
1	Rapport de contraintes	$F = \tau_{max} / \tau$	Méthode à la rupture
2	Rapport de forces	$F = E_{résist} / E_{moteur}$	Direction de déplacement
3	Rapport de moments	$F = Mt_{résist} / Mt_{moteur}$	Rotation
4	Paramètres réduits	P = P/F	Cf. Eurocodes
5	Probabilité à X %	Distribution de F	Cf. Monte Carlo
6	Marge de sécurité	H/H_{max}	Sur une grandeur

Dès que l'ingénieur fait un choix et calcule le coefficient de sécurité, la surface de rupture déterminante, trouvée par essais et erreurs, est celle qui fait paraître le plus petit coefficient de sécurité. Ce facteur de sécurité minimal à adopter dépendra du type d'ouvrage et de son utilisation. Il est évident que pour des ouvrages dont la stabilité doit être garantie à tout prix (risque pour les personnes, site exceptionnel...), le facteur de sécurité Fs doit être élevé, tandis que pour certains sites peu importants ou pour certains ouvrages courants, et lorsqu'il n'y a pas de risque pour la vie humaine, on peut accepter des valeurs plus faibles (valeur courante de Fs est de 1.5). [10]

Dans les études de stabilité des pentes, on considère que **:**

- Une pente dont le coefficient de sécurité est inférieur à 1 est jugée instable, en effet, le moment moteur est supérieur au moment stabilisateur est la rupture est probable
- La pente qui a un coefficient se situant entre 1,0 et 1,2 est à la limite de la stabilité
- Le coefficient de sécurité supérieur à1,5 présente une stabilité adéquate . [1]

La définition des seuils des facteurs de sécurité dépend de l'approche adoptée, des fréquences de sollicitations de l'ouvrage en question et du condition normale, l'approche adoptée pour calculer ce coefficient...[11]

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

Le principe de calcul consiste à déterminer le facteur de sécurité Fs par lequel il faut diviser la résistance de la surface de glissement pour que la masse potentiellement stable soit à la limite de l'équilibre. On distingue deux manières différentes d'utiliser les méthodes de calcul:

- Dans la première, le glissement a déjà eu lieu, il s'agit d'une valeur de Fs inférieure ou égale à 1, dans ce cas la surface exacte est connue et on cherche à déterminer, pour Fs =1, les caractéristiques correspondantes.
- La deuxième, la plus fréquente, consiste à déterminer la marge de sécurité disponible et adopter les solutions adéquates pour améliorer la sécurité de l'ouvrage en répondant à des exigences en fonction de l'emploi des talus.

Pour évaluer la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité, ce coefficient peut être un rapport de forces, de moments, de grandeurs par rapport à une grandeur limite. [10]

II .3. Choix des caractéristiques mécaniques à prendre en compte :

Dans les calculs de stabilité, le choix des caractéristiques mécaniques est fonction du problème lui-même. Mais d'une manière lorsqu'il s'agit de sols argileux, le calcul à court terme conduit au coefficient de sécurité le plus faible. L'expérience montre que c'est souvent juste après la construction que se produisent les glissements dans les sols argileux. On utilisera donc les caractéristiques mécaniques non drainées (C_U, φ_U). Par contre dans les sols sableux, le calcul à court terme n'a pas de sens car on atteint très rapidement le long terme. On utilisera donc les caractéristiques mécaniques (C_{CD}, φ_{CD}) ou (C', φ'). .[12]

Le sol est un matériau hétérogène possédant des propriétés variables à l'intérieur d'une même masse de sol.

II.4. Le choix du type de méthode de calcul : [10]

Le choix de méthode de calcul dépend des moyens que l'on peut mettre en œuvre, doit être posé entre une méthode modélisant toute la masse de sol (méthode des éléments finis) et une méthode cinématique, définissant une surface de rupture par exemple (méthode d'équilibre limite). Cependant, avec les possibilités d'analyse d'un grand nombre de courbes de rupture potentielles, les deux approches se rejoignent. Dans le cas d'une méthode intéressant toute la masse, le calcul fournira directement la zone de rupture la plus probable, alors qu'une méthode s'appuyant sur une courbe préalablement définie sera réitérée un grand nombre de fois pour un résultat semblable. Ce choix doit être fait en examinant les moyens disponibles, le comportement global de la pente, mais aussi en s'assurant de la possibilité d'obtenir les paramètres de calcul correspondant au modèle. Le comportement global de la pente correspond à quatre mécanismes qui se traduisent par des déplacements du sol différemment répartis :

- Pré-rupture, où le comportement du sol est élasto-visco-plastique et où le massif est un Méthodes de calcul de la stabilité des pentes milieu continu, sans zone de discontinuité, les déformations sont quasi homogènes.
- Rupture, où une partie du massif se déplace par rapport à l'autre, le modèle de sol est élasto-plastique, voire rigide-plastique.
- Post-rupture, où une partie du sol se déplace sur l'autre, comme un écoulement visqueux et avec une vitesse appréciable.
- Réaction, quand la partie du sol ayant déjà glissé et s'étant stabilisée, le mouvement reprend sur une surface, suivant un comportement rigide-plastique; La distinction entre ces quatre mécanismes est fondamentale pour une étude fiable des pentes, et ceci va bien sûr influer sur le choix d'une méthode de calcul.

Elle permet de choisir entre les types de méthodes rappelés ci-après.

II .5 .Elément de base de calcul : [13]

Toutes les méthodes de calcul de stabilité nécessité de connaitre.

- La géologie: nature des terrains et éléments sur les discontinuités.
- Les propriétés mécaniques des terrains et/ou des discontinuités.
- La géométrie en deux dimensions ou trois dimensions du talus.
- Les conditions hydrodynamiques (hauteurs d'eau et écoulements).

II.6 Méthodes de calcul de stabilité de pentes:

Il existe plusieurs méthodes de calcul de la stabilité de talus, elles sont basées sur la constatation suivante : lorsqu' il y a séparation d'un masse du sol du reste de massif et son glissement se fait suivant une surface de rupture. Ayant défini une surface de rupture "S" on étudie la stabilité de la masse (1) mobile par rapport au massif (2) qui est fixe (Figure 2.1). [11]

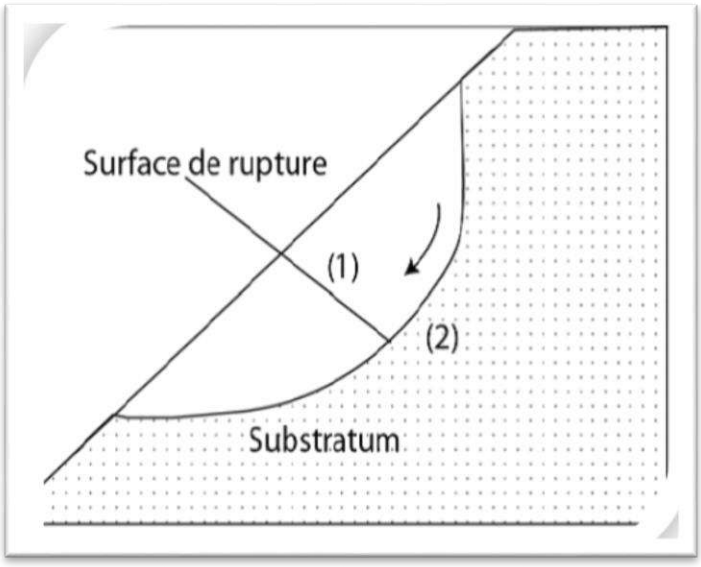


Figure II. 1. Surface de rupture.

Les principales méthodes de calcul de la stabilité des talus sont :

- Les méthodes basées sur l'équilibre limite (c'est un méthode analytique).
- Les méthodes des éléments finis (c'est un méthode numérique).
-Les méthodes basées sur des abaques.

II.6.1 Méthodes d'équilibres limites :

Les méthodes d'équilibres limite peuvent être classées en deux groupes : les méthodes des tranches dans lesquelles le massif est décomposé en tranches, surtout utilisée pour les sols hétérogènes (Fellenius, Bishop…) et les méthodes de stabilité globale dans laquelle on considère de façon globale.

Toutes ces méthodes ont en commun la même difficulté qui est de trouver à la fois:

- la surface critique.
- les contraintes normales et tangentielles le long de cette surface.
- le facteur de sécurité (sur le critère de rupture) en partant des équations d'équilibre.

II.6.1.1. Les méthodes des tranches:

Les terrains sont rarement homogènes et isotropes et l'utilisation de la méthode Globale est donc limitée. Les méthodes dites de tranches sont souvent utilisées. Le principe est de découper le volume étudié en un certain nombre de tranches (en général vertical).

En général les surfaces de rupture considérées sont des cercles, mais certaines Méthodes de tranches (Sarma, par exemple) ne nécessitent pas cette hypothèse.

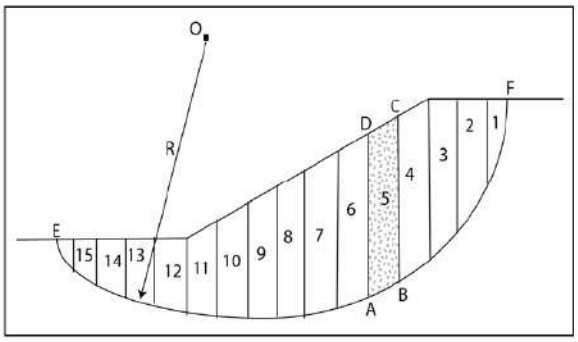


Figure II.2: Calcul par la méthode des tranches.

Cette méthode consiste à découper la masse glissante en certain nombre des tranches verticales, une tranche(n) est soumise à (figure 2.2**)** :

- Son poids w=$\gamma_n h_n b_n$.
- Les efforts inter-tranches décomposés en efforts horizontaux H_n et H_{n+1}et en efforts verticaux$V_n$et V_{n+1} .
- U: Pression interstitielle au milieu de l'arc de ruptures de la tranche.
- α: angle entre l'arc de la tranche et le horizontale.
- b: épaisseur de la tranche .

La réaction Rn du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement).
Elle se décompose en une composante normale et tangentielle.

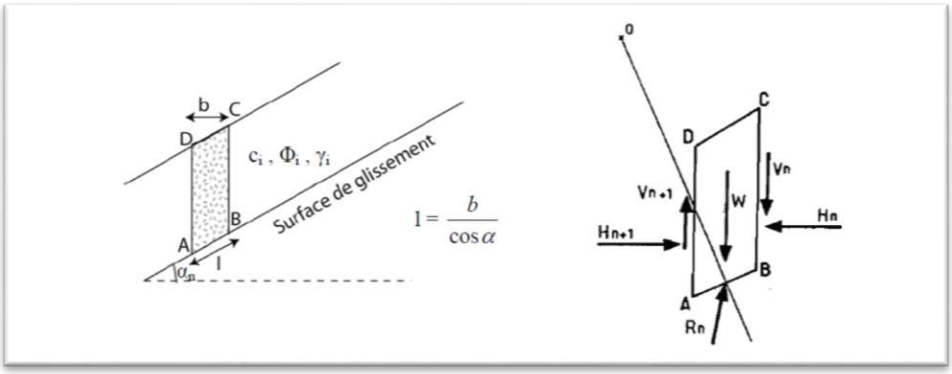


Figure II.3:Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche.

II.6.1.1.1.Méthode de Fellenius :

C'est la première méthode de tranche présente la littérature. La méthode simplifie a permis de calculer les coefficients de sécurité en faisant des calculs analytiques.

Hypothèse : [14]

- ✓ La méthode suppose une surface de glissement circulaire et divise le talus en tranches.
- ✓ Elle néglige les forces entre les tranches (verticales et horizontales), (voir figure 2.2).
- ✓ La seule force agissant sur l'arc AB est le poids W.

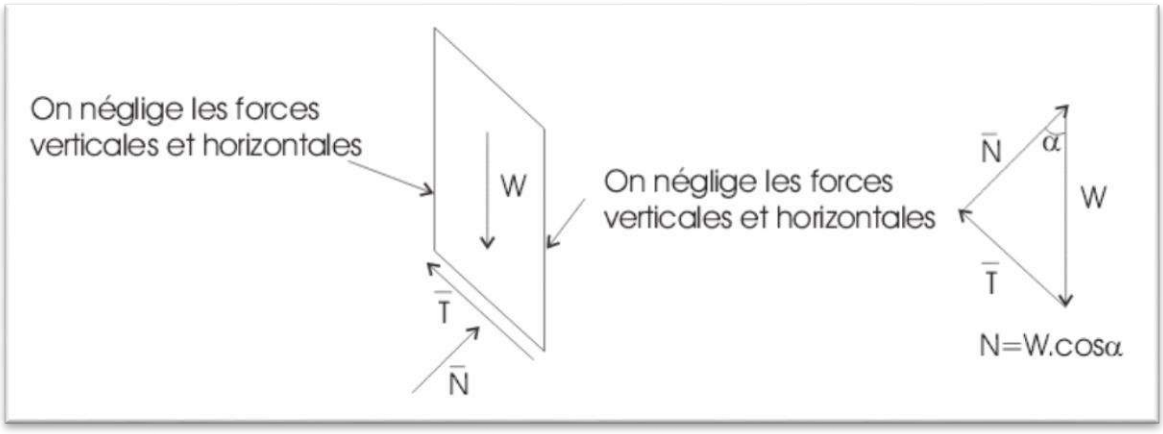


Figure II.4: Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Fellenius.

On décompose le poids W en une composante normale N=W .cos (α) et une composante tangentielle T=W sin (α). Le coefficient de sécurité est calculé à partir de l'équilibre des moments par rapport au centre du cercle de glissement. Voire la figure(II.2)

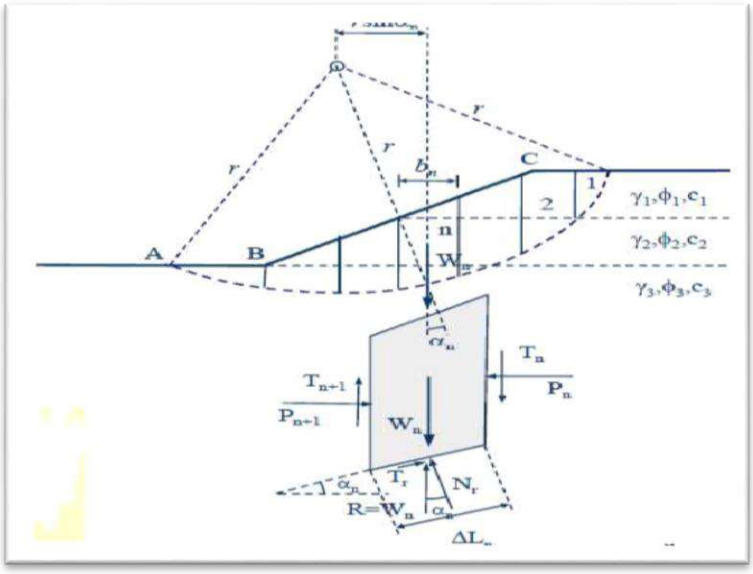


Figure II.5 : Equilibre d'une tranche de sol dans la méthode de FELLENIUS

Le coefficient de sécurité est définit par :

$$Fs=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n} C_i \times L_i + W_i \cos\alpha_i \, \mathrm{tg}\varphi_i\right)}{\sum_{i=1}^{n} W_i \sin\alpha_i}$$

Avec :

-C_i : Cohésion de la couche.

-φ: Lange de frottement de la couche.

-W_i : Poids de la couche.

-α_i: Angle entre l'arc de la tranche horizontale.

C'est une méthode moins précise que les autres méthodes des tranches et elle est sûre pour des sols homogènes seulement.

II.6.1.1.2. Méthode simplifiée de BISHOP (1955):

Dans cette méthode, les forces sur les côtés de la tranche sont supposés être horizontale Les forces sont résumées dans le sens vertical pour satisfaire l'équilibre dans cette direction et d'obtenir une expression de la contrainte normale sur la base de chaque tranche. Se référant à la tranche.

Hypothèse:[14]

- ✓ La méthode suppose une surface de glissement circulaire;
- ✓ Elle néglige les forces verticales entre les tranches (figure 2.3).

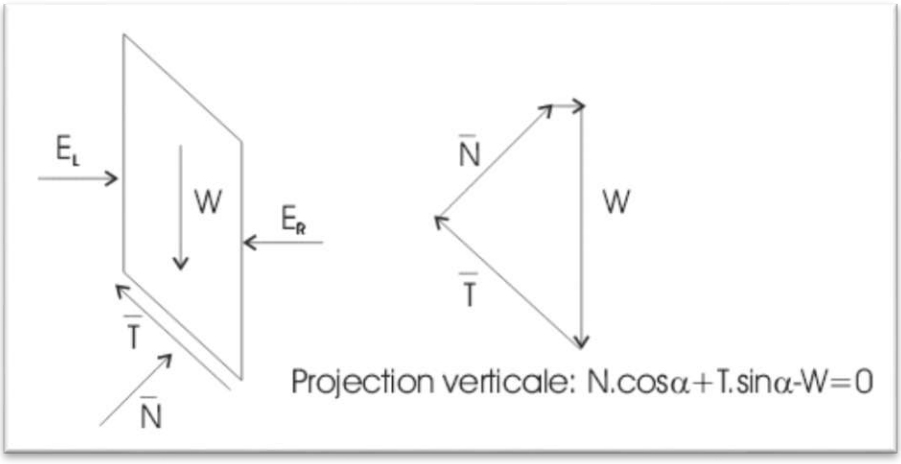


Figure II.6 : Forces appliquées sur une tranche dans la méthode de Bishop simplifie.

La méthode de Bishop vérifie l'équilibre des moments ainsi que l'équilibre vertical pour chaque tranche, mais elle néglige l'équilibre horizontal des forces.

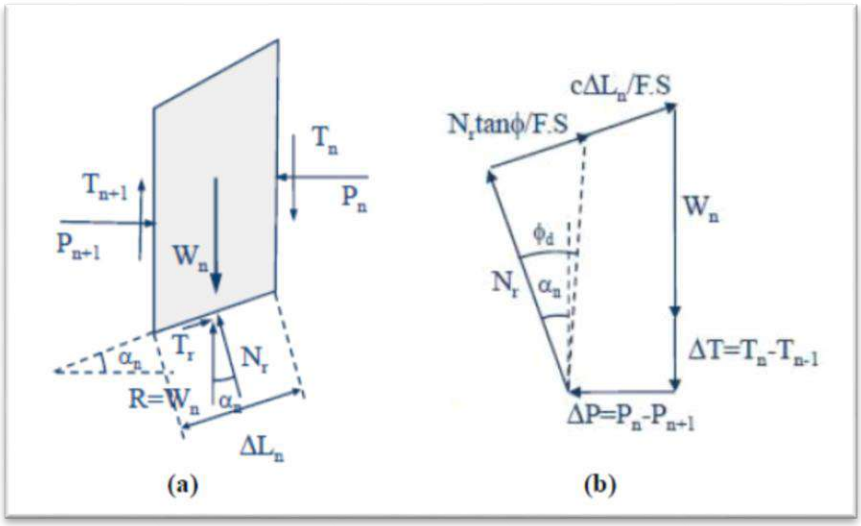


Figure II.7 : a) : forces sur la n éme tranche.

b) : polygone d'équilibre de force.

Le facteur de sécurité est donne par la formule suivante:

$$Fs=\frac{\sum_{n=1}^{m}(c_i b_i+w_i tg\varphi_i)}{m_\alpha \sum_{n=1}^{m} W_n \sin \alpha_n}$$

Avec :

$$m_\alpha= \cos \alpha_i[1+\frac{tg\alpha_i\varphi_i}{Fs}].$$

Nous constatons que le coefficient de sécurité Fm (dû à l'équilibre moment) se retrouve dans les deux membres de l'équation, et donc, la résolution passe par des techniques itératives. Généralement, on prend la valeur du coefficient obtenue avec la méthode de Fellenius comme

point de départ de cette itération. Cette méthode est plus précise que celle de Fellenius et le calcul se prête particulièrement bien au traitement par ordinateur.

Remarque

- Selon FREDLUND et KRAHN, La méthode de Bishop est probablement la méthode la plus utilisée pour l'analyse de stabilité de pente.

II.6.1.1.3. La méthode Janbu simplifiée :

Hypothèses:

- ✓ la méthode suppose une surface de glissement quelconque (non circulaire);
- ✓ elle suppose que les forces entre les tranches sont horizontales. [10]

La méthode simplifiée de Janbu est un indice composite basé sur des surfaces de cisaillement et le coefficient de sécurité est déterminé par l'équilibre des forces horizontales. Comme dans la méthode de Bishop, la méthode considère les forces inter-tranches normales, mais néglige les forces de cisaillent (v). La force normale (N) est détermine de la même manière que dans la méthode de Bishop et le coefficient de sécurité est donné par :

$$Fs = \frac{\sum C_n.L_n + (N-u)\, tg\varphi\, \sec\alpha}{\sum w\, tg\alpha + \sum \Delta E}$$

Avec :

$$\sum \Delta E = E_i - E_{i+1}$$

$\boldsymbol{E_i}$ **et** $\boldsymbol{E_{i+1}}$:Forces normales horizontales inter-tranche.

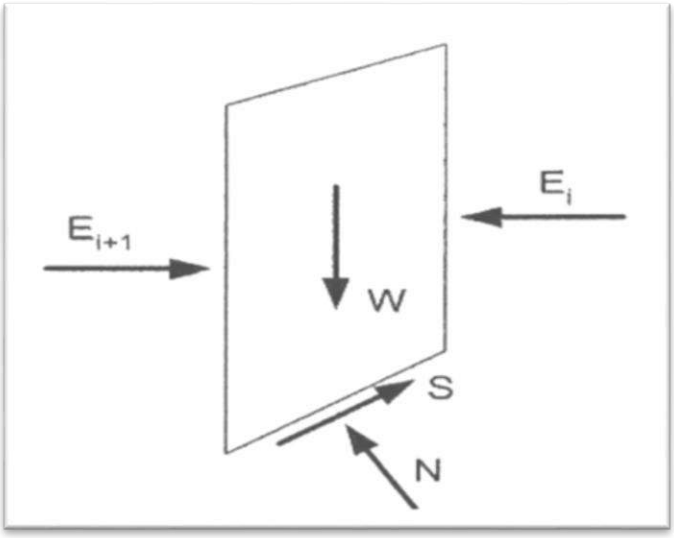


Figure II.8:la représentation des forces horizontale sur une tranche.

II.6.1.1.4. Méthode de Spencer (1967):

Cette méthode a le même principe de calcul que la méthode de Morgenstern and Price, la différence réside dans la fonction de variation qui est constante (f(x) =1), et que l'angle d'inclinaison (Φ) est constant dans toutes les tranches.[15]

Les hypothèses.

La méthode de Spencer suppose que les forces latérales sont parallèles, c.-a-d, toutes les forces latérales sont incline au même angle. Cette inclinaison est calculée en tant qu'élément de la solution d'équilibre. La méthode de Spencer suppose également que les forces normales a la base de la tranche agissent au centre de la base - une supposition qui a très peu d'influence sur la solution finale. La méthode de Spencer satiukisfait entièrement aux conditions d'équilibre des forces et des moments.

-Les forces inter tranchent E i et E i+1.

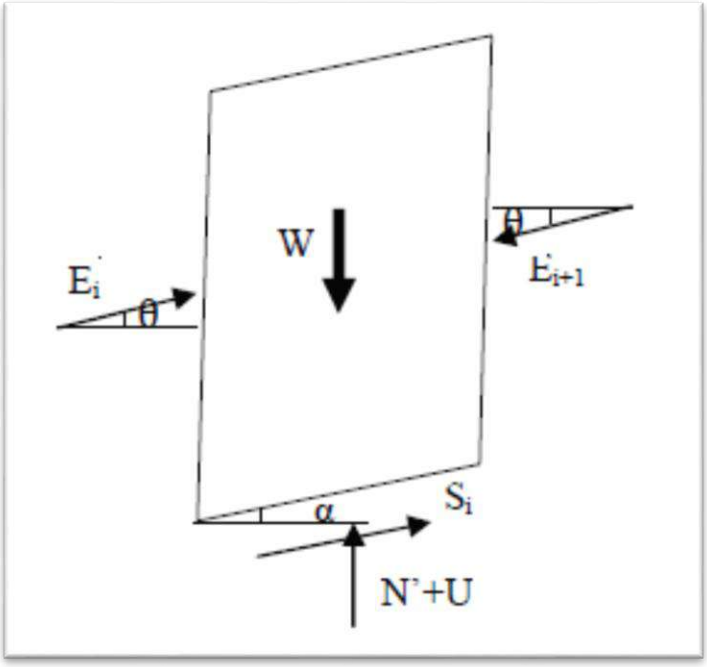


Figure II.9: Forces appliquées sur une tranche pour la méthode de SPENCER.

Les forces appliquées sur une tranche sont :

-L'effort normal effectif a la base de la tranche N'.

-Le poids de la tranche W.

-La force de cisaillement a la base S.

-La pression interstitielle U = u l.

Cette méthode au même principe de calcul que la méthode de Morgenstern and Price, la différence réside dans la fonction de variation qui est constante (le rapport constant entre les comptes verticaux et horizontaux des forces inter tranches. [14]

II.6.1.1.5. La méthode de MORGENSTERN-PRICE (1965) :

Hypothèses:

- ✓ la méthode suppose une surface de glissement non circulaire.
- ✓ elle suppose que les forces entre les tranches sont parallèles entre elles afin de rendre le problème déterminé.
- ✓ elle suppose aussi que la force normale N agit au centre de la base de chaque tranche.

Cette méthode introduit une fonction mathématique arbitraire pour représenter la variation de la direction des forces entre les tranches.

$$Tg(\theta_i) = X/E = \lambda\, f(Xi)\ldots$$

Où :

-θi: est l'angle formé par la résultante et l'horizontale, il vari systématiquement d'une tranche à une autre le long de la surface de glissement .

-λ: est une constante qui doit être évaluée pour le calcul du facteur de sécurité.

-f (Xi): est la fonction de variation par rapport à la distance le long de la surface de glissement

-Xi : est la normalisation linéaire des coordonnées *xi*, avec les valeurs des deux bouts de la surface de rupture égales à zéro et π..

Cette méthode vérifie l'équilibre horizontal et vertical des forces, l'équilibre des moments en un point quelconque; et détermine également l'inclinaison des forces entre les tranches, ce qui donne une inconnue supplémentaire. Cette méthode est précise et elle est applicable à toutes les géométries et types de sol. [10]

Tableau II.2: les méthodes des tranches [ABE-93] [16]

Méthodes	**Type de rupture**	**Type de méthode**	**Hypothèse des forces inter-tranches**	**Equation d'équilibre statique vérifié**
Fellenius - 19936	Circulaire	Calcul à la rupture (trancher)	Négligées	Moments
Jambu-1954	Non circulaire	Calcul à la rupture (tranches)	Positions imposées	Forces
Bishop-1955	Circulaire	Calcul à la rupture (trancher)	Composantes horizontales imposées	Moment
Morgenstem price-1965	Non circulaire	Calcul à la rupture (trancher)	Coefficient relationnel entre composantes horizontales et verticales	Forces et moment
Spencer-1967	Circulaire étendue à non circulaire	Calcul à la rupture (trancher)	-	Forces et moment

II.6.1.2. Méthode globale :

Les méthodes globales sont les méthodes des coins et du cercle de glissement (TAYLOR) puis de la spirale logarithmique. Un calcul global peut être effectué dans le cas :

- D'un terrain homogène et isotrope défini par ces caractéristiques: φ, **c,** γ et par la Pression U de l'aquifère ;
- D'un talus de hauteur H faisant un angle β avec l'horizontal.

Elle consiste à étudier l'équilibre de la masse considéré comme un solide indéformable sous l'action de système de forces qui lui est appliqué.

Le calcul est effectué en admettant que le corps est en équilibre limite; c'est à dire que la rupture est sur le point de se produire, et donc que la résistance au cisaillement sur la ligne de glissement se trouve totalement mobilisé, à partir de là on est ramené à un problème statique élémentaire. L'hypothèse la plus simple et la plus courante consiste à assimiler la

ligne de glissement à un arc de cercle de centre O et de rayon R. le moment du corps se ramené alors à une rotation autour de centre O.

- Les moments qui favorisent la rotation dénommés *moments moteurs* ou (négatifs). Ils tendent à faire tourner le corps.
- Les moments agissent en sens Inverse, nommés *moments stabilisateurs* ou résistants (Positifs). S'oppose à la rotation.

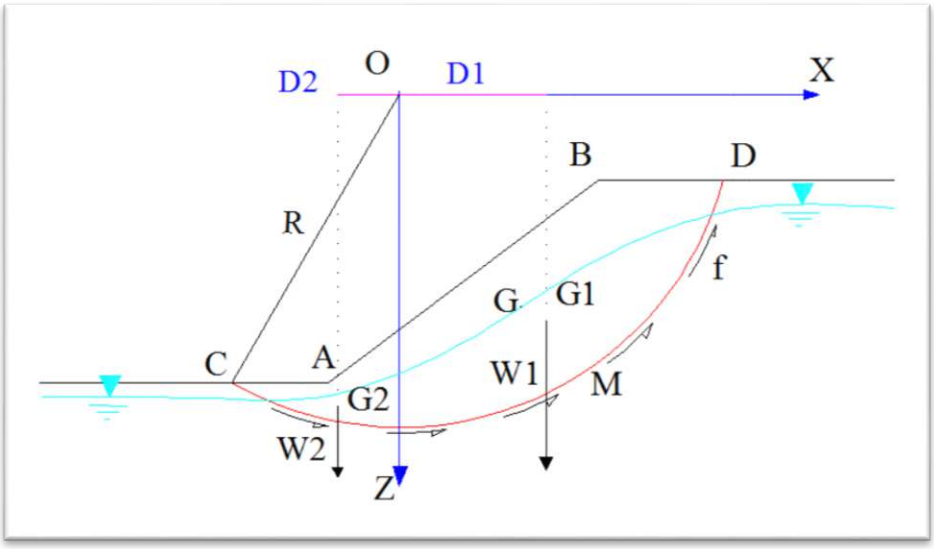


Figure II.10 : Principe de la méthode globale.

Les forces qui donnent naissance à des moments positifs appartiennent à deux familles:

- Certaines forces extérieures appliquées au corps, elles jouent un rôle stabilisateur actif
- Les forces de résistance au cisaillement du terrain le long de la ligne de glissement; elles jouent un rôle stabilisateur passif. **[17]**

II.6.2. Méthode des éléments finis:

Il s'agit d'une méthode de calcul numérique de type variationnel. Ce mode de calcul suppose que le sol se comporte selon un modèle rhéologique qui obéit aux lois classiques de la rupture par cisaillement. Les ruptures planes présentent un cas particulier simplifié. Cette méthode est très adaptée aux milieux très déformables, et notamment des sols mous.

Avec la complexité des géométries et les types de chargement, le calcul analytique est devenu de plus en plus fastidieux. L'avènement du calcul numérique a accordé beaucoup d'importance à l'utilisation des approches variationnelles, et en particulier la méthode des Éléments Finis dans le calcul de stabilité des pentes.

Les calculs à la rupture ne prennent pas en considération les déformations du milieu précédant la rupture. Ceci a fait que les Méthodes d'Équilibre Limite constituent généralement des bornes supérieures des solutions d'analyse de stabilité de pentes. L'approche par Éléments

Finis (MÉF) constitue une modélisation plus rigoureuse. En supposant un comportement rhéologique du milieu étudié, l'analyse par la MÉF constitue une alternative aux déficiences des méthodes traditionnelles.

La MÉF consiste à diviser le profil étudié par un réseau de triangles ou de rectangles. La maille utilisée étant d'autant plus petite que la pente considérée est plus névralgique (pied de versant par exemple). Supposant les contraintes connues, elle définit le déplacement du réseau du maillage en écrivant que l'énergie potentielle du solide est minimale. Certaines approches initialisent le calcul par un modèle rhéologique de type élastoplastique ou viscoplastique, et supposent des valeurs raisonnables du module de Young E, du coefficient de poisson et des valeurs des paramètres de frottement effectif φ' et de cohésion c'. Les contraintes sont alors évaluées dans chaque maille, elles sont supposées constantes à l'intérieure de chaque maille. Puis, en chaque point du réseau (noeuds et centres de gravité des mailles), le déplacement correspondant pour cet état des contraintes est ensuite calculé. Si la masse de sol est stable, le déplacement maximal de la masse est limité et une convergence vers la solution est obtenue pour les charges extérieures appliquées (généralement le poids propre du milieu seulement). Pour atteindre l'état de rupture finale, deux méthodes ont été utilisées [18]

1- dans la première, le poids propre est majoré par un coefficient de charge 2, un incrément de la charge "extérieure" est ainsi ajouté, résultant en une accélération du mécanisme de déformation;

2- dans l'autre méthode, le calcul est commencé par les valeurs de tan φ′ et c' qui sont minorées par un coefficient de sécurité FS > 1.0 dans le processus itératif jusqu'à la rupture
Pour le cas des sols, un milieu cohérent s'identifie à la première approche, tandis qu'un milieu granulaire correspond à la deuxième.

Le développement des calculs proprement dit ne se différencie pas des autres applications des MÉF et par conséquence, les références des MÉF sont les mêmes que pour les autres domaines de la mécanique [19]

II.6.3. Les méthodes basées sur des abaques:

Ces méthodes sont utilisées dans les cas les plus simples, les solutions obtenues ont été portées sous forme d'abaques qui permettent ainsi l'obtention rapide de facteurs de sécurité. Il faut cependant toujours les utiliser avec beaucoup de précautions et n'appliquer leurs résultats qu'après avoir soigneusement vérifié qu'on se trouve dans le domaine de validité de ces abaques.

II.7. Limitations des méthodes d'équilibre limite:

Toutes ces méthodes d'équilibre limite ont leur limitation, car elles sont fondé sur des hypothèses simplificatrice telles que la division de la masse susceptible de glisser en tranches, le comportement du sol qui est supposé rigide parfaitement plastique donc elle ne donnent aucune information sur les déplacements, le facteur de sécurité Fs qui est supposé identique en chaque point du plan de glissement, la relation contrainte-déformation qui n'est pas prise en compte explicitement et pour des géométries complexes, des minima locaux peuvent ne pas être détectés. [10].

Conclusion :

Dans cette partie nous avons pris une idée générale sur les différentes méthodes d'analyse de stabilité de talus ainsi que le calcul du coefficient de sécurité par ces différentes méthodes pour faire ressortir la solution adopter pour conforter le glissement . Ces méthodes sont basées essentiellement sur la détermination de coefficient de sécurité Fs

Il existe Plusieurs méthodes de calcul de stabilité ayant toutes des avantages et des inconvénients. Les méthodes d'équilibre limite nécessitent une prédétermination des lignes de rupture (ou une recherche automatique du minimum parmi un ensemble de courbes). Quant aux méthodes par éléments finis dans laquelle la courbe de glissement la plus probable se déduit naturellement de l'analyse de l'état des contraintes et déformations, elles nécessitent la connaissance des caractéristiques de déformabilité du massif, en plus de celles de résistance.

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.

Evaluer une stabilité de pente passe surtout par le choix du coefficient de sécurité qui est associé aux méthodes, ce qui peut poser des problèmes lors des comparaisons.

Chapitre III : Approche de calcul par analyse probabiliste de la stabilité d'une pente

III.1 Introduction :

L'analyse probabiliste de la stabilité de pente prendre en considération la variabilité naturelle des propriétés du sol. En fonction de cela la probabilité de rupture de talus peut être considérable. Plusieurs méthodologies probabilistes ont été développées pour utiliser ce variabilité naturelle des propriétés des paramètres dans l'analyse de la stabilité des pentes, comme la méthode du premier ordre, second moment (FOSM) Méthode de fiabilité de premier ordre.(FORM) et méthode de Simulation de Monte Carlo

La méthode de simulation de Monte Carlo est le plus utilisé pour évaluer la probabilité de rupture de pente et traite de différentes méthodes d'analyse déterministe telles que les méthodes par éléments finis et les méthodes d'équilibre limite.

III.2. les approches probabilistes :

L'approche probabiliste prend en compte le caractère aléatoire des variables figurant dans l'analyse. Se basant sur un modèle mécanique classique de comportement du sol, l'approche probabiliste comprend l'évaluation répétitive des facteurs de sécurités (ou de n'importe quelle autre fonction définissant la performance de l'ouvrage, dite fonction performance) sur la base des valeurs numériques prises par les variables aléatoires. Le résultat final d'une analyse probabiliste est la probabilité de rupture qui représente une mesure de fiabilité de l'ouvrage évaluée sur la base des valeurs de la fonction performance correspondant aux différentes réalisations numériques des paramètres aléatoires. [20]

III.2.1 Arguments des promoteurs de l'approche probabiliste: [9]

Alfaro et Harr (1981) cité par Magnan (Magnan, 1982). Notent que le coefficient de sécurité souffre des défauts suivants :

- Les éléments d'incertitudes dans les calculs ne sont pas quantifiés quand on utilise un coefficient de sécurité.
- L'échelle des coefficients de sécurité n'est pas connue. Un ouvrage dont le coefficient de sécurité est égal à 3 n'est pas nécessairement plus sur qu'un autre ouvrage dont le coefficient de sécurité est égal à 1.5.
- Les valeurs admissibles pour le coefficient de sécurité sont fournies par l'expérience. Lorsque l'on doit traiter des problèmes nouveaux ou différents, il n'y a pas de coefficients de sécurité admissibles.

C'est pourquoi ils recommandent d'utiliser le concept de fiabilité ou de probabilité de rupture. D'autres chercheurs comme Bolle, Genger , Bourdeau et Gutierrez, Chowdhury, et bien d'autres encore ont fourni le même type d'arguments (Magnan, 1982).

D'une manière générale, le principal argument des promoteurs des méthodes probabilistes est que l'approche probabiliste en géotechnique permet d'analyser de façon plus objective les données disponibles par l'utilisation d'une approche plus systématiquement dans l'analyse des incertitudes et de la fiabilité. Cependant la probabilité de rupture ou l'indice de fiabilité obtenu n'est pas un substitut du coefficient de sécurité (avec toute l'expérience acquise par des générations d'ingénieurs), mais un complément d'information pour la prise de décision.

III.3.Variabilité spatiale des propriétés des sols :

Par nature, les sols sont des matériaux hétérogènes, leurs propriétés mécaniques et physiques présentent une variation souvent considérable d'un point à l'autre du milieu géotechnique étudié. La connaissance de la géologie du site ou du procédé de construction de l'ouvrage permet en général de définir des sous-domaines à caractéristiques à peu prés homogènes. Il peut ne s'agir toutefois que d'une homogénéité statistique dissimulant des variations spatiales souvent très significatives. Il est donc nécessaire de reconnaître que les propriétés des sols sont des fonctions aléatoires spatiales. [21]

La variabilité des propriétés mécaniques, c'est - à - dire l'hétérogénéité du massif , est un élément primordial du comportement et doit être prise en compte par la méthode de calcul . L'utilisation d'un modèle oblige l'utilisateur à reconsidérer le choix des paramètres par des approches probabilistes dans lesquelles interviennent également des incertitudes liées, notamment, aux effets d'échelle. Beaucoup de travaux basés sur l'approche probabiliste ont été effectués et ont permis de compléter les études déterministes conventionnelles de stabilité des pentes, mais le doute en ce qui concerne l'application des résultats obtenus reste toujours présent

La variabilité spatiale des propriétés du sol est une des sucres principaux d'incertitude en géotechnique. La méthode géostatiques fournissent un outil rationnel pour interpréter l'information disponible et évaluer cette variabilité. [22]

Pour caractériser la variabilité spatiale des propriétés des sols, l'outil mathématique le mieux adapté est les champs aléatoires. Les paramètres physiques et mécaniques dont on veut

modéliser la dispersion spatiale seront considérés comme l'observation d'un champ aléatoire généralement homogène. Ce type d'approche a été développé en France, en géostatistique, initialement pour des applications minières, puis elle est étendue au sol aux USA c'est Vanmarcke qui en a été le .précurseur. [9]

III. 4.Variables aléatoires :

Dans une analyse probabiliste, les paramètres géotechniques, qui représentent les principales sources d'incertitudes, sont traités comme des variables aléatoires. Une variable aléatoire est une fonction mathématique définie sur un espace échantillon qui attribue une probabilité à chaque événement possible dans l'espace échantillon.

En pratique, c'est une variable pour laquelle la valeur précise (ou plage de valeurs) ne peut pas être prédit avec certitude, mais seulement avec une probabilité associée, qui décrit le résultat possible d'une expérience particulière en termes de nombres réels. [23]

Les variables aléatoires indépendantes considérées dans cette étude sont la cohésion, l'angle de frottement interne du sol et la masse volumique. Leur distribution de probabilité est supposée normale et par suite chaque variable est caractérisée par sa moyenne μ et son coefficient de variation COV.

III.5 Concepts de base de la méthode probabiliste :

III.5.1. Indice de fiabilité (β):

L'indice de fiabilité est une grandeur qui permet de porter un jugement sur la stabilité en y intégrant une connaissance sur l'incertitude des paramètres.

Cet indice a été développé dans le calcul des structures pour fournir unemesure de fiabilité comparative, intégrant l'incertitude des données sous une forme approximative, c'est-à-dire sans devoir complètement connaître la distribution de probabilité de ces données mais seulement quelques unes de ses caractéristiques (typiquement, la moyenne et l'écart-type). [23]

L'indice de fiabilité décrit la sécurité par le nombre d'écarts types séparant la meilleure estimation de F de sa défaillance définie valeur de 1,0. Il peut également être considéré comme un moyen de normaliser le facteur de sécurité par rapport à son écart type. [24]

$$\beta = \frac{E(F)-1}{\sigma(F)}$$

Où : - E(F) est la valeur du facteur de sécurité
- σ(F) c'est l'écart type.

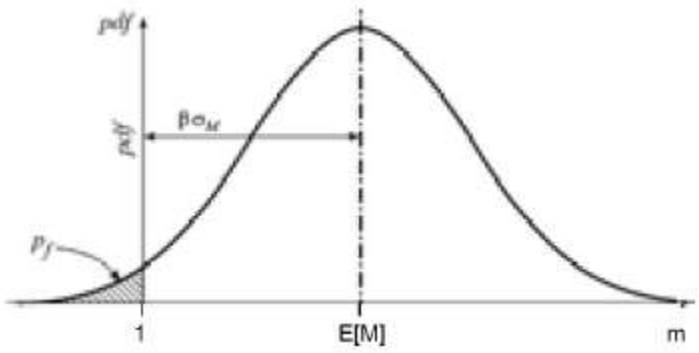


Figure III.1: Définition de l'indice de fiabilité

Cet indice a été développé dans le calcul des structures pour fournir une mesure de fiabilité comparative, intégrant l'incertitude des données sous une forme approximative, c'est-à-dire sans devoir complètement connaître la distribution de probabilité de ces données mais seulement quelques unes de ses caractéristiques (typiquement, la moyenne et l'écart-type).[23]

III.5.2.Fonction de performance :[21]

Une analyse fiabiliste requiert la définition d'une fonction de performance ou une fonction d'état limite, g(X), où X est le vecteur des variables aléatoires. La fonction de performance divise l'espace des variables aléatoires en deux domaines, un domaine de sûreté et un domaine de rupture. Ceci se traduit mathématiquement par, g(X)>0 pour la région de sécurité, g(X) <0 pour celle de rupture alors que la surface d'état limite est définie par g(X)=0. La probabilité de ruine est donnée par :

$$Pr = Prob\ (g\ (X) < 0)$$

La fonction de performance est formulée comme suit :

$$g\ (X) = Fs - 1$$

III.5.3. La distribution de probabilité

La fonction de densité de probabilité (PDF) est une fonction qui désigne la probabilité pour chaque intervalle de séries d'entrées des variables aléatoires.

Une autre manière de représentation de la même information, c'est une forme de fonction de distribution cumulative (CDF), elle donne la probabilité qu'une variable aléatoire sera inférieure ou égale à une valeur sélectionnée, CDF est une intégration de la densité de probabilité qui correspond.

III.5.4.Le coefficient de variation (COV) :

Le coefficient de variation représente une mesure relative et adimensionnelle de la dispersion, sont expression est la suivante :

$$COV = \frac{\sigma}{\mu x} * 100$$

Le COV est utilisé couramment pour décrire les variations de plusieurs propriétés géotechniques du sol, et des paramètres testés in situ. Notant que la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation sont interdépendantes (si on connait deux on peut conclure le troisième). **[25]**

III.5.5.Probabilité de rupture (P_f) :

Pf est déterminé en comptant le nombre de facteur de sécurité inférieur à 1, puis en prenant ce nombre en pourcentage du nombre total d'essais de Mont Carlo. Par exemple, s'il y a 1000 essais de Monte Carlo et 100 d'entre eux sont inférieurs à 1,0, la probabilité d'échec est de 10%. [24]

III.6. méthodes approximatives pour la détermination de l'indice de fiabilité et la probabilité de rupture:

Les méthodes disponibles pour estimer la probabilité de rupture P_f peuvent être classées en deux groupes: les méthodes des moments et les méthodes par simulation. La figure (1.2) propose une structuration générale des méthodes approximatives d'analyse de fiabilité qui vont être brièvement décrites ci-après: [26]

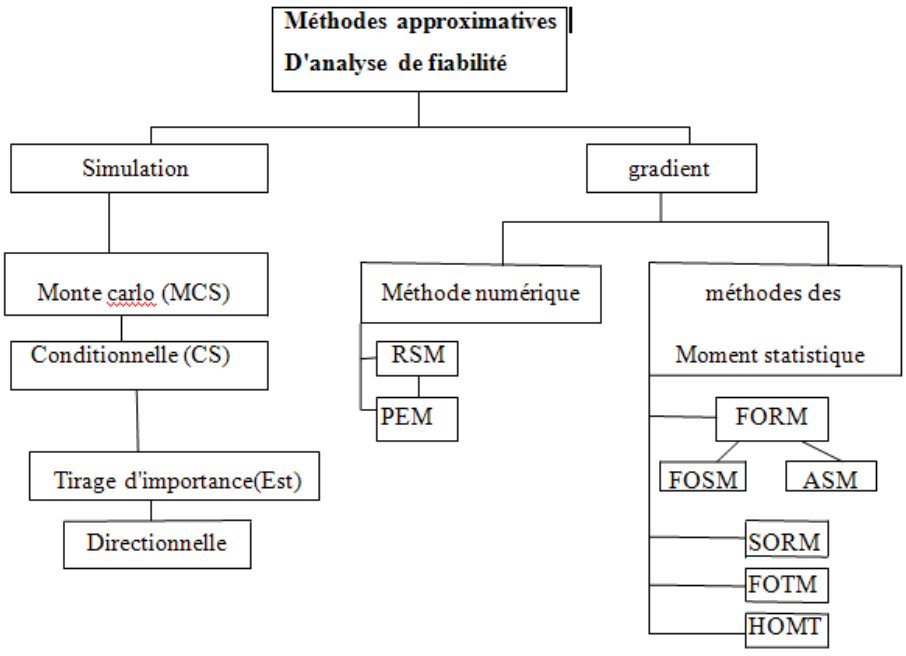


Figure III.2: Arbre des méthodes approximatives d'analyse de fiabilité.

III.6.1. Méthode de fiabilité de premier ordre :

La méthode FORM combine des méthodes analytiques et des méthodes approximatives et comporte trois étapes principales: premièrement, chaque variable de base qui concourent à l'expression de la fonction d'état limite est supposée normale ou doit être normalisée (transformée en distribution normale). Deuxièmement, l'indice de fiabilité (β) est évalué à partir des deux premiers moments statistiques de la fonction de base. Enfin, la probabilité de rupture liée au point de conception est calculée par l'intermédiaire de la relation supposée entre $\beta \; et \; P_f$ /Pour les états limite non-linéaires, la surface de rupture est linéarisée au point de conception.

III.6.2. Méthode des deuxièmes moments de premier-ordre (FOSM) :

Dans la méthode des deuxièmes moments de premier-ordre (FOSM), la fonction de base est approchée par une expansion polynomiale (Taylor) telle que l'espérance mathématique (E[g] ou µg) et l'écart type (σ_g) de la fonction de base puissent être facilement calculés à partir de la moyenne et de l'écart type des variables. Pour une fonction de base donnée g(X), l'indice de fiabilité peut alors être défini comme le rapport des deux premiers moments statistiques de cette fonction (Cornell, 1969):

$$\beta = \frac{E[g]}{\sqrt{Var[g]}} = \frac{\mu_g}{\sigma_g}$$

Afin de déterminer la probabilité de rupture il est nécessaire de faire une hypothèse sur la distribution de B. Par exemple, dans la définition précédente, Cornell fait l'hypothèse d'une distribution normale.

Dans la littérature, la fonction de densité de probabilité du facteur de sécurité ou de B est généralement considérée comme normale ou log - normale.

Dans le cas d'une fonction de densité de probabilité log - normale, l'indice de fiabilité est donné par (U.S. Army , 1993) [26]

III.6.3. Simulation de Monte Carlo :

Cette méthode consiste à échantillonner par une technique de simulation appropriée les paramètres aléatoires d'entrée puis un calcul déterministe est effectué pour chaque réalisation simulée des paramètres. On construit ainsi un échantillon de la variable de contrôle concernée, ici le facteur de sécurité, lequel est ensuite traité statistiquement afin d'obtenir les

caractéristiques statistiques cherchées de cette variable. [9] Cette méthode tient compte de la variabilité naturelle des propriétés des paramètres.

Un des aspects importants de la méthode de Monte-Carlo est qu'elle nécessite la génération de séries de valeurs aléatoires de chacun des paramètres des modèles de calcul. Il existe les bibliothèques de sous programmes statistiques des programmes capables de générer des suites de nombres aléatoires suivant des lois de distribution simples (densité uniforme sur un intervalle donné loi normale, loi log normale, etc.). [21]

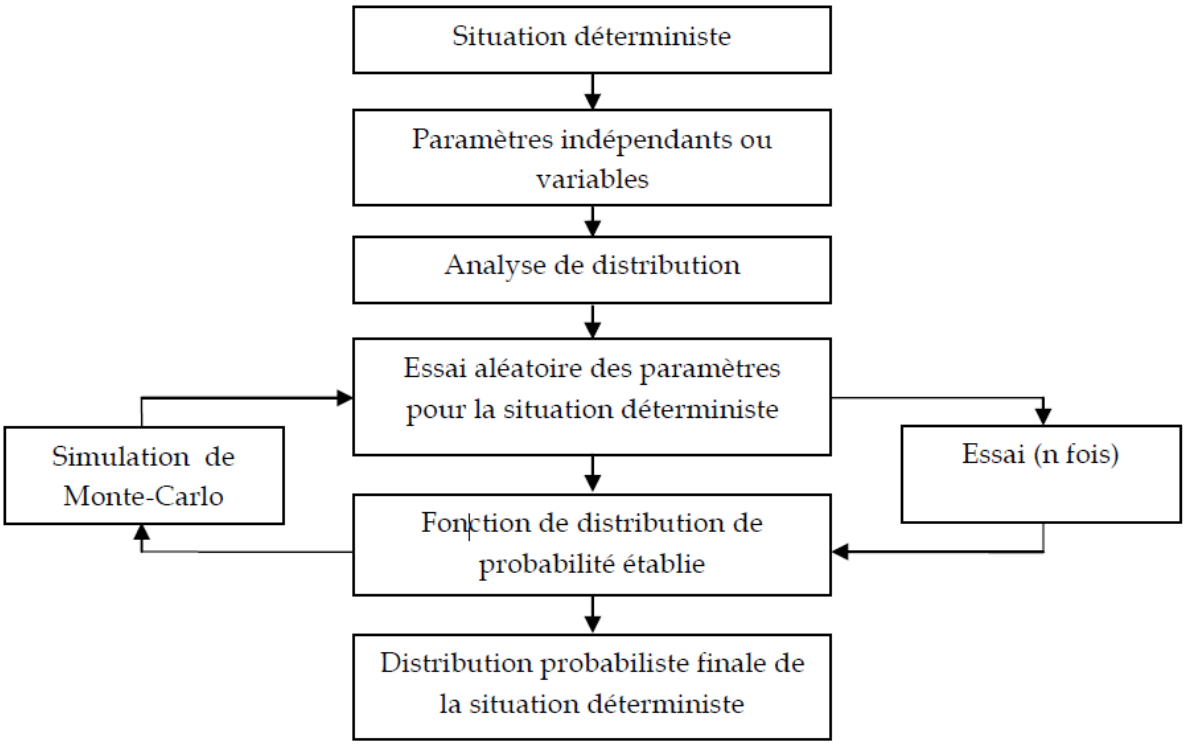


Figure III. 3: L'approche générale de la simulation de Monte-Carlo (Hutchinson et Bandalos, 1997)

III.6.3.1 Traitement probabiliste avec la simulation de Monte Carlo :

Pour le traitement de stabilité avec la méthode de Monte Carlo, la procédure est Comme suit :

1. La stabilité d'une digue doit être étudiée en utilisant une méthode déterministe (avec le logiciel (GEO-SLOPE/W), Le facteur de sécurité critique et son surface de rupture sont obtenus pour des conditions prédéfinis ;
2. Le choix des paramètres qui ont un comportement aléatoire sont considérés comme paramètres d'entrée ;
3. Représentation de la variabilité des paramètres d'entrée avec la sélection de modèle de distribution, et donc les paramètres choisis seront quantifiés ;

4. Echantillonnage aléatoire des paramètres d'entrée, et cela en utilisant la densité de probabilité. ;
5. Pour chaque échantillon aléatoire de l'étape précédente et pour chaque surface de rupture déterminée avec la méthode déterministe de la première étape, des facteurs de sécurité sont calculés. (2000 échantillons aléatoire donnent 2000 facteur de sécurité) on note que dans le calcul de FS, la surface de rupture est supposée constante ;
6. Dans cette étape, la fonction de probabilité de rupture (Pf) est achevée ;
7. La fonction de distribution de probabilité du facteur de sécurité est dessinée en se basant sur les résultats de l'étape 5 ;
8. La moyenne et l'écart type du facteur de sécurité sont calculés en utilisant la fonction de distribution de probabilité ;
9. L'indice de fiabilité est calculé. [27]

III.6.3.2 Limitation de la simulation de Monte Carlo :

Dans l'analyse de fiabilité d'une étude de stabilité d'une pente en utilisant la méthode de Monte-Carlo, l'indice de fiabilité β et la probabilité de rupture Pf sont déterminés pour la surface critique obtenue par la méthode déterministe, donc, la première étape dans l'analyse probabiliste est de définir la surface critique qui a un facteur de sécurité minimal, et par la suite β et Pf sont obtenus pour cette surface.

L'aspect important négligé dans cette approche, c'est que la surface critique qui a le facteur de sécurité minimal n'est pas nécessairement la surface qui a une valeur minimale de l'indice de fiabilité β ou bien qui a la grande probabilité de rupture, la problématique de cette approche c'est qu'on se base uniquement sur la surface critique est donc tous les résultats dépendent d'une seule surface. [27].

III.7. Principes généraux des méthodes d'analyse probabiliste de la stabilité des pentes :

L'analyse probabiliste de la stabilité d'une pente fait intervenir trois éléments d'importance égale :

- la description des variations naturelles des propriétés physiques et mécaniques des sols et des conditions géométriques du problème traité.
- une méthode de calcul déterministe de la stabilité des pentes
- une méthode de traitement analytique ou numérique des fonctions de variables aléatoires. Le choix des paramètres de calcul est lié à celui de la méthode de calcul déterministe utilisée. [28]

Conclusion :

L'analyse probabiliste de la stabilité d'une pente fait intervenir trois éléments d'importance à savoir :

- la description des variations naturelles des propriétés physiques et mécaniques des sols et des conditions géométriques du problème traité.
- une méthode de calcul déterministe de la stabilité des pentes.
- une méthode de traitement analytique ou numérique des fonctions de variables aléatoires par calcul de simulation de Monte-Carlo.

Pour déterminer la distribution statique des résultats du calcul déterministe, qu'il s'agit d'une démarche basée sur le calcul du facteur (coefficient) de sécurité correspondant à l'état critique.

L'analyse probabiliste par simulation de Monte-Carlo, qui est fréquemment utilisée en raison de sa simplicité, mais exige un volume important de calculs nécessitant ainsi elle est très coûteuse Ces méthodes ne sont donc valables qu'à condition de disposer d'une puissance de calcul suffisante. Mieux vaut considérer la méthode comme une aide à l'interprétation plutôt que comme un résultat absolu.

Chapitre IV : Présentation de code de calcul de talus SLOPE/W

IV .1. Introduction :

SLOPE/W est un code de calcul de stabilité de talus faisant partie du progiciel, c'est-à-dire un software (logiciel) applicatif généraliste aux multiples fonctions, composé d'un ensemble de programmes paramétrables développé par GEO-SLOP Ltd de l'université de Calgary, Alberta (Canada). Cet outil permet de modéliser des problèmes de domaine géotechnique et de géo-environnement. Dans son architecture globale, ce programme est composé de huit (8) modules distincts organisés comme suit :

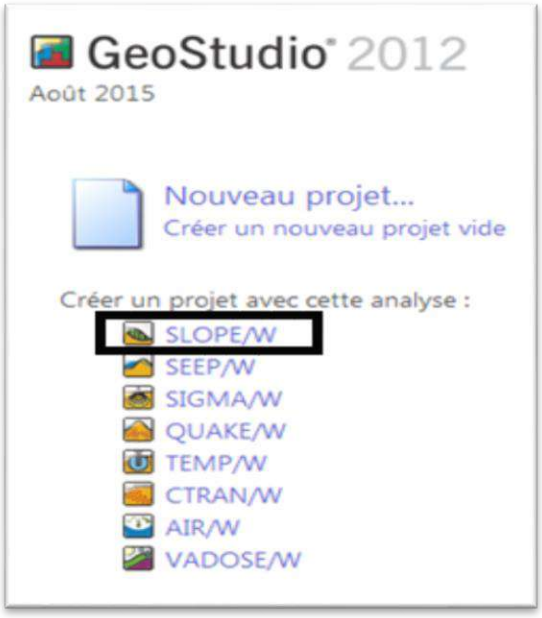


Figure IV. 1 : Fenêtre de démarrage du logiciel Géo-studio 2012.

1) SLOPE/W : calcul des facteurs de sécurité d'une pente en utilisant les méthodes d'analyses classiques (Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price,…) ;

2) SEEP/W : calcul, analyse et évolue, grâce à un modèle par élément finis, les pressions Interstitielles d'eau ;

3) QUAKE/W : modélisation par éléments finis du comportement du sol sous séisme ;

4) SIGMA/W : analyse par élément finis des problèmes de contraintes-déformations ;

5) TEMP/W : analyse des problèmes géotechniques des sols ;

6) CTRAN/W : modélisation du mouvement d'une contamination dans des matériaux poreux;

7) AIR/W : analyse des interactions entre l'eau et l'air du sol dans des matériaux poreux ;

8) VADOSE/W : analyse de flux en dessous de la surface du sol, dans la vadose non saturée et qui rejoignent le régime de l'eau dans le sol.

IV .2. Définition du logiciel :

SLOPE/W est un logiciel qui utilise la théorie d'équilibre limite pour calculer le facteur de sécurité des pentes. La formulation complète de SLOPE/W permet d'analyser facilement les problèmes de stabilité des pentes simple et complexe en utilisant différentes méthodes de calcul du facteur de sécurité.

SLOPE/W a des applications dans l'analyse et conception des projets géotechnique, civil, hydrogéologique et minier.

IV .2.1. L'interface du logiciel :

Les menus disponibles et la fonction de chacun sont les suivants :

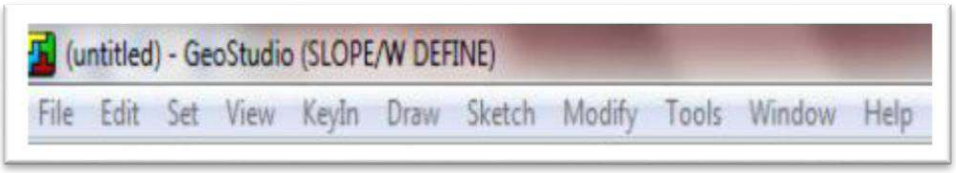


Figure IV .2: Menus disponibles sur logiciel SLOPE/W.

- **File (fichier) :** ouvre et enregistrer les fichiers, les importations des photos et imprime le dessin.
- **Edit (édition) :** permet de copier le dessin dans la Presse-papiers du Windows ;
- **Set (définir) :** définit les paramètres du gille, le zoom, l'échelle, les axes et de la Page.
- **Vieu (Afficher) :** option d'affichage des contrôles, des informations des sols et des points, et d'affiche les forces inter-tranche sur un schéma corporel de chaque tranche et le polygone force.

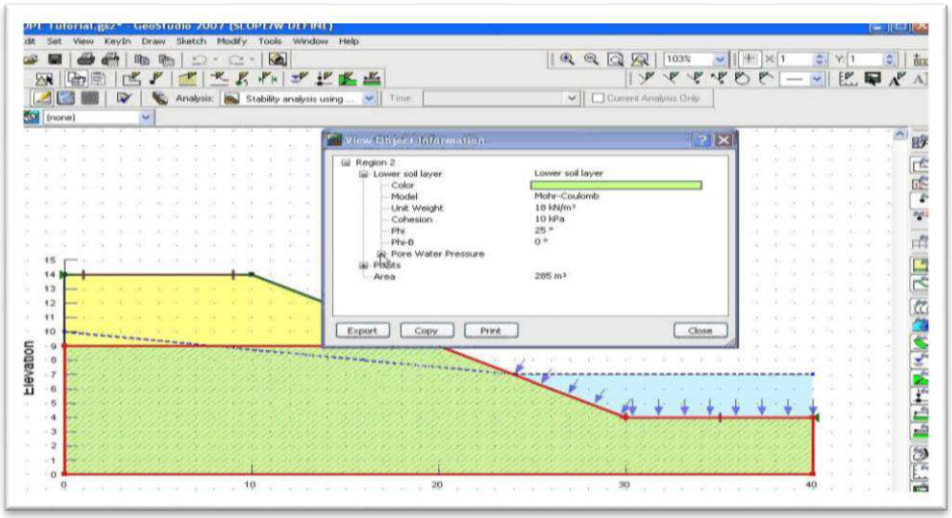


Figure IV .3: Affichage des informations des sols.

- **Keyin (entre) :** permet d'introduire automatique à l'aide des tableaux des paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), les caractéristique mécanique des différentes couches constituant le talus.
- **Draw (dessin) :** permet d'introduire manuellement les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, les surcharges et les confortements.

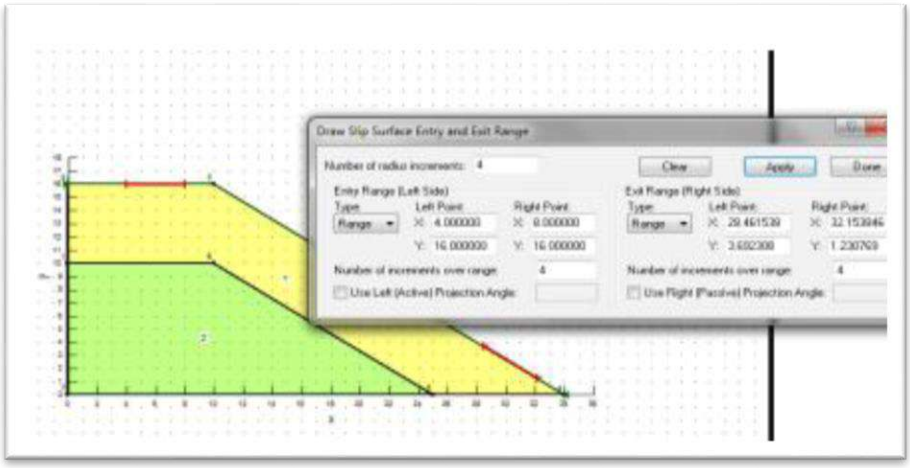


Figure IV .4: Conditions complémentaires nécessaires pour le calcul.

- **sketch (croquis) :** définit les objets graphiques d'étiqueter, d'améliorer et de clarifier les résultats du problème.

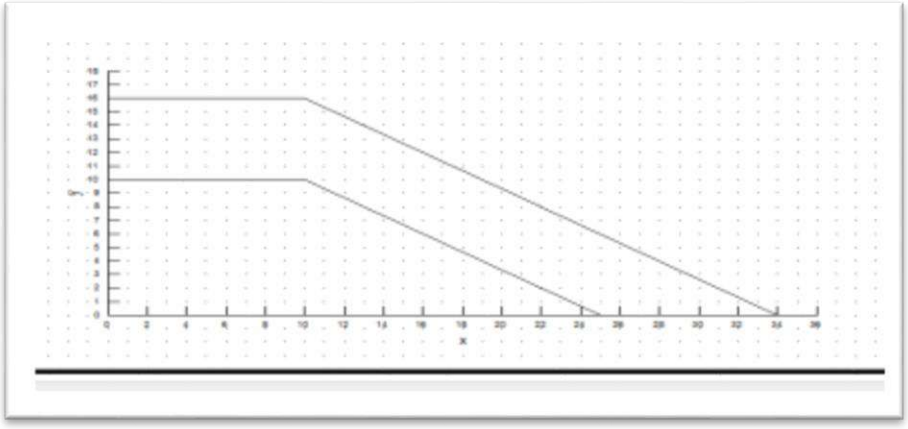


Figure IV .5: Géométrie du problème

- **Modify (modifier) :** perme t de déplacer, modifier ou supprimer les objets graphiques, les textes et les photos.
- **Tools :** à l'aide de cette icône on peut vérifier toutes les données de ce problème ainsi faciliter l'accès pour sa r

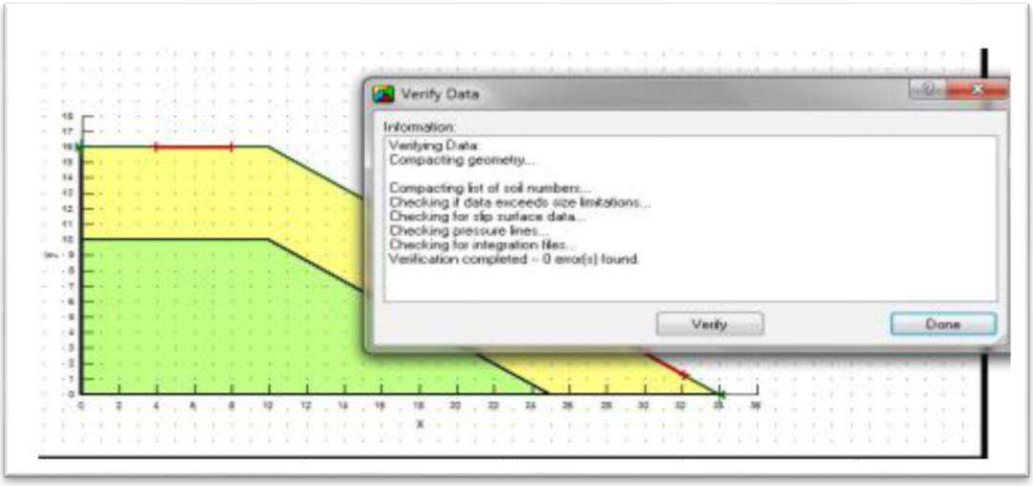


Figure IV .6: Vérification des données du problème.

IV.2.2. Introduction à l'utilisation SLOPE/W pour l'analyse probabiliste:

On crée un nouveau projet et on spécifie le type de l'analyse et la méthode de calcul Probabiliste.

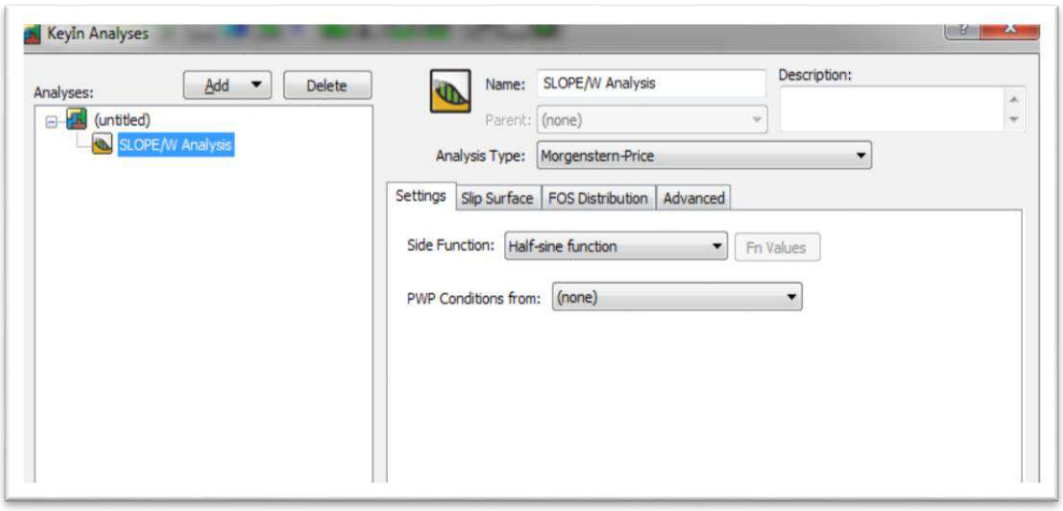


Figure IV.7: Création d'un nouveau projet sur SLOPE/W

On choisit le type de calcul du coefficient de sécurité (constant ou bien une distribution probabiliste.

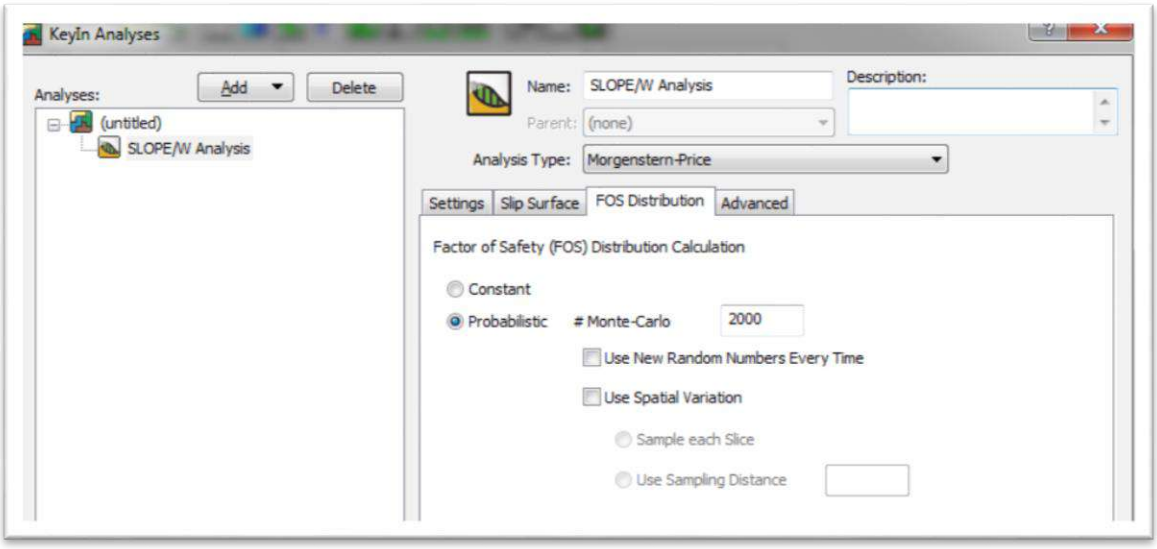


Figure IV .8 : Choix de type du facteur de sécurité

On spécifie dans quel sens les surface de rupture vont être effectuées et aussi le mode de dessin de ces surfaces.

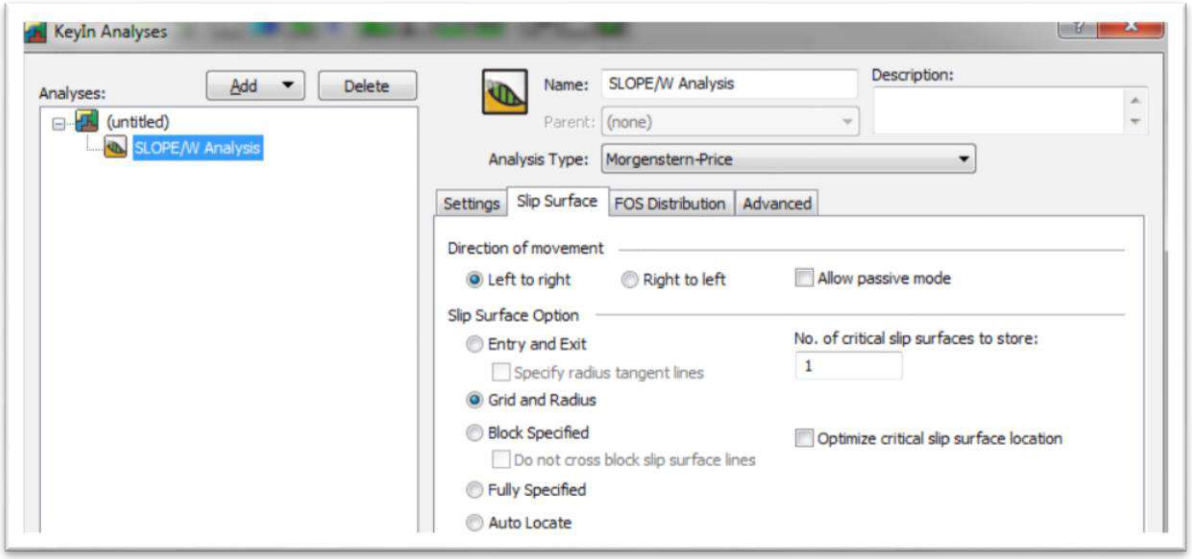


Figure IV .9 : Spécification des surfaces de rupture

La délimitation de la surface du travail, la définition de l'échelle et la fixation d'axes se fait à l'aide de la commande set.



Figure IV .10 : Barre d'outils du logiciel SLOPE/W.

La commande Keyln est utilisée pour La définition des propriétés du sol (le modèle du sol et le type de distribution des paramètres).

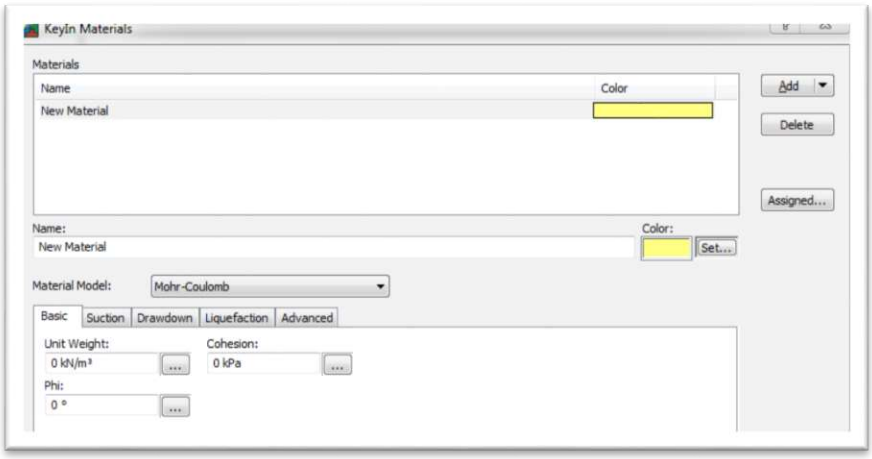


Figure IV .11 : Création des matériaux dans l'outil SLOPE/W.

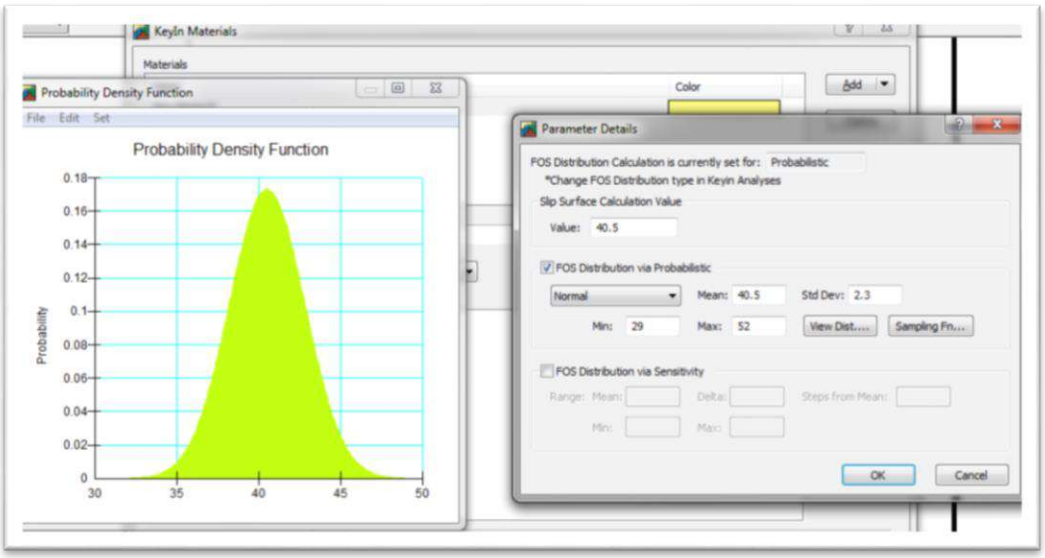


Figure IV .12 : Définition des matériaux pour le calcul probabiliste

- La commande Draw : elle sert au dessin de points, des lignes, la ligne piézométrique et les surfaces de rupture

- La commande Modify: cette instruction permet aux utilisateurs de rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

Résolution du problème et visualisation des résultats :

- La commande Solve : C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et a partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité Fs.

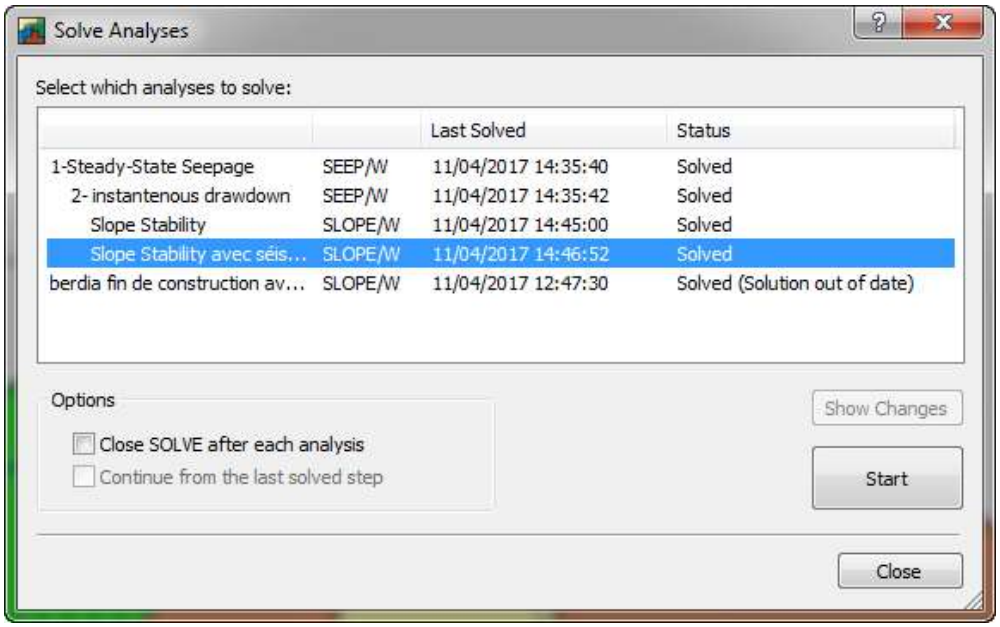


Figure IV .13 : Résolution du problème

- La commande Contour : C'est l'étape chargée de traduire les différents résultats sous une forme graphique; et d'afficher ces résultats.

IV.3. Analyse probabiliste par méthode SMC:

Pour effectuer une analyse probabiliste par la méthode de Monte-Carlo, la première étape est de sélectionner la distribution probabiliste pour le facteur de sécurité pendant la création d'un nouveau projet (voir figure 4.6).

La deuxième étape est de choisir une distribution probabiliste pour les paramètres aléatoires (voir figure 4.12) après avoir déterminer la géométrie du problème (dans notre cas, les paramètres aléatoires sont la cohésion et l'angle de frottement).

Après avoir compléter la définition du problème et la résolution, on passe à visualisation des résultats de calcul, avec la commande contour on aura les résultats de calcul déterministe, et la commande **Draw probability'** nous donne les résultats de calcul probabiliste.

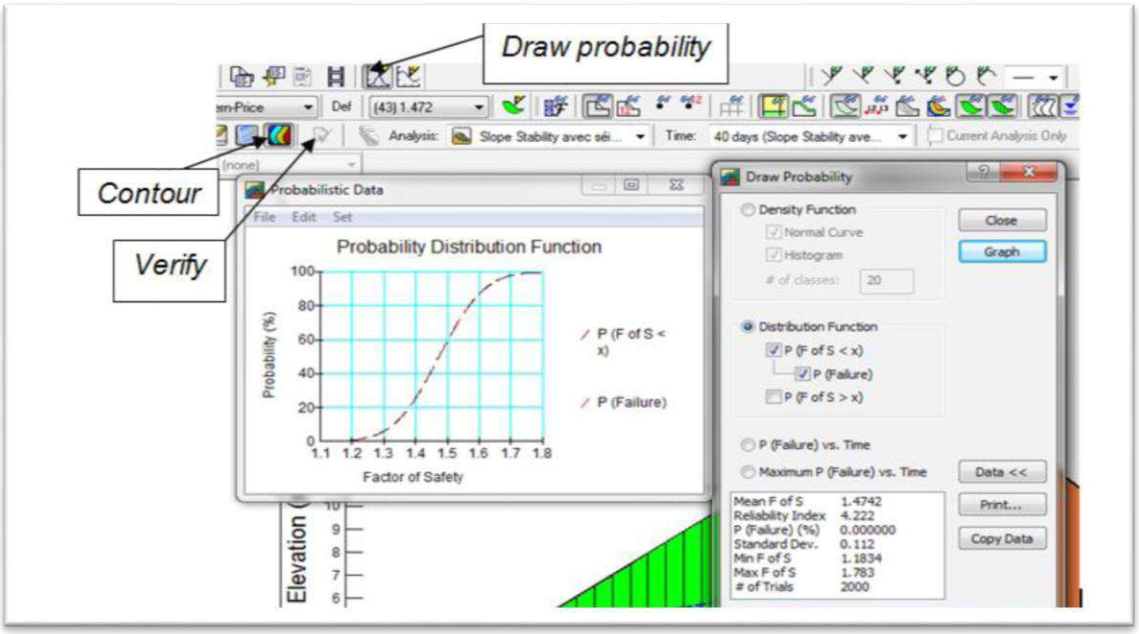
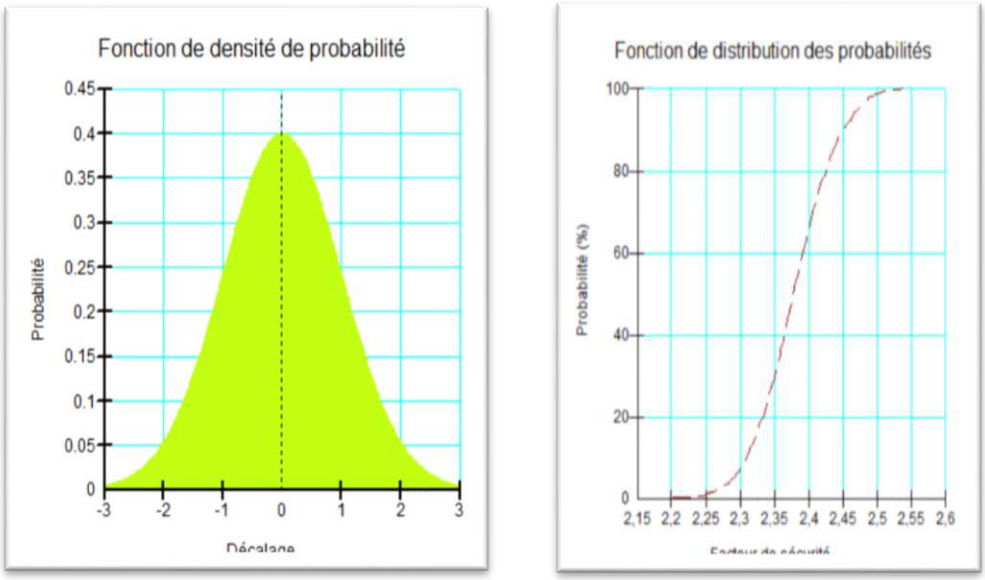


Figure IV .14 : Affichage des résultats de calcul probabiliste.



a) **b)**

Figure IV.15 : Résultats de l'analyse probabiliste (Géo-Slope)

a)-sous forme d'une fonction de densité de probabilité

b)- sous forme d'une fonction de distribution de probabilité.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait un aperçu générale le progiciel Géo-Studio qui comprend le code SLOPE/W. Ce dernier permet d'effectuer le calcul de stabilité de talus par les méthodes déterministes d'équilibre limite et par une démarche fiabiliste de procéder à une analyse probabiliste en utilisant la Simulation de Monte-Carlo (SMC). Dans ce contexte, on s'intéressera dans le prochain chapitre à l'application du code SLOPE/W et à l'étude de la stabilité de talus en utilisant les deux méthodes.

Modélisation Du Calcul De La Stabilité Des Talus Par SLOPE /W

Chapitre V :

V .1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à une étude de la stabilité d'un talus de remblai par les méthodes déterministes et l'analyse probabiliste basée sur la méthode fiabilité, simulation de Monte-Carlo puis procéder à un examen d'étude comparative entre les deux méthodes énumérées précédemment sur la base des calculs du facteur de sécurité Fs pour le talus à l'aide du code Géo-Slope faisant partie du progiciel Géo-studio de l'université d'Alberta (Canada).

V .2.Modélisation numérique :

Les données géotechniques utilisées dans cette étude sont :

Tableau V.1 : Données géotechniques de talus.

Type	Cohésion C' (KPA)	Angle de frottement $\varphi'(°)$	La masse volumique $\gamma(KN/m^3)$
Fondation	5	5	20
Remblai	12	30	18

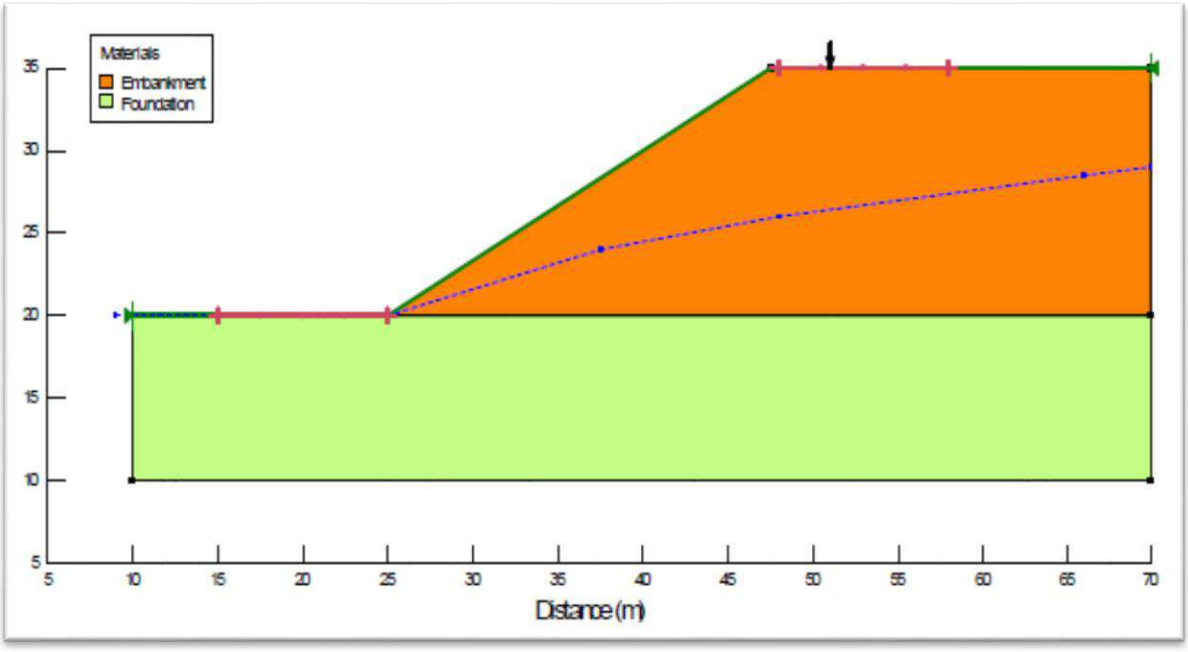


Figure. V.1: Domaine de problème pour l'analyse de stabilité.

V.2.1 Méthode déterministe d'équilibre limite :

❖ **Méthodologie :**

Pour analyser le problème, nous avons suivi les étapes suivantes:

- détermination de la géométrie de talus.
- définition des matériaux de talus et de la fondation et on a introduit leurs caractéristiques mécaniques.
- Pour la détermination des surfaces de rupture on a choisi la méthode des entrée-sorties, technique développée par le code de calcul du logiciel Géo-stoppe.

❖ **Résultats de modélisation :**

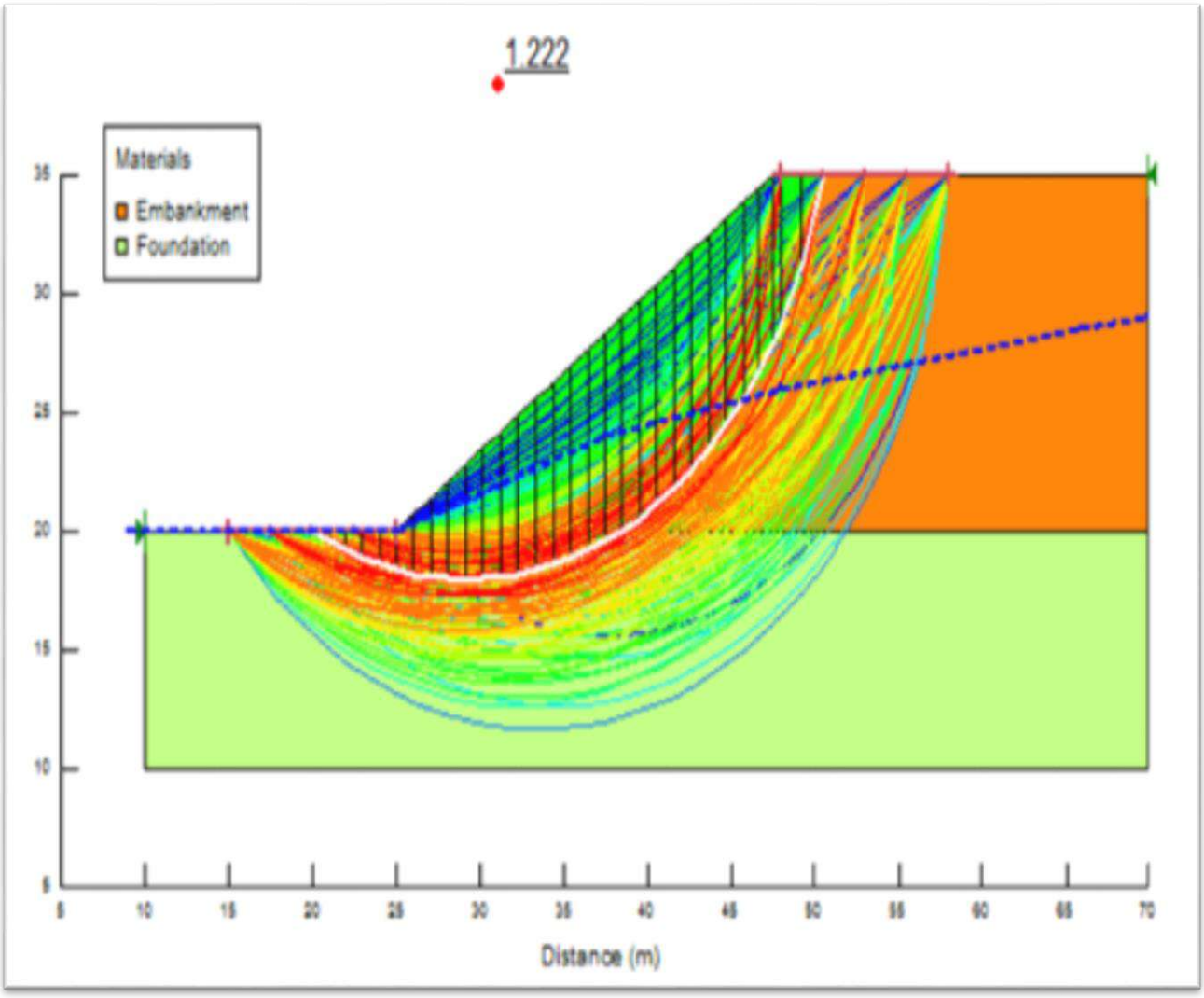


Figure V.2 : Présentation de la surface critique de glissement.

Tableau V.2: Résultats de calcul du facteur de sécurité Fs selon la méthode d'équilibre limite

Slip #	F of S	X Center (m)	Y Center (m)	Radius (m)	Details
130	1.222	29.225	39.75	21.799	Critical (analysis)
129	1.224	27.98	42.283	23.668	Stored in file
120	1.227	28.648	37.49	19.511	Stored in file
74	1.229	27.078	42.729	24.665	Stored in file
119	1.231	27.595	39.456	20.886	Stored in file
185	1.231	30.095	39.456	20.886	
175	1.233	29.471	37.325	18.675	
75	1.233	28.296	40.049	22.771	
184	1.237	28.816	41.843	22.738	
174	1.241	28.386	39.168	20.051	
140	1.242	29.578	42.729	24.665	
85	1.243	28.624	43.182	25.713	
54	1.244	26.725	39.75	21.799	
131	1.247	30.254	37.658	20.42	
176	1.248	30.386	35.769	17.631	
121	1.249	29.54	35.825	18.478	
55	1.251	27.754	37.658	20.42	
186	1.251	31.148	37.49	19.511	
19	1.252	26.124	43.182	25.713	

V.2.2.Calcul probabiliste - Monte-Carlo simulation (MCS) :

- **Méthodologie :**

Les entrées probabilistes pour cette analyse sont illustrées à la figure 3. Dans SLOPE / W, la dispersion des données d'entrée est décrite à l'aide d'une fonction de décalage de probabilité. Par exemple, l'angle de frottement (φ') du matériau de remblai est représenté sur la figure 4. Le décalage de la moyenne est nul; c'est-à-dire que la distribution normale de (φ') sera centrée sur la valeur déterministe spécifiée comme 30 °. La dispersion est spécifiée comme un écart type. Cela signifie que (φ') variera entre 27 et 33 ° ou (φ') sera de 30 ± 3 °.

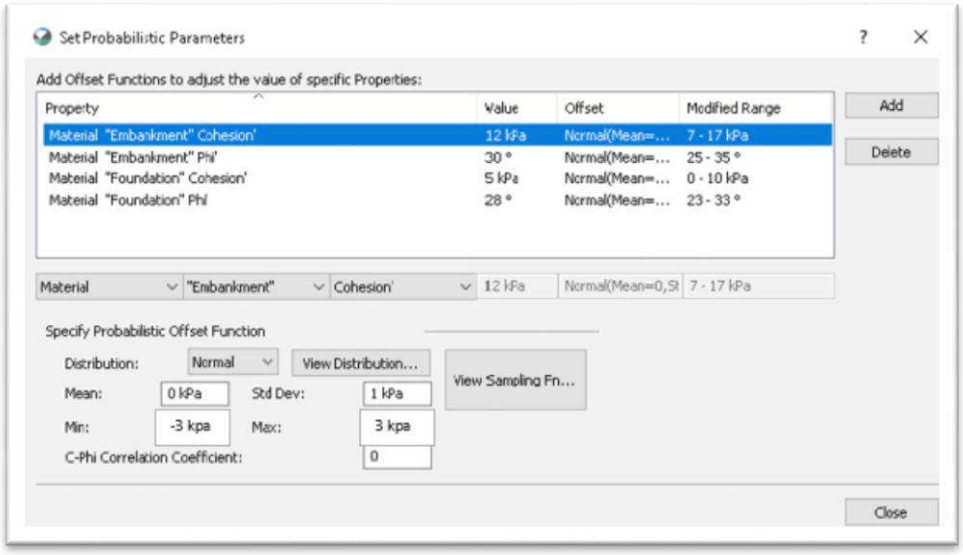


Figure V. 3: Paramètres probabilistes pour l'analyse .

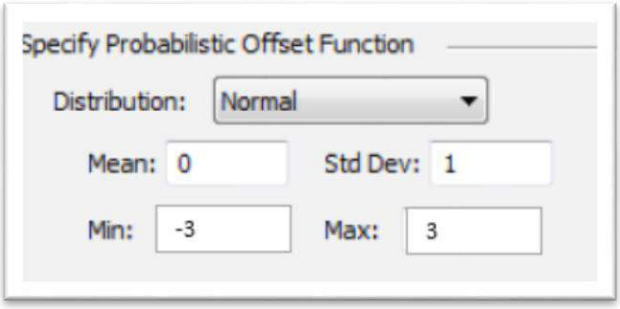


Figure V. 4: Propriétés de la fonction de décalage de l'angle de frottement.

❖ Résultats et discussions

La fonction de densité de probabilité et la fonction d'échantillonnage sont présentées respectivement aux figures 5 et 6.

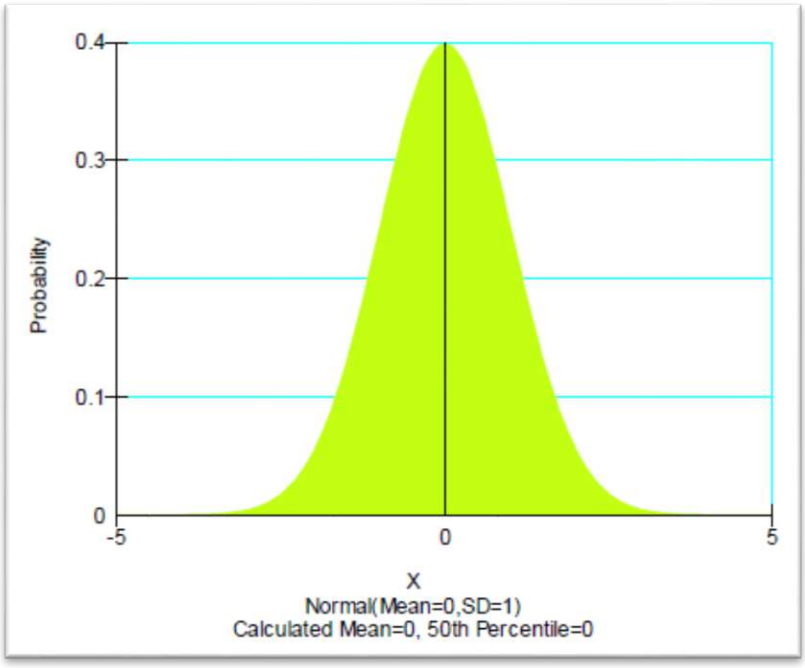


Figure V.5: Une fonction de densité de probabilité typique.

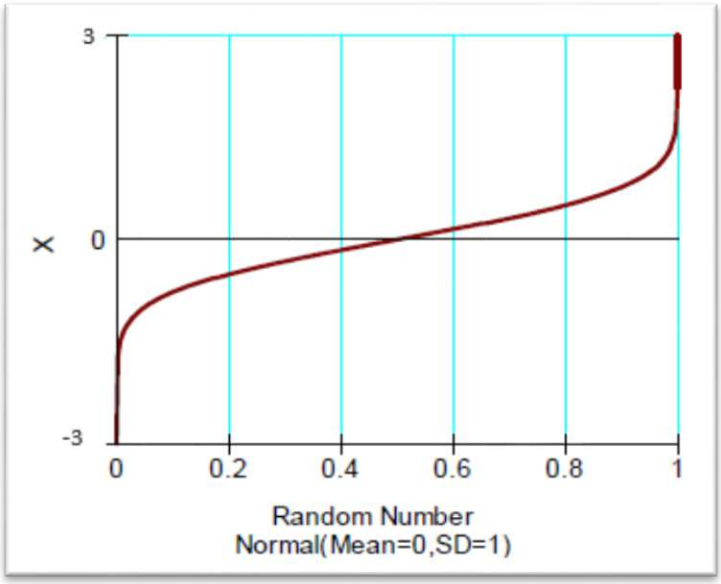


Figure V.6 : Une fonction d'échantillonnage typique.

La figure7 présente l'emplacement de la surface de glissement critique et du FS déterministe pour. Un résumé des résultats probabilistes pour l'analyse probabiliste est donné dans le tableau 2. Il montre les facteurs de sécurité minimum et maximum.

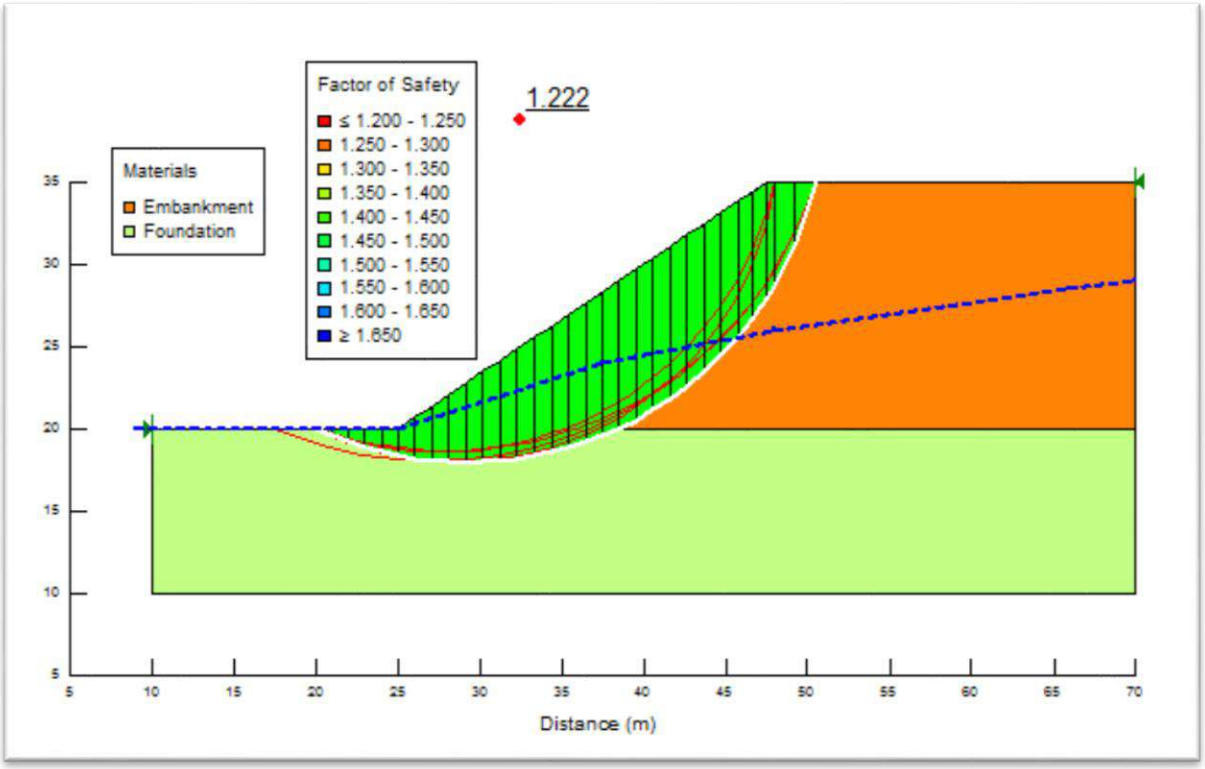


Figure V .7: FS déterministe et emplacement de la surface de glissement critique pour l'analyse probabiliste.

Tableau V.3 : Résultats probabilistes pour l'analyse probabiliste.

Slip #	F of S	P(Failure)	Reliability Index	Mean F of S	Std. Dev. F of S	Min. F of S	Max. F of S
1	1.222	0	5.8551	1.2219	0.037903	1.02	1.3328
2	1.224	0	5.9703	1.2241	0.037537	1.0232	1.3376
3	1.227	0	5.7972	1.227	0.039158	1.0202	1.346
4	1.229	0	5.9441	1.2288	0.038494	1.0204	1.3423
5	1.231	0	5.924	1.2303	0.038871	1.0249	1.3517

Dans cette analyse, la surface de glissement avec le facteur de sécurité le plus bas a également le facteur de sécurité probabiliste le plus bas (rupture 01). Cette tendance ne se produit pas toujours.

En afficher la fonction de densité de probabilité et la fonction de distribution de probabilité résultantes (Figure 8 et Figure 9).

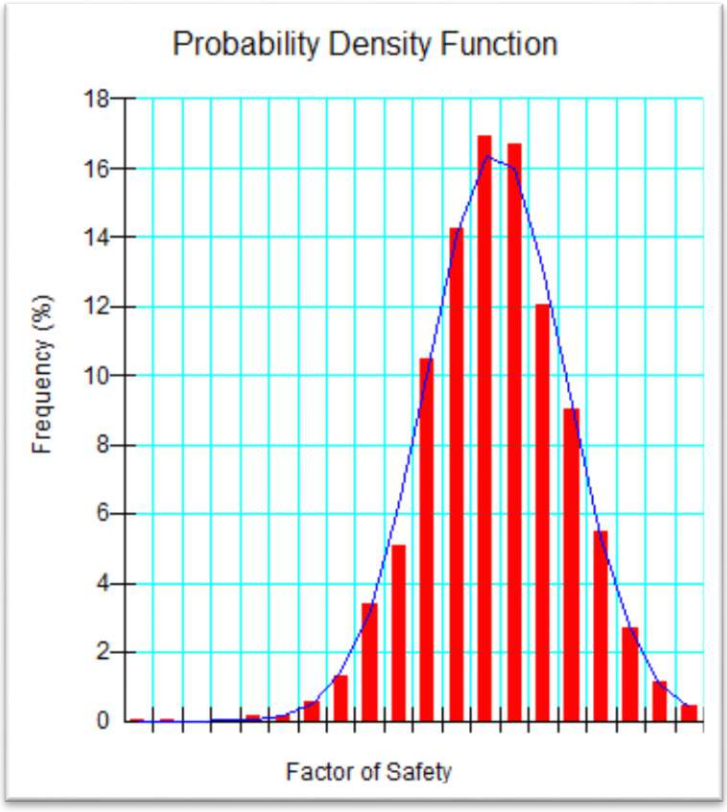


Figure V.8 : Fonction de densité de probabilité

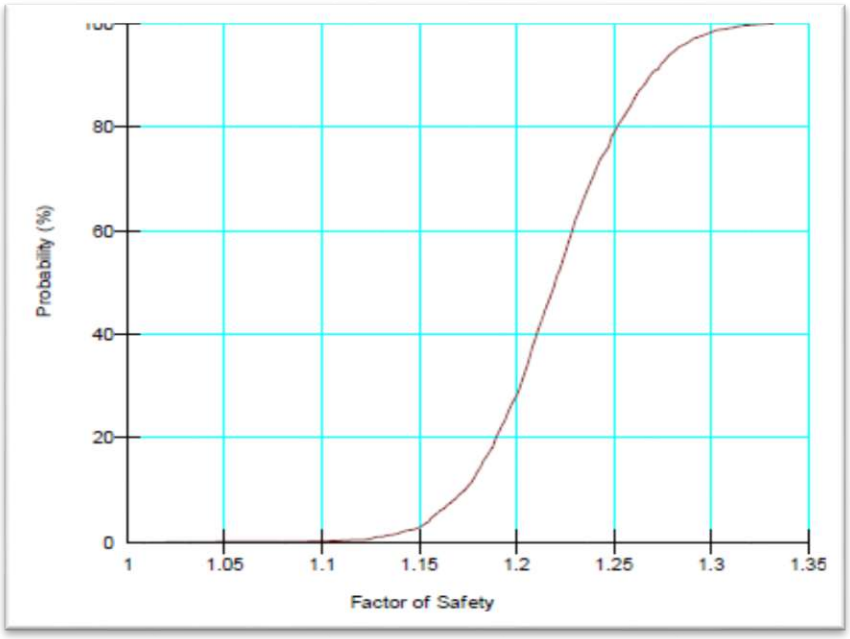


Figure V.9 : Fonction de distribution de probabilité.

La probabilité de rupture est nulle car le facteur de sécurité minimum est toujours supérieur à 1,0. Autrement dit, les résultats indiquent qu'il y a une certitude à 100% que le coefficient de sécurité ne tombera pas en dessous de 1,0 étant donné la variabilité des entrées. Le facteur de sécurité minimum est cependant proche de l'unité.

Conclusion :

Ce chapitre montre comment établir une analyse déterministe et probabiliste dans SLOPE /W. Une analyse probabiliste peut être effectuée sur une variété d'entrées, compris les propriétés des matériaux, les conditions de pression de l'eau interstitielle, les charges externes etc..... Les entrées et les résultats peuvent être interprétés dans le contexte d'une fonction de distribution de probabilité ou d'une fonction de densité de probabilité. Les résultats comprennent des sorties telles que la probabilité de rupture, le FS minimum et maximum, l'indice de fiabilité et d'autres informations.

On a fait une étude comparative de calcul de stabilité par les méthodes déterministes d'équilibre limite et la méthode probabiliste par simulation de Monte-Carlo de l'analyse de stabilité des talus, les résultats de l'analyse par les deux méthodes sont en général proches.

Conclusion générale :

Ce travail met en évidence l'insuffisance de l'approche déterministe dans la prédiction de la rupture ainsi il permet d'illustrer l'importance d'une analyse probabiliste dans la vérification de la stabilité.

Les conclusions que l'on peut tirer de cette recherche sont les suivantes

- Les méthodes déterministes de calcul utilisées pour l'analyse de la stabilité des pentes se basent sur des lois de comportement du sol ou des valeurs fixes. C'est pourquoi elle est généralement des valeurs de facteur de sécurité prudentes.
- Le calcul de probabilité de stabilité des pentes est effectué afin de bien illustré tous les cas possibles et quantifié les cas les plus défavorables par un pourcentage de probabilité de rupture.
- Les résultats obtenus d'une analyse probabiliste peut être utilisée pour déterminer la probabilité de rupture correspondant à un facteur de sécurité particulier et donc un critère de risque approprié peut être utilisé dans les calculs.
- La surface de glissement critique dans la méthode déterministe dont le facteur de sécurité minimal ne pas être la même que la surface avec l'indice de fiabilité le plus bas ou probabilité la plus élevée de l'échec.

L'approche probabiliste tient compte de la variabilité spatiale des propriétés des sols. Par conséquent, toutes les informations des tests géotechniques sont implicitement utilisées. Donc, l'indice de fiabilité résultant contient plus d'informations que le facteur de sécurité. Ceci aide l'ingénieur à identifier le cercle de rupture critique le plus probable et non celui ayant le facteur de sécurité minimal. Cependant, et comme tout paramètre de la géotechnique, la probabilité de rupture et l'indice de fiabilité ne valent que par la qualité de leurs données et ne constituent pas un substitut du facteur de sécurité mais ils représentent un complément de calcul.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] V.Rabitaille ,D.Tremblay ; « Mécanique des sols Théorie et pratique . 23 Avril 2003 .

[2] GUIDE MAROCAIN POUR LES TERRASSEMENTS ROUTIERS GMTR

[3] Guide technique de Réalisation des remblais et des couches de forme GTR (2000) .

[4]https://www.academia.edu/25274837/Remblai_sur_zone_compressible_1_Cas_de_R3078_du_TOARC2_au_niveau_de_la_LGV_Kenitra_Tanger

[5] A. BENGOURAIN : M TOUNSI : Mémoire de master ;« Étude bibiographique sur les sols a problèmes en géotechnique » ; Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE ; 2017/2018.

[6] M. DAHDOUH; Mémoire de master « ANALYSE DE LA STABILITE SISMIQUE D'U REMBLAI DE GRANDE HAUTEUR» ; Université Mohamed Boudiaf - M'sila Faculté de technologie ; 2016/2017.

[7] M. Khemissa; A. Seddiki ; Mémoire de master « Analyse De La Stabilité D'une Remblai » ; 2017/2018.

[8] G. Cartier. La stabilisation des pentes instables par clouage. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Bulletin de liaison des LPC. (141) 1986

[9] N.OUHDADOU," EVALUATION DE LA STABILITE DES TALUS PAR UNEAPPROCHE FIABILSTE ", Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene 12/ 2005.

[10] J-P.MASEKANYA, Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur "Stabilité des pentes et saturation partielle Etude expérimentale et modélisation numérique», UNIVERSITE DE LIEGE FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES2007/2008.

[11] K .M'zouyhem. ;W. Chenafa ," Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain El Kabira (Sétif) " Mémoire de magister, géologie de l'ingénieur, Université Farhat Abbas Sétif , 2006 .

[12] F.ACHIR, M.MEDJOUDj,"Etude Géotechnique D'un Tronçon De La Pénétrante Autoroutière Reliant Le Port De Bejaia à l'AutoRoute Est-Ouest Au Niveau d'Ahnif De PK35+000 AuPK 36+800", Université A. MIRA-Bejaia Faculté de Technologie, 2016/2017

[13] H. DOUMI, Mémoire de Master), " ETUDE COMPARATIVE DES METHODES ANALYTIQUES ET NUMERIQUES EN STABILITE DES PENTES",Faculté de technologie Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2015/2016.

[14] N. HAOUES, S .LOUCIF) ,Mémoire de mastee" DE STABILITE D'UN TALUS CAS REEL : CITE CILOC –CONSTANTINE", Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi Faculté des Sciences et Sciences appliqué , 21 / 06 / 2017.

[15] E. Spencer. A. Méthode of analysais of the STABILITY of EMBANKMENTS ASSUMING PARALLEL INTERSLICE forces. Géotechnique, Vol. 17, N°1, pp. 11–26, 1967.

[16] N.Racana, "Etude du comportement mécanique d'un massif en sol renforcé par géotextile cellulaire" Thése de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermontii.20 Décembre 2002.

[17] G. Sanglerat et J.Costet.: « Cours pratique de mécanique des sols (calcul des ouvrages) », tome II. (1983).

[18] J- B. MARTINS, B.REISE. ET A. C MATOS), "NEW METHODS OF ANALYSIS FOR STABILITY OF SLOPES", Proceedings of The 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm. Vol. 3, P 463-467,1981.

[19] 0. C ZIENKIEWICZ, C. HUMPHESON ET W. LEWIS L, "ASSOCIATED AND NON- ASSOCIATED VISCO-PLASTICITY AND PLASTICITY IN SOIL MECHANICS", Géotechnique, London, England, Vol. 25(4), P 671-689. 1975.

[20] N.RAHMANI," Méthodes stochastiques de calcul de stabilité des pentes" Mémoire de magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI- TIZI OUZOU ;03 / 2011

[21] M.SELMI, M.LTIFI et N.BEL HADJ ALI , "APPLICATION DE LA METHODE DE MONTE CARLO DANS L'ANALYSE DE LA STABILITÉ DES PENTES», Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - 2006 .

[22] R. MELLAH, F.MASROURI,"La méthode des éléments finis stochastiques en géotechnique», Laboratoire Environnement Géotechnique et Ouvrages Ecole nationale supérieure de géologie, INPL Nancy 08/ 2001.

[23] N. Sekfali ," FIABILITE DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES ",Thése De Doctorat, l'université 8 Mai 1945 de Guelma

[24] KRAHN.J Seepage Modeling with SEEP/W, an Engineering Methodology. First Edition, GEO-SLOPE/W International, Ltd., Canada, 2004

[25] A-L. JONES., S-L KRAMER, P. ARDUINO. ," Estimation of Uncertainty in Geotechnical Properties for Performance-Based Earthquake Engineering, PEER-2002/16, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Université de California, Berkeley, p100.2002

[26] TALAICHE.Z"ANALYSE PROBABILISTE DE LA STABILITE D'UN TALUS RENFORCE PAR GEOTEXTILES" Mémoire de magister, UNIVERSIT. Dr YAHYA FARES DE MEDEA2010/2020.

[27] MOGHADARIPOUR. M, ASKARI. F, SHAFIEE.A." Application of Reliability in Stability Analysis of an Earth Dam",JSEE Vol. 15, No. 3 & 4;2013.

[28] J-P, Magnan ," Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des Sols "Paris, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1982.

GEO-SLOPE International Ltd. Stability Modeling with SLOPE/W. GEO SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada, 2012.