

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : GEOTECHNIQUE

Présenté par : BENCHEIKH ABD ELBASSIT

**Thème : Modélisation numérique et prédiction de la
stabilité des talus en utilisant l'intelligence
artificielle.**

Sous la direction de : Pr. LAFIFI Brahim

Juin 2025

REMERCIEMENT

À l'issue de cette étude, je désire ardemment rendre grâce à Allah « ﷻ », le ToutMiséricordieux, pour avoir gratifié mon être de l'endurance, du courage et de la détermination qui m'ont permis de mener cette recherche à son apogée.

En tête de mes remerciements, je souhaite sincèrement exprimer ma gratitude profonde envers mon à mon encadreur « Pr. LAFIFI Brahim », pour sa constante bienveillance, ses conseils éclairés et son inestimable expertise, qui m'ont accompagné tout au long de ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers les membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation de mon travail et pour leur précieuse contribution.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers mes enseignants du département de Génie Civil et Hydraulique qui ont veillé à ma formation tout au long de mes cinq années d'études universitaires.

Je tiens à remercier aussi l'ensemble du personnel de département de Génie Civil et de L'Hydraulique.

Il est tout aussi essentiel pour moi d'exprimer ma gratitude envers mon ami « belmoussa ramzi », dont l'aide précieuse et les commentaires édifiants, empreints d'un amour indéfectible, ont contribué à l'essor de ce travail.

Enfin, mes sincères remerciements se tournent vers ma famille et mes amis, dont le soutien moral et les encouragements inébranlables ont éclairé chacune des étapes de mon parcours académique.

« Merci à vous tous »

Résumé

Résumé :

L'objectif de ce travail de fin d'études est de modéliser numériquement et de prédire la stabilité des talus, en utilisant la méthode des surfaces de réponse et les réseaux de neurones artificiels. La modélisation numérique sera réalisée avec le logiciel Plaxis 3D, qui repose sur la méthode des éléments finis. Des plans d'expériences numériques seront élaborés, prenant en compte les paramètres géométriques et géotechniques du talus, tels que sa hauteur, son inclinaison, l'angle de frottement interne, la cohésion et le poids volumique du sol. Cela permettra d'estimer le coefficient de sécurité du talus étudié. La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN) seront employés pour développer des modèles mathématiques reliant les paramètres d'entrée et de sortie. Enfin, ces modèles seront comparés à l'aide de métriques précises afin de déterminer le meilleur modèle de prédiction.

Mots clés : Stabilité des talus - Modélisation numérique - coefficient de sécurité - Prédiction - RSM - ANN.

Résumé

ملخص:

تهدف أطروحة السنة النهائية هذه إلى نمذجة استقرار المنحدر رقميًا والتنبؤ به باستخدام طريقة سطح الاستجابة والشبكات العصبية الاصطناعية. ستجرى النمذجة الرقمية باستخدام برنامج Plaxis 3D ، القائم على طريقة العناصر المحدودة. سيتم تطوير تصاميم تجريبية رقمية، مع مراعاة المعلومات الهندسية والجيو تكنولوجية للمنحدر، مثل ارتفاعه، وميله، وزاوية الاحتكاك الداخلي، وقوة التماسك، ووحدة وزن التربة. سيسمح ذلك بتقدير عامل الأمان للمنحدر قيد الدراسة. سيتم استخدام منهجية سطح الاستجابة (RSM) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لتطوير نماذج رياضية تربط بين معلومات الإدخال والإخراج. وأخيرًا، ستقارن هذه النماذج باستخدام مقاييس دقيقة لتحديد أفضل نموذج تنبؤ.

– الكلمات المفتاحية: استقرار المنحدر - النمذجة الرقمية - عامل الأمان - التنبؤ
RSM - ANN.

Abstract

The objective of this final study is to numerically model and predict the stability of slopes using the response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN). The numerical modeling will be carried out using Plaxis 3D software, which is based on the finite element method. Numerical experimental designs will be developed, considering the geometric and geotechnical parameters of the slope, such as its height, inclination, internal friction angle, cohesion, and unit weight of the soil. This will allow for the estimation of the safety factor of the studied slope. The response surface methodology and artificial neural networks will be used to develop mathematical models linking input and output parameters. Finally, these models will be compared using precise metrics to determine the best predictive model.

Keywords: Slope stability – Numerical modeling – Safety factor – Prediction – RSM – ANN.

Table des matières

Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص.....	IV
Table des matières.....	V
Liste des figures et courbes.....	IX
Liste des symboles	X
Introduction générale.....	XI

Chapitre 1 : Fondements théoriques et état de l'art

• I.1 Introduction	1
• I.2 Types de rupture	1
○ I.2.1 Pentcs naturelles	1
○ I.2.2 Talus artificiels	2
• I.3 Mouvement de terrain	2
• I.4 Types de mouvements	2
○ I.4.1 Écroulements ou chute de blocs	2
○ I.4.2 Coulées boueuses	3
○ I.4.3 Fluage	4
○ I.4.4 Glissements	5
▪ I.4.4.1 Glissement de terrain	5
▪ I.4.4.2 Caractéristiques d'un glissement	6
▪ I.4.4.3 Description d'un glissement	7
▪ I.4.4.4 Types de glissement	7
▪ I.4.4.5 Autres types de glissement	11
▪ I.4.4.6 Causes de glissements	12
• I.5 Synthèse	14

Chapitre 2 : Exposé des méthodes de calcul de la stabilité des pentes

• II.1 Introduction	16
• II.2 Méthodes de calcul	16
○ II.2.1 Méthodes à l'équilibre limite	16

Table des Matières

▪ II.2.1.1 Considérations générales	16
▪ II.2.1.2 Domaine des études à l'équilibre limite	16
▪ II.2.1.3 Coefficient de sécurité à l'équilibre limite	18
▪ II.2.1.4 Formes de surface de rupture	19
▪ II.2.1.4.1 Surface de rupture plane	19
▪ II.2.1.4.2 Surfaces de rupture circulaires	23
▪ II.2.1.4.3 Surface de rupture de forme quelconque	25

Chapitre 3 : Exposé des méthodes de prédiction utilisées

• III.1 Introduction à la planification expérimentale	30
• III.2 Méthodologie des surfaces de réponse (RSM)	30
○ III.2.1 Principes généraux	30
○ III.2.2 Étapes de la méthodologie RSM	31
▪ Planification expérimentale	31
▪ Modélisation	32
▪ Validation des modèles	33
○ III.2.3 RSM pour l'optimisation en ingénierie	34
• III.3 Réseaux de neurones artificiels (ANN)	35
○ III.3.1 Introduction aux ANN	35
• III.4 Notions de base sur les ANN	36
○ III.4.1 Du neurone biologique au neurone artificiel	36
○ III.4.2 Réseaux de neurones	37
▪ III.4.2.1 Réseau non bouclé	38
▪ III.4.2.2 Réseau bouclé (Récurent)	39
• III.5 Types de modèles de neurones	40
○ III.5.1 Neurone à entrée simple	40
○ III.5.2 Neurone à entrées multiples	41
• III.6 Apprentissage des ANN	42
○ III.6.1 Types d'apprentissage	42
▪ III.6.1.1 Apprentissage supervisé	42
▪ III.6.1.2 Apprentissage renforcé	43

Table des Matières

▪ III.6.1.3 Apprentissage non supervisé	43
○ III.6.2 Algorithme d'apprentissage	43

Chapitre 4 : Proposition et validation d'un modèle numérique en 3D de stabilité de talus

• IV.1 Introduction	45
• IV.2 Présentation du modèle numérique	45
• IV.3 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques	47
○ IV.3.1 Le sol (Modèle Mohr-Coulomb)	47
• IV.4 Résultats de la modélisation	48
• IV.5 Étude paramétrique	50
○ IV.5.1 Introduction	50
○ IV.5.2 Influence de la cohésion (c) sur F_s	50
○ IV.5.3 Influence de l'angle de frottement (ϕ) sur F_s	51
○ IV.5.4 Influence de la hauteur (H) sur F_s	52
○ IV.5.5 Influence de l'inclinaison (β) sur F_s	53
○ IV.5.6 Influence du poids volumique (γ) sur F_s	54
• IV.6 Conclusion	55

Chapitre 5 : Analyse comparative des méthodes de prédiction

• V.1 Introduction	56
• V.2 Choix d'un plan d'expérience.....	56
• V.3 Modélisation par RSM	58
○ V.3.1 Analyse de régression (R^2 , ANOVA)	58
• V.4 Modélisation par ANN	59
• V.5 Comparaison RSM/ANN (RMSE, RAE)	61

Conclusions Générales et perspectives

• Conclusions	65
• Perspectives (Limites & Recherches futures)	65

Liste des Figures

Chapitre I : Fondements théoriques et état de l'art

• Figure I.1 : Les écroulements et les chutes de blocs	3
• Figure I.2.a : Les coulées boueuses	3
• Figure I.2.b : Coulée d'éboulis	4
• Figure I.3 : Mécanisme de fluage	5
• Figure I.4 : Glissement de terrain	5
• Figure I.5 : Éléments descriptifs d'un glissement de terrain	8
• Figure I.6 : Glissement plan	9
• Figure I.7 : Glissement rotationnel	9
• Figure I.8 : Glissement circulaire superficiel	10
• Figure I.9 : Glissement circulaire profond	10
• Figure I.10 : Glissement complexe	11
• Figure I.11 : Glissements successifs	11
• Figure I.12 : Rupture sensiblement circulaire	13
• Figure I.13.a : Glissement non circulaire	14
• Figure I.13.b : Glissement circulaire	14

Chapitre II : Méthodes de calcul de stabilité

• Figure II.1 : Talus infinis avec écoulement d'eau	20
• Figure II.2.a : Surface de rupture à deux segments plans	21
• Figure II.2.b : Surface de rupture à trois segments plans	22
• Figure II.3 : Méthode des tranches	23
• Figure II.4 : Méthode de JANBU - forces en présence	25
• Figure II.5 : Forces dans la méthode des tranches	27
• Figure II.6 : Forces inter-tranches (méthode ordinaire)	27

Chapitre III : Méthodes de prédiction

• Figure III.1 : Étapes de la méthodologie RSM	31
• Figure III.2 : Neurone biologique (arborisation dendritique)	36
• Figure III.3 : Correspondance neurone biologique/artificiel	37
• Figure III.4 :	

Liste des Figures

○ a) Fonction de Heaviside	38
○ b) Fonction signe	38
• Figure III.5 :	
○ a) Fonction linéaire à seuil	38
○ b) Fonction sigmoïde	38
• Figure III.6 : Réseau de neurones feedforward	39
• Figure III.7 : Réseau de neurones récurrent à deux entrées	40
• Figure III.8 : Neurone à entrée unique	40
• Figure III.9 : Neurone à entrées multiples	42

Chapitre IV : Modèle 3D de stabilité

• Figure IV.1 : Géométrie du modèle de référence	45
• Figure IV.2 : Modèle 3D adopté	46
• Figure IV.3 : Maillage du modèle	46
• Figure IV.4 : Paramètres géotechniques du sol	48
• Figure IV.5 : Coefficient de sécurité (résultats)	49
• Figure IV.6 : $F_s = f(\text{cohésion } c)$	51
• Figure IV.7 : $F_s = f(\text{angle de frottement } \varphi)$	52
• Figure IV.8 : $F_s = f(\text{hauteur du remblai } H)$	53
• Figure IV.9 : $F_s = f(\text{inclinaison du talus } \beta)$	54
• Figure IV.10 : $F_s = f(\text{poids volumique } \gamma)$	55

Chapitre V :Analyse comparative des méthodes de prédication

Figure V. 1: Probabilités normales des résidus du facteur de sécurité.....	59
Figure V.2: Valeurs prédites par rapport aux valeurs numériques pour le facteur de sécurité..	60.
Figure V.3: Architecture du réseau de neurones artificiels (5-5-5-1) pour facteur de sécurité.	61

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

Lettres grecques

α Angle entre la direction de la contrainte tangentielle avec l'horizontale [°]

β Angle de la pente avec l'horizontale [°]

γ_h Poids volumique [kN/m³]

γ_d Poids volumique sec [kN/m³]

γ' Poids volumique déjaugé [kN/m³]

γ_{sat} Poids volumique saturé [kN/m³]

ϕ_D Angle de frottement développé tout au long de la surface de rupture [°]

ϕ_u Angle de frottement apparent (non drainé) [°]

ϕ' Angle de frottement effectif [°]

λ Pourcentage (en forme décimale) de la fonction inter-tranches

ν Coefficient de Poisson

σ Contrainte totale [kN/m²]

σ' Contrainte effective [kN/m²]

σ_0 Valeur initiale approchée de la contrainte

σ_{ij} Composante du tenseur de contrainte p

σ_{ij} Composante de contrainte au cycle de calcul précédent

τ_f Résistance ultime de cisaillement [kN/m²]

τ_D Contraintes de cisaillement s'exerçant le long de la surface [kN/m²]

Ψ Angle de dilatance [°]

$\square$ Paramètre de perturbatio

Introduction générale

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans une démarche méthodologique approfondie visant à analyser la stabilité des pentes et à évaluer le facteur de sécurité à l'aide de techniques d'intelligence artificielle et de méthodes statistiques avancées. Face à des défis géotechniques de plus en plus complexes et à l'impact croissant des facteurs environnementaux sur la stabilité des pentes, il devient crucial de développer des méthodes prédictives à la fois précises et efficaces.

Cette recherche s'appuie sur l'intégration de deux approches novatrices : la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Ces méthodes ont été conçues pour traiter des données géotechniques complexes. Dans ce cadre, 724 modèles numériques ont été réalisés à l'aide du logiciel Plaxis 3D, permettant de générer un ensemble de données exhaustif couvrant un large éventail de variables influentes.

L'objectif principal de ce travail est de proposer un modèle prédictif précis, capable d'évaluer le facteur de sécurité des pentes dans des conditions variables. Nous nous concentrerons sur cinq paramètres clés : la cohésion (C), l'angle de frottement interne (ϕ), la hauteur du talus (H), l'inclinaison du talus (β) et le poids volumique du sol (γ). De plus, cette étude vise à comparer l'efficacité des deux méthodes dans la résolution de ce problème complexe.

Structure du mémoire

Chapitre 1 : Fondements théoriques et état de l'art

Ce chapitre établit le cadre théorique nécessaire à la compréhension des enjeux liés à la stabilité des pentes. Nous y aborderons :

- Analyse critique des mécanismes de rupture des pentes : Une étude des différents types de défaillances, tels que les glissements, les effondrements et les coulées de boue, en mettant l'accent sur les facteurs qui les déclenchent.
- Revue de la littérature : Un panorama des recherches précédentes sur la stabilité des pentes, en identifiant les lacunes et les avancées significatives dans le domaine.

Chapitre 2 : Exposé des méthodes de calcul de la stabilité des pentes

Dans ce chapitre, nous présenterons les méthodes classiques et modernes utilisées pour évaluer la stabilité des pentes :

- Méthodes analytiques : Explication des approches traditionnelles, comme la méthode de Bishop et la méthode de Janbu.
- Méthodes numériques : Introduction aux outils numériques, avec une attention particulière sur le logiciel Plaxis 3D, et une discussion sur leur application dans des situations complexes.

Chapitre 3 : Exposé des méthodes de prédiction utilisées

Ce chapitre se concentre sur les deux approches prédictives intégrées dans cette recherche :

- Méthodologie des surfaces de réponse (RSM) : Détails sur le fonctionnement de cette méthode, ses avantages et ses limites, ainsi que des exemples d'application dans le contexte géotechnique.

- Réseaux de neurones artificiels (ANN) : Présentation des principes fondamentaux des ANN, leur architecture et comment ils peuvent apprendre à partir de données pour améliorer la précision des prédictions.

Chapitre 4 : Proposition et validation d'un modèle numérique en 3D de stabilité de talus

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur la création d'un modèle numérique :

- Développement du modèle en 3D : Description des étapes de modélisation, y compris la définition des paramètres et des conditions aux limites.

- Validation du modèle : Méthodes utilisées pour valider la précision et la fiabilité du modèle, y compris des comparaisons avec des études antérieures.

- Étude paramétrique : Analyse de l'influence des différents paramètres sur la stabilité des pentes, permettant d'identifier les facteurs les plus critiques.

Chapitre 5 : Analyse comparative des méthodes de prédiction

Ce dernier chapitre est consacré à une évaluation comparative des deux méthodes de prédiction

- Critères de performance : Définition des critères utilisés pour évaluer l'efficacité et la précision des modèles RSM et ANN.

- Résultats des simulations : Présentation des résultats obtenus, accompagnée d'une discussion sur les avantages et inconvénients de chaque méthode.

- Conclusion et recommandations : Synthèse des résultats et suggestions pour de futures recherches ou applications pratiques, en soulignant les implications pour l'ingénierie géotechnique et la gestion des risques liés à la stabilité des pentes.

Introduction générale

I.1 Introduction

Les mouvements de terrains sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coupées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements gonflement ou retrait des sols,...) et par leur dimension (certains glissement, comme celui de la Clapière dans les Alpes Maritimes, peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m³).

Leur répartition spatiale est guidée par la géologie (nature et facturation des formations affleurantes, hydrogéologie) et par la topographie, c'est-à-dire par l'environnement physique. Ils concernent non seulement les régions montagneuses et côtières, mais aussi les bassins à forte densité de vides souterrains (naturels ou minés), les sols argileux sensibles aux variations de teneur en eau,...

Leur occurrence est très marquée par les variations climatiques (périodes de fortes pluies, fonte des neiges, sécheresse) mais peut aussi être liée à des secousses sismiques ou encore être induite par les activités humaines dans leur principes, les mouvements de terrain sont bien compris : ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'homme ;leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique.

Dans la pratique cependant, les choses sont très complexes, du fait incertitudes :

- Sur les conditions initiales, notamment en profondeur.
- Sur les propriétés mécaniques de terrains, en général hétérogènes, non linéaires, Anisotropes, discontinus,...
- Sur les conditions hydrauliques : position de la nappe, phénomènes se produisant en zone non saturée.

L'eau est la cause déclenchante de la plupart des mouvements c'est un facteur variable dans le temps.

I.2. Type de rupture

Dans leur conception et leur fonctionnement, les talus sont soumis à diverses conditions de chargement. Les types de rupture liés aux mouvements de terrain peuvent être classés en deux grandes catégories : ceux affectant les pentes naturelles et ceux concernant les talus artificiels.

I.2.1 Pentes naturelles

Il s'agit de talus existants, souvent hétérogènes, présentant des variations géologiques et, éventuellement, des discontinuités. Les accidents observés dans ces cas permettent de classer les instabilités de terrain en trois grandes catégories :

- **Les glissements**, caractérisés par l'apparition de surfaces de cisaillement relativement bien définies au sein du milieu. Selon la forme des surfaces de rupture, ces glissements peuvent être classés en trois types : plane, circulaire et quelconque

- **Les écoulements et coulées boueuses**, qui se manifestent par une déformation et un déplacement de type visco-plastique ou fluide.
- **Les éboulements**, liés à la perte de cohésion des matériaux ou à des phénomènes de fluage.

La majorité des glissements observés peuvent être rattachés à l'une de ces catégories, la première étant la plus courante.

I.2.2 Talus artificiels

Les talus artificiels sont principalement sujets aux glissements et, dans certains cas, aux phénomènes de fluage. Ils peuvent être classés en fonction du type d'ouvrage auquel ils appartiennent :

- Talus en déblai
- Talus en remblai sur sol non compressible
- Talus en remblai sur sol compressible
- Digues et barrages en terre

I.3. Mouvement de terrain

Un mouvement de terrain correspond à un déplacement plus ou moins soudain du sol ou du sous-sol, dépendant de la nature et de la disposition des couches géologiques. De nombreuses classifications ont été proposées en intégrant divers critères, tels que la nature de la roche, la cinématique du mouvement, la vitesse de déplacement, les causes de la rupture, la morphologie et le type de surface de rupture.

I.4. Types de mouvements

I.4.1 Les écroulements ou chute de blocs

Ces phénomènes touchent les massifs rocheux et se manifestent par des chutes soudaines de masses de terrain, dont l'ampleur peut varier. Ils se traduisent généralement par l'effondrement d'un pan de falaise verticale, constituant ainsi des événements à la fois spectaculaires et dangereux.

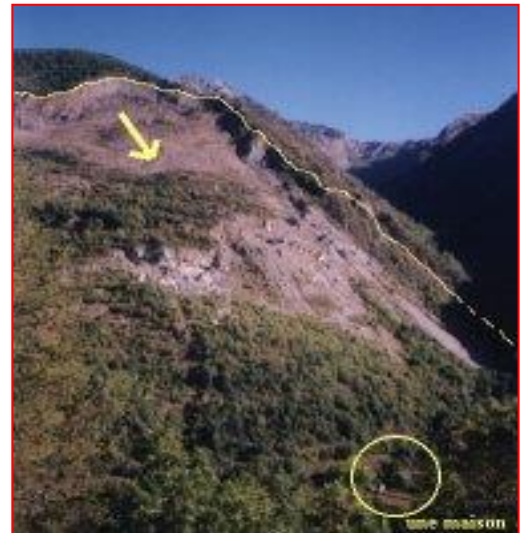


Figure (I.1) : Les écroulements et les chutes de blocs.

I.4.2 Les coulées boueuses

Ces mouvements sont des écoulements fluides impliquant la suspension de matériaux de granulométrie variable, assimilables aux processus de transport des sédiments par l'eau. Ils se produisent généralement en milieu montagneux. Leur origine peut être liée à un effondrement ou à un glissement. Les coulées concernent particulièrement des matériaux très sensibles, notamment sous forme de coulées de boue.

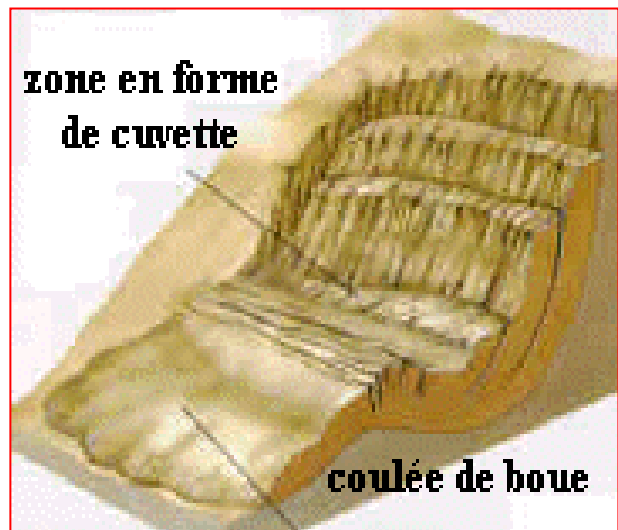


Figure (I.2.a) : Les coulées boueuses.

Parfois, un mélange d'eau, de sols et de blocs se produit. Dans ce cas, qui est le plus fréquent, les matériaux issus d'un glissement sont transportés par l'eau d'un glacier ou d'un torrent, donnant ainsi naissance à une **coulée d'éboulis**.

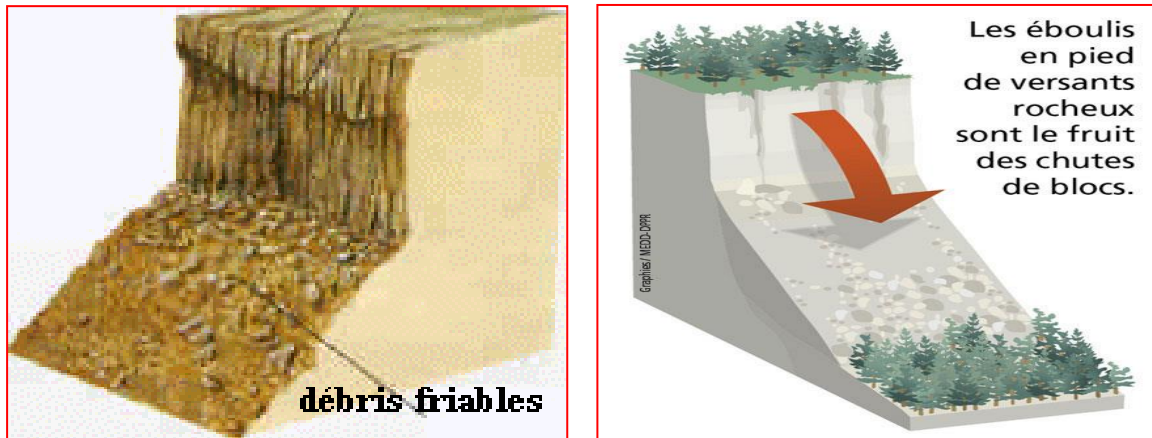


Figure (1.2.b) : Coulée d'éboulis.

Les coulées peuvent parfois se produire dans des zones gypseuses en raison d'un effondrement suivi d'une lubrification par les eaux souterraines, entraînant ainsi un écoulement. Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

- **Les matériaux impliqués** sont meubles, hétérogènes et contiennent une matrice argileuse.
- **Le déclenchement** survient généralement lorsque la teneur en eau du matériau atteint un seuil critique, le rendant semi-fluide.
- **La vitesse de déplacement** peut être extrêmement rapide.
- **L'amplification du phénomène** se produit lorsque les coulées incorporent les terrains meubles rencontrés au cours de leur progression.

I.4.3 Le fluage

Les fluages sont des mouvements quasi-continus, à vitesse réduite, résultant d'un équilibre instable, avec une surface de rupture mal définie. Ils se manifestent, par exemple, par le déplacement progressif d'un versant entier, sans cause apparente. Le fluage se distingue par un mouvement lent qui se produit sans modification immédiate des efforts appliqués. En réalité, ces efforts exercent une contrainte progressive sur la structure du sol, la rapprochant progressivement d'un état de rupture.

Le fluage est influencé par plusieurs facteurs, notamment :

- Le gel et le dégel.
- L'alternance des saisons sèches et pluvieuses.

Il se manifeste fréquemment sur des pentes constituées d'argiles gonflantes et peut être identifié par certains signes visibles, tels que :

- L'ondulation du sol.
- L'inclinaison des arbres.

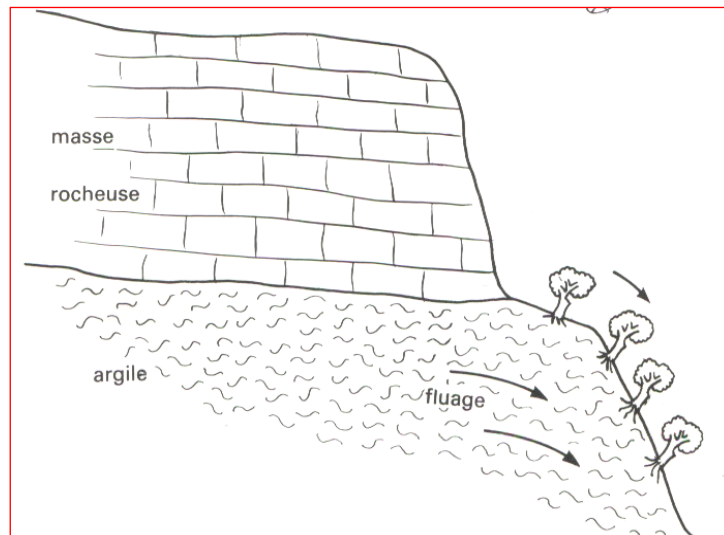


Figure (I.3) : Mécanisme de fluage.

I.4.4 Les glissements

Ces mouvements surviennent généralement dans des matériaux bien plus meubles que ceux impliqués dans les écroulements. En raison de leur faible cohésion, ces matériaux sont particulièrement sensibles aux variations hydriques et aux sollicitations mécaniques, ce qui favorise leur déstabilisation et leur déplacement.

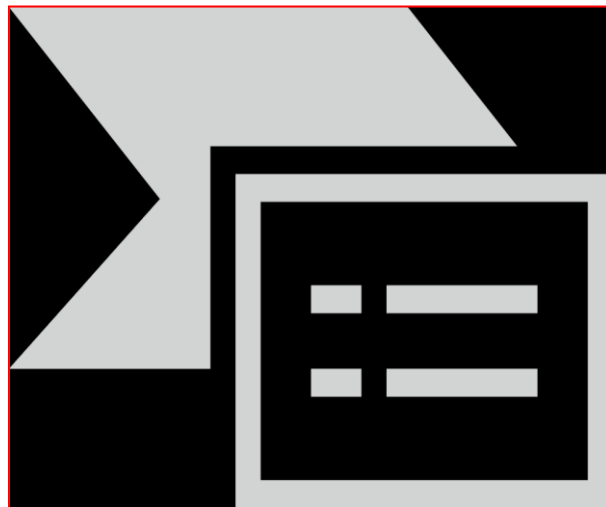


Figure (I.4) : Glissement de terrain.

I.4.4.1 Glissement de terrain

Le glissement de terrain se définit comme le déplacement d'une masse de sol meuble ou de roche le long d'une surface de rupture par cisaillement, souvent située au niveau d'une discontinuité préexistante.

Ce mouvement est principalement provoqué par l'effet de la gravité, mais il peut également être déclenché par des facteurs externes tels que les forces hydrauliques, sismiques ou encore par une modification des conditions aux limites. Le glissement peut affecter

uniquement les couches superficielles du sol (**solifluxion**) ou atteindre des profondeurs plus importantes. Son déplacement est généralement lent, de l'ordre de quelques millimètres à quelques décimètres par an, mais il peut s'accélérer progressivement jusqu'à la rupture.

I.4.4.2 Caractéristiques d'un glissement

Un glissement de terrain se manifeste par plusieurs éléments distinctifs :

➤ **Partie amont (zone de départ) :**

- Présence de **niches d'arrachement** ou de fissures principales et latérales.
- **Rupture brutale de la pente**, créant un profil concave.

➤ **Partie aval (zone d'accumulation) :**

- Formation d'un **bourrelet de pied** (ou frontal) avec une pente convexe.
- La poussée exercée par ce bourrelet entraîne souvent **une modification du tracé des cours d'eau situés en aval**.

➤ **Surface du terrain affecté :**

- Apparence **irrégulière et bosselée**, marquée par des ondulations et la dispersion de blocs de grande taille.

Par ailleurs, certains signes visibles permettent d'identifier un glissement actif :

➤ **Fissuration des bâtiments** situés dans la zone concernée.

➤ **Inclinaison inhabituelle des arbres et des poteaux.**

➤ **Déformation des infrastructures routières**, avec apparition de fissures et de discontinuités.

Évolution et dynamique du glissement

Selon son stade de progression, un glissement peut être plus ou moins désorganisé. De plus, un couvert végétal dense peut masquer certains signes visibles, rendant son identification plus difficile sur le terrain.

Lorsqu'un glissement se produit :

- Le volume des matériaux déplacés est très variable, pouvant atteindre des proportions considérables, notamment dans le cas des glissements de versant.
- La vitesse de déplacement est généralement lente (quelques centimètres à quelques décimètres par an), mais peut s'accélérer en fonction des conditions météorologiques défavorables (de précipitations intenses, saturation en eau).
- En phase de glissement actif, la vitesse peut atteindre plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres par jour.

Ces caractéristiques sont essentielles pour surveiller et prévenir les risques liés aux glissements de terrain.

L'ampleur du glissement varie en fonction de la vitesse de son évolution. En général, elle reste limitée dans le cas de ruptures circulaires ou irrégulières, tandis qu'elle peut être nettement plus importante pour les glissements plans, selon la configuration du terrain.

I.4.4.3 Description d'un glissement

Pour assurer une compréhension uniforme, il est essentiel de préciser les termes utilisés pour décrire un mouvement de terrain. La figure I.5 illustre les principaux éléments caractéristiques d'un glissement de terrain :

- **Escarpement principal (main scarp)** : Surface inclinée ou verticale, généralement concave, qui marque la limite supérieure du glissement et s'étend en profondeur à travers la surface de rupture.
- **Couronne (crown)** : Partie située au-dessus de l'escarpement principal, généralement peu perturbée, bien que des fissures ou crevasses puissent apparaître sous l'effet des tensions.
- **Tête (head)** : Extrémité amont du glissement où la masse déplacée est en contact direct avec l'escarpement principal.
- **Escarpements secondaires (minor scarps)** : Marques similaires à l'escarpement principal, visibles au sein de la masse en mouvement, formant une structure en gradins.
- **Élément (unit)** : Portion de la masse glissée située entre deux escarpements secondaires.
- **Flancs (flanks)** : Bordures latérales du glissement qui prolongent l'escarpement principal.
- **Pied (foot)** : Point d'intersection entre la surface initiale du terrain et la surface de rupture, souvent recouvert par un bourrelet.
- **Pouce (extrémité inférieure)** : Partie aval du glissement, correspondant à l'extrémité du bourrelet.
- **Corps** : Partie centrale du glissement située au-dessus de la surface de rupture.
- **Surface de rupture (surface de glissement)** : Interface qui sépare la masse déplacée des terrains encore en place.
- **Fissures et crevasses** : Fractures dans le sol, classées en trois types :
 - **Fissures de traction** : résultant de l'étirement des matériaux.
 - **Fissures de compression** : dues à des forces d'écrasement.
 - **Fissures de cisaillement** : causées par des contraintes tangentielles.
- **Largeur du glissement** : Distance séparant les flancs.
- **Longueur de rupture** : Distance entre la couronne et le pied.
- **Longueur totale du glissement** : Distance entre la couronne et le pouce.
- **Profondeur de glissement** : Distance séparant la surface de rupture du terrain naturel.

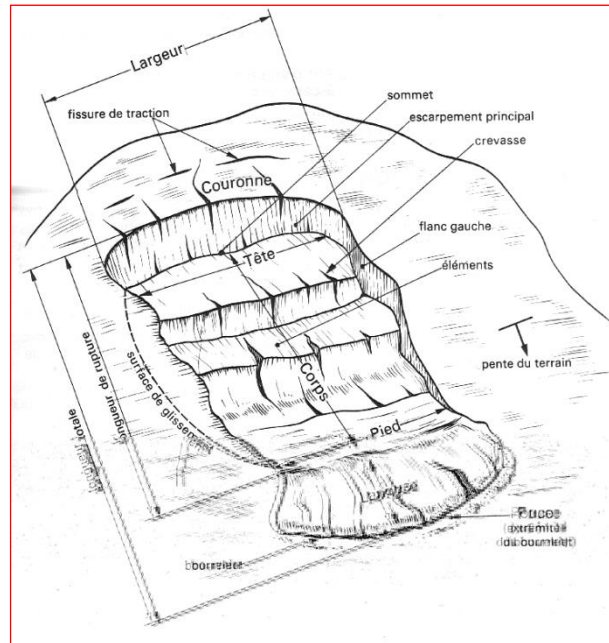


Figure (I.5) : Eléments descriptifs d'un glissement de terrain.

I. 4.4.4 Types de glissement

Les glissements de terrain se produisent principalement le long de surfaces planes et peuvent affecter divers types de matériaux.

Ils se manifestent par le déplacement d'une masse de terrains meubles ou rocheux le long d'une surface de rupture, qui peut être plane, circulaire ou irrégulière.

En fonction de la géométrie de cette surface, on distingue trois types principaux de glissements.

a. Glissement plan

Le mouvement se traduit par une translation le long d'un plan incliné, plus ou moins régulier. Il peut se présenter sous différentes formes :

Glissement d'une fine couche de faible résistance sur un substratum plus stable, appelée couche savon.

Glissement dû à l'extension d'une couche peu résistante. Glissement d'un matériau d'altération ou sur une zone de lubrification (comme des limons sur une couche argileuse). Dans ce dernier cas, la distinction entre glissement et fluage peut être difficile à établir.

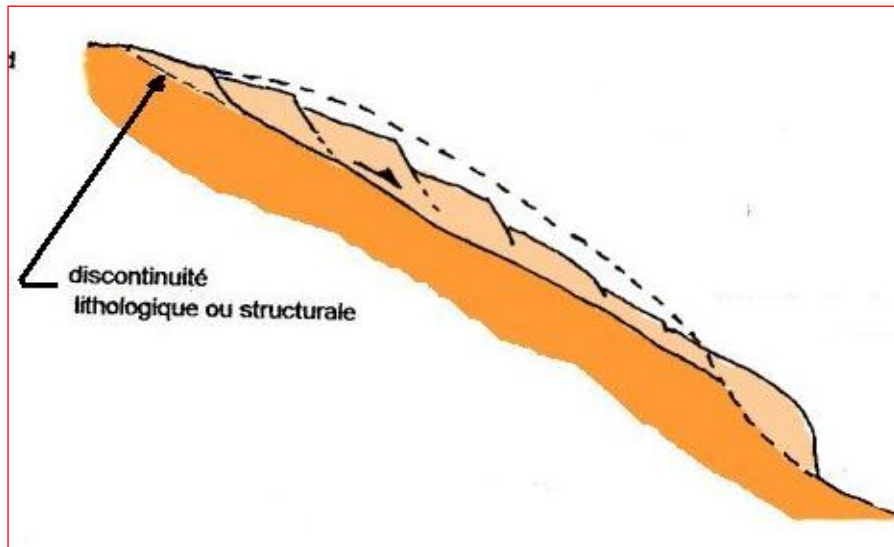


Figure (I.6) : Glissement plan.

b. Glissement rationnel

Les matériaux en mouvement pivotent le long d'une surface courbe, souvent assimilable à une surface cylindrique. Ce type de glissement se manifeste principalement dans des sols homogènes, où les discontinuités géologiques sont soit absentes, soit insuffisantes pour modifier significativement la forme et la position de la surface de rupture. Celle-ci présente une concavité marquée, avec une pente prononcée vers le haut du versant et un aplatissement vers le bas, d'où des appellations telles que "*fauteuil*" ou "*cuillère*", évoquant son profil et sa morphologie générale. Le glissement rationnel peut être superficiel ou profond.

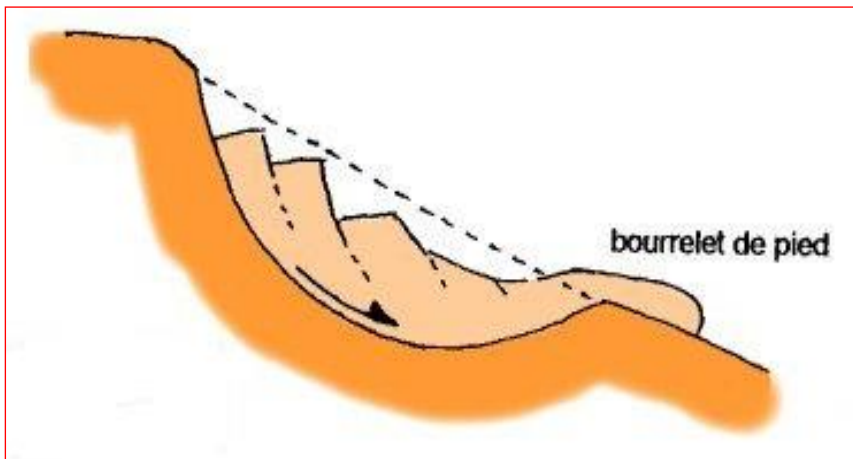


Figure (I.7) : Glissement rationnel.

b.1. Glissement superficiel

Les deux cas les plus fréquents sont :

Glissement circulaire de crête (tête).

Glissement circulaire de pied.

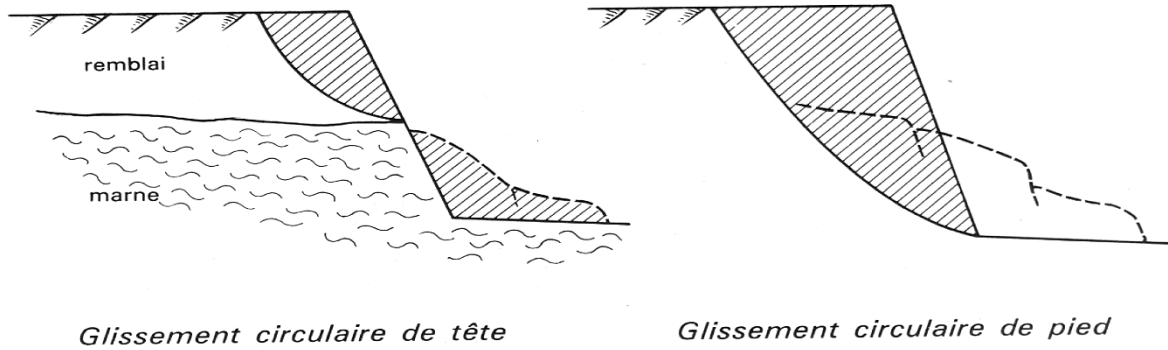


Figure (I.8) : Glissement circulaire superficiel.

b.2. Glissement profond

Ce type de glissement se manifeste dans les remblais posés sur un sol meuble ou lorsque le cercle de rupture est tangent au substratum, à condition que celui-ci soit peu profond.

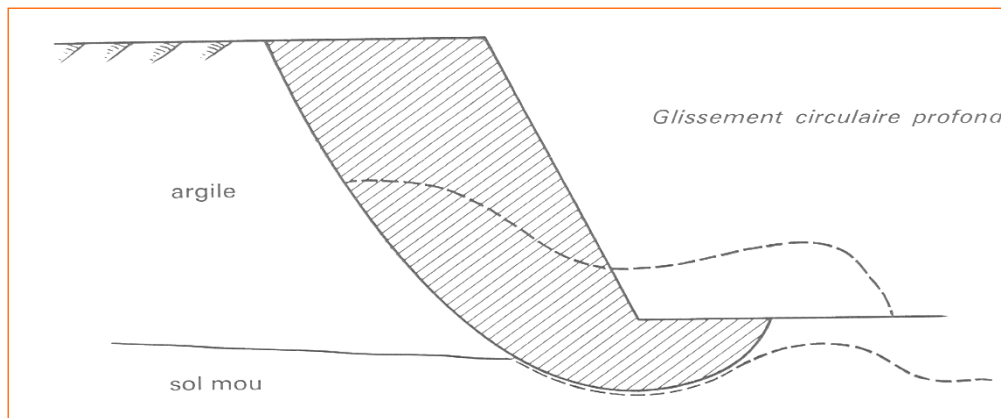


Figure (I.9) : Glissement circulaire profond.

c. Glissement complexe

Les glissements complexes présentent généralement une surface de rupture non circulaire et parfois de forme irrégulière. Ces ruptures peuvent être causées par plusieurs facteurs, notamment :

- L'anisotropie de la structure.
- L'anisotropie mécanique.
- La variation des caractéristiques mécaniques en profondeur.
- La suppression d'un appui en pied, provoquant une rupture régressive ou un effondrement.

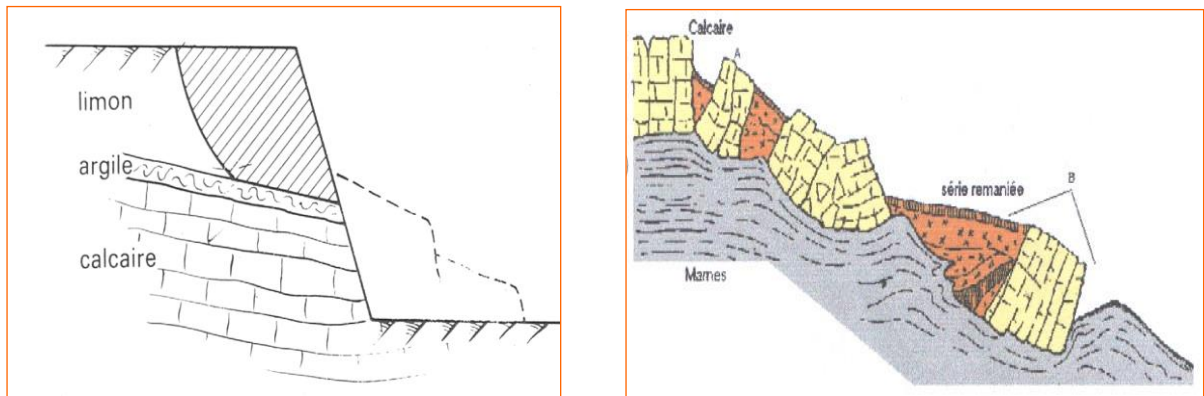


Figure (I.10) : Glissement complexe.

I.4.4.5. Autres types de glissement

- **Glissement en escalier** : Se compose d'une série de glissements courbes peu profonds, générant une topographie en gradins.
- **Glissement par suppression de la butée et effondrement d'un coin de terrain** : Se manifeste par la disparition d'un appui en pied, entraînant l'affaissement d'une portion de terrain.
- **Glissement composé** : Résulte d'une combinaison de plusieurs types de glissements précédemment décrits.
- **Influence de la géométrie des couches** : La disposition des couches géologiques peut conduire à une surface de rupture mixte, intégrant à la fois des éléments courbes et plans.
- **Glissement par fluage** : Survient progressivement sans qu'il y ait de modification des sollicitations extérieures.

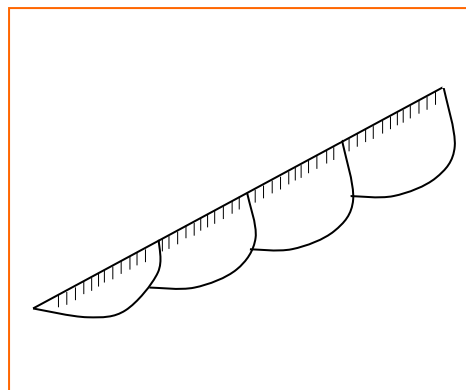


Figure (I.11) : Glissement successifs.

I.4.4.6 Causes de glissements

Comme les routes, les barrages en terre ou les remblais, où des conditions défavorables peuvent affaiblir la stabilité des sols.

Les glissements peuvent être déclenchés par divers facteurs, notamment des précipitations intenses, des séismes, des variations de charge ou des modifications des conditions hydrauliques. Ils peuvent également résulter d'une saturation progressive du sol, réduisant sa cohésion et augmentant la pression interstitielle.

La forme de la rupture dépend largement des caractéristiques géotechniques du terrain concerné. Certains glissements suivent une surface de rupture bien définie, circulaire ou plane, tandis que d'autres présentent une géométrie plus irrégulière, influencée par la structure et l'hétérogénéité du sol ou de la roche en place.

Les talus aménagés dans un massif existant pour élargir une plate-forme ou créer une tranchée, ainsi que ceux résultant d'opérations de remblai, sont des ouvrages couramment rencontrés dans les travaux de terrassement. Ces derniers sont indispensables pour l'aménagement de vastes zones, la construction de lignes ferroviaires ou d'autoroutes, qui nécessitent des pentes longitudinales faibles et impliquent donc d'importants travaux de terrassement.

Les grands barrages en terre et les retenues collinaires présentent des problématiques similaires, notamment en ce qui concerne leur comportement face aux variations brusques du niveau d'eau. Les vidanges rapides, en particulier, sont souvent à l'origine d'effondrements spectaculaires.

Les ouvrages de travaux publics, tels que les murs de soutènement et les quais reposant sur des sols plus ou moins compressibles, peuvent également subir des ruptures profondes lorsqu'ils sont soumis à des charges excessives dans des conditions défavorables.

L'analyse des facteurs d'instabilité et la compréhension de leur mode d'action ont permis de classer les causes de glissement en plusieurs catégories :

- Les causes liées à la nature et à la structure géologique des terrains.
- L'influence de l'eau sous différentes formes.
- Les causes mécaniques externes.

6.1. Influence de la nature des matériaux

D'une manière générale, les sols argileux sont particulièrement sujets aux glissements en raison des caractéristiques spécifiques de l'argile. Parmi les propriétés défavorables de ces terrains, on peut citer :

- Leur faible perméabilité, favorisant l'accumulation de pressions interstitielles élevées dans le massif.
- Leur capacité à se gonfler sous l'effet de l'absorption d'eau.
- Leur grande sensibilité aux perturbations, pouvant les transformer en une matière fluide sous l'effet d'un remaniement.

6.2. Influence de l'eau

L'eau joue un rôle majeur dans le déclenchement des mouvements de terrain. Elle peut s'infiltrer dans les diaclases du massif, générant une pression de circulation, ou pénétrer dans les fissures de retrait, provoquant le gonflement de l'argile et entraînant ainsi une diminution de sa résistance mécanique.

Par ailleurs, l'eau d'imbibition peut altérer la structure de certains matériaux argileux par des réactions chimiques, entraînant leur ramollissement. Elle peut également provoquer la dissolution de certaines roches, contribuant ainsi à l'instabilité des terrains.

6.3. Les causes mécaniques externes

- Les travaux de terrassement ou l'érosion à la base d'un talus entraînent fréquemment des glissements de terrain.
- Les excavations réalisées dans des talus auparavant stables peuvent être à l'origine de déstabilisations.
- Toute surcharge, qu'elle soit naturelle ou artificielle, appliquée sur une pente peut compromettre la stabilité des terrains en aval.
- Les vibrations, qu'elles soient d'origine naturelle (séismes) ou artificielle (machines, explosions...), influencent la stabilité des pentes en modifiant les forces de pesanteur.

La figure (I.12) illustre l'apparence typique d'une rupture de talus.

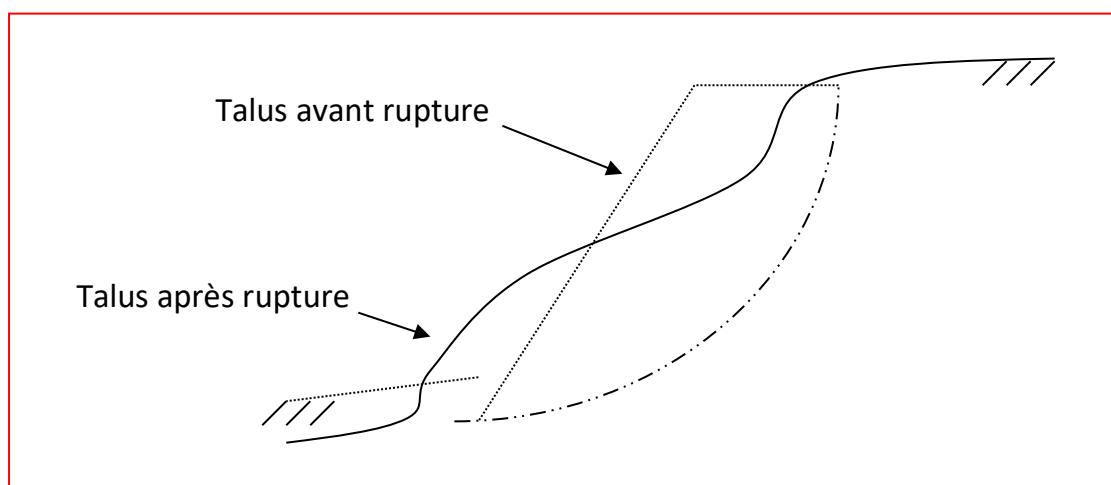


Figure (I.12) : Rupture sensiblement circulaire.

Pour des raisons de simplification des calculs, la surface de glissement est généralement assimilée à un cercle. Cependant, toutes les ruptures de talus ne suivent pas cette forme approximativement circulaire, en particulier dans les massifs hétérogènes. Les deux types de rupture qui diffèrent nettement de la forme circulaire classique.

Dans la figure (I.13.a), la ligne de glissement est pratiquement parallèle à la surface libre. Dans la figure (I.13.b), la ligne de glissement évolue au sein d'un massif hétérogène, en suivant le tracé des couches les moins résistantes.

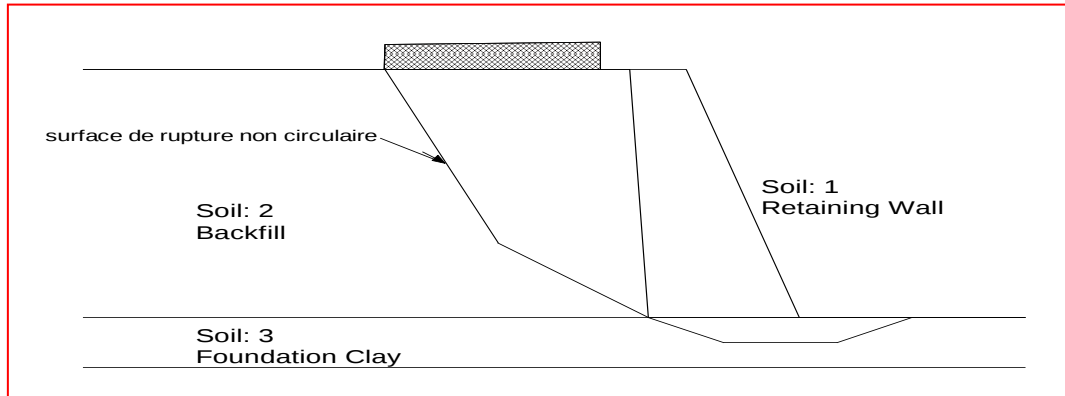


Figure (II.13.a): Glissement non circulaire.

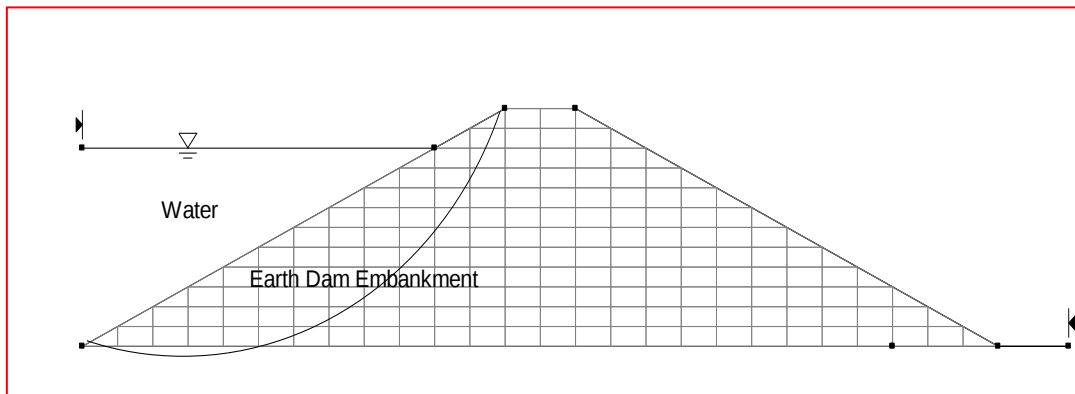


Figure (II.13.b) : Glissement circulaire.

I.5 Synthèse

Les mouvements de terrain sont des phénomènes géologiques variés qui se manifestent sous différentes formes, influencées par la nature des matériaux, les conditions hydrologiques, la topographie et les sollicitations extérieures. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories, notamment les glissements, les écoulements, les éboulements et les fluages, chacun présentant des mécanismes et des impacts distincts.

L'eau joue un rôle déterminant dans le déclenchement et l'évolution de ces phénomènes, en modifiant la cohésion des sols et en augmentant les pressions interstitielles. Les facteurs

climatiques, tels que les précipitations abondantes, les alternances de gel et de dégel, ainsi que les périodes de sécheresse prolongée, influencent fortement leur fréquence et leur intensité.

D'un point de vue pratique, la compréhension des mouvements de terrain repose sur l'analyse des conditions géologiques et hydrologiques, ainsi que sur l'identification des facteurs déclenchants. Cette connaissance est essentielle pour la mise en place de mesures de prévention et de stabilisation, notamment dans les zones à risque où les infrastructures et les populations sont exposées à ces aléas naturels.

Le tableau suivant répertorie les différentes familles de mouvements en les caractérisant selon plusieurs critères : la nature des matériaux impliqués, la vitesse de déplacement, le volume mobilisé et les facteurs déclenchants.

Tableau (I.1) : Eléments caractérisant les différentes familles des mouvements.

Terrains		Vitesse moyenne	Volume	Facteurs Déclenchement
Glissement	Sols massifs fracturés	Très lente à moyenne	De quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	Eau, terrassements
Fluage	Formations meubles	Très lente	De quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	Changement, évolution du matériau
Ecoulement	Massifs rocheux	De très lente à très rapide	De quelque m ³ à plus de dix mille de m ³	Eau, gel, dégel séisme
Coulée	Sols argileux et limoneux lâches	Très rapide	De dix à plusieurs centaines de milliers de m ³	Très fortes pluies, ruptures de digues

**Chapitre 2 : Exposé des
méthodes de calcul de la stabilité
des pentes**

II.1. Introduction

Le degré d'incertitude qui entoure la formulation des hypothèses simplificatrices, ainsi que le choix des paramètres utilisés pour les calculs de stabilité, et l'évolution du comportement du sol confère une importance particulière aux problématiques de sécurité. Cette même incertitude empêche, à ce jour, la généralisation de méthodes simples et fiables permettant d'identifier, directement sur le terrain, les risques imminents.

Le critère déterminant dans le choix de la méthode de calcul réside dans la forme de la surface de glissement. En pratique, on distingue trois types de ruptures :

- Rupture le long d'une surface plane.
- Rupture circulaire.
- Rupture suivant une surface de forme quelconque.

Nous allons maintenant présenter les méthodes de calcul correspondant à chaque cas.

II.2. Méthodes de calcul

II.2.1. Méthodes à l'équilibre limite

II.2.1.1. Considérations générales

Avant d'aborder les détails, il est essentiel de différencier, parmi les diverses méthodes classiques d'équilibre limite, deux grandes catégories fondées sur la configuration de la surface de discontinuité cinématique :

- Le premier groupe de méthodes concerne les cas où cette surface est formée d'un plan unique ou d'une combinaison de plusieurs éléments plans.
- Le second groupe englobe les situations où la surface adopte une section circulaire, qu'elle soit simple ou composée, voire une forme plus complexe et irrégulière.

II.2.1.2. Domaine des études à l'équilibre limite

La méthode d'analyse à l'équilibre limite est utilisée depuis des décennies pour évaluer le coefficient de sécurité d'une pente.

En effet, lorsqu'un versant cède, cela signifie que son coefficient de sécurité, initialement supérieur à 1, a diminué jusqu'à atteindre l'unité. À ce stade, il devient possible de déterminer la force moyenne de cisaillement exercée le long de la surface de rupture, ou uniquement sur une partie de celle-ci si la résistance au cisaillement est supposée connue ailleurs.

L'application de l'équation de Coulomb permet alors d'exprimer le coefficient de sécurité FF selon la relation suivante :

$$f = \frac{\tau}{\tau_m} = \frac{c + \sigma g \varphi}{c_m + \sigma g \varphi_m} \quad (\text{II.1})$$

Si ($f = 1$) on écrit : $C + \sigma g \varphi = c_m + \sigma g \varphi_m$

Avec c , φ les paramètres de la résistance au cisaillement disponible.

Et c_m , φ_m les paramètres de la résistance au cisaillement mobilisée.

L'étude de l'équilibre limite vise à analyser la stabilité d'une masse de sol ou de roche en supposant que la rupture survient simultanément sur l'ensemble de la surface potentielle de glissement.

En complément de cette hypothèse, il est couramment admis que la surface de rupture adopte une forme simple et que la masse située au-dessus agit comme un corps rigide.

Les forces motrices et résistantes appliquées sur cette surface sont estimées afin d'établir les équations d'équilibre des forces et/ou des moments de la masse susceptible de se déplacer.

La résolution de ces équations permet d'obtenir une évaluation quantitative de la stabilité des pentes. Toutefois, cette analyse ne concerne qu'une seule surface de glissement à la fois. Il est donc nécessaire de répéter les calculs pour différentes surfaces potentielles afin d'identifier la plus critique, c'est-à-dire celle présentant le coefficient de sécurité le plus faible.

Dans certains cas, la configuration géologique du terrain peut imposer naturellement une trajectoire spécifique à la rupture, limitant ainsi le nombre de simulations nécessaires.

D'une manière générale, les limites des méthodes d'équilibre limite résident dans l'hypothèse selon laquelle le coefficient de sécurité ($F = 1$) au moment du déclenchement de la rupture.

Or, ce coefficient est fortement influencé par plusieurs facteurs, notamment :

- Les variations locales des propriétés géotechniques des matériaux (résistance, pression interstitielle).
- Les caractéristiques des contraintes et des déformations au sein du sol ou du massif rocheux.
- Les contraintes initiales et leur répartition.
- La présence de discontinuités dans le sol ou la roche.
- Le niveau des sollicitations mécaniques appliquées.

Enfin, le calcul du coefficient de sécurité repose sur plusieurs approximations, dont l'impact sur la précision du résultat demeure souvent difficile à évaluer.

II.2.1.3. Coefficient de sécurité à l'équilibre limite

Il existe plusieurs approches pour définir le coefficient de sécurité en équilibre limite.

Tout d'abord, on peut adopter la définition classique qui le considère comme le rapport entre les efforts de cisaillement appliqués et les résistances mobilisables.

La résistance au cisaillement mobilisable est, au minimum, égale à l'effort de cisaillement réel in situ, généralement bien estimé lors des calculs.

En revanche, l'évaluation de l'effort de cisaillement appliqué dépend des propriétés réelles du sol, déterminées à partir d'essais en laboratoire ou in situ.

L'application de l'équation de Coulomb permet d'exprimer cette relation de manière analytique.

$$f = \frac{\tau}{\tau_m} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{c_m + \sigma \tan \varphi_m} \quad (\text{II.2})$$

Dans laquelle c , φ sont les caractéristiques de la résistance au cisaillement appliquée.

Et c_m , φ_m sont les caractéristiques de la résistance au cisaillement mobilisable.

D'où l'on tire :

$$\frac{c}{f} + \sigma \frac{\tan \varphi}{f} = c_m + \sigma \tan \varphi_m \quad (\text{II.3})$$

Ceci nous donne :

$$f = \frac{c}{c_m} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_m} \quad (\text{II.4})$$

Cela implique que le coefficient de sécurité relatif au paramètre de cohésion est identique à celui associé à l'angle de frottement.

Cependant, il est souvent préférable d'adopter des coefficients de sécurité distincts pour ces deux composantes de la résistance au cisaillement (cohésion et angle de frottement).

Plusieurs raisons justifient cette approche :

- Il est généralement plus facile et plus fiable de mesurer ou d'estimer les valeurs de l'angle de frottement que celles de la cohésion (en contrainte effective).
- Dans de nombreux cas, la cohésion effective est moins fiable, car elle peut diminuer avec le temps en raison de divers processus tels que le ramollissement.

On sait également que la variabilité du paramètre de cohésion est bien plus importante que celle de l'angle de frottement.

En effet le coefficient de variation de l'angle de frottement des matériaux pulvérulents peut descendre jusqu'à 6%, alors que le coefficient de variation de la cohésion non drainée ou de la résistance au cisaillement peut s'élever jusqu'à 40%.

Soit f_c : le coefficient de sécurité par rapport à la cohésion, et f_φ : le coefficient de sécurité par rapport au frottement, le coefficient de sécurité total est donnée par :

$$f = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\frac{c}{f_c} + \sigma \frac{\tan \varphi}{f_\varphi}} \quad (\text{II.5})$$

Si $f_\varphi = 1$, indique que le frottement est mobilisé, le coefficient de sécurité f_c par rapport à la cohésion nécessaire à une signification spéciale.

Cela s'explique par le fait que la cohésion requise pour assurer la stabilité est directement proportionnelle à la hauteur d'un talus homogène simple, en fonction d'une géométrie et d'une inclinaison données.

II.2.1.4. Formes de surface de rupture :

Les surfaces de glissement des terrains adoptent diverses formes, et la majorité des modèles simples de glissement relèvent des méthodes d'équilibre limite. Parmi les nombreuses approches proposées par les chercheurs, il est possible de les classer en trois catégories en fonction de la forme de la surface de rupture :

- Surface de rupture plane,
- Surface de rupture circulaire,
- Surface de rupture de forme quelconque.

Dans ce qui suit, nous examinerons les principales méthodes utilisées, en mettant un accent particulier sur celles appliquées dans notre étude.

II.2.1.4.1. Surface de rupture plane

II.2.1.4.1.1. Stabilité des talus infinis avec écoulements d'eau

a. cas des sols pulvérulents ($c=0$)

Le cas pratique le plus courant concerne les talus où un écoulement s'effectue parallèlement à la surface du sol.

Si le terrain est entièrement saturé en profondeur, l'expression de la pression interstitielle U à la base d'une tranche verticale et à la profondeur Z peut être formulée comme suit :

$$U = \gamma_w \cdot Z \cdot \cos^2 \beta \quad (\text{II.6})$$

La contrainte effective normale et la force de cisaillement a la base de la tranche sont :

$$\sigma' = \sigma - U = (\gamma - \gamma_w) Z \cdot \cos^2 \beta = \gamma' Z \cdot \cos^2 \beta$$

$$\tau = \gamma \cdot Z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (\text{II.7})$$

De plus, la résistance au cisaillement mobilisable est :

$$\frac{\tau}{f} = \gamma' \cdot Z \cdot \cos^2 \beta \cdot \frac{\tan \varphi}{f} \quad (\text{II.8})$$

L'égalité entre la force de cisaillement mobilisable et la force de cisaillement nous donne :

$$f = \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (\text{II.9})$$

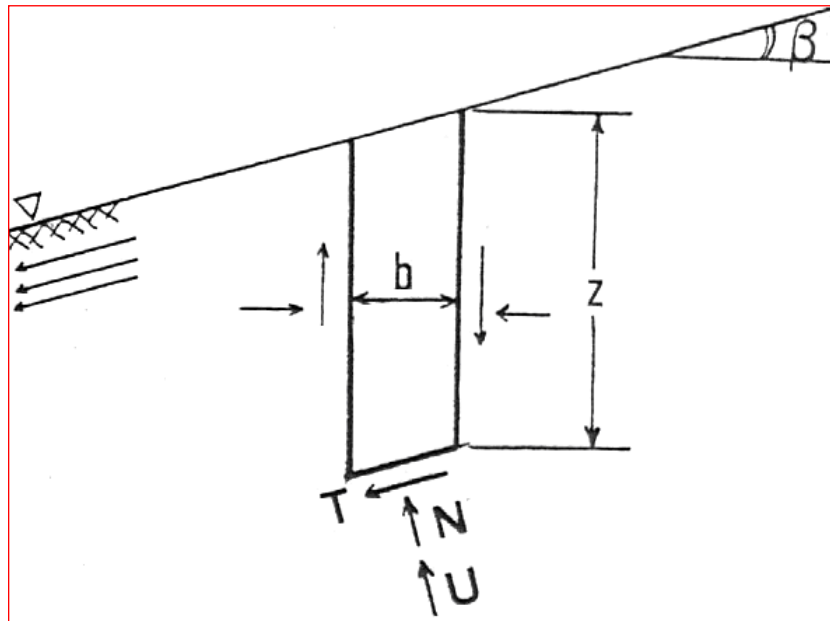


Figure (II.1) : Talus infinis avec écoulement d'eau.

$$U = \gamma_w \cdot b \cdot Z \cos \beta$$

$$N = \gamma \cdot b \cdot Z \sin \beta$$

$$T = \gamma \cdot b \cdot Z \sin \beta$$

b. cas des sols cohérents ($c \neq 0$)

Une démarche similaire à celle précédemment exposée, en supposant que le matériau constituant le talus est cohérent, permet d'établir l'équation définissant le coefficient de sécurité.

Depuis longtemps, l'analyse de la stabilité des pentes naturelles instables sur le long terme repose sur cette approche.

Dans le cas d'un écoulement parallèle à la pente, l'équation qui en découle est :

$$f = \frac{c}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} + \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad (\text{II.10})$$

II.2.1.4.1.2. La méthode des blocs

Cette méthode permet d'analyser un glissement se produisant le long d'une surface composée de deux ou trois segments plans.

a. Surface de glissement composée de deux segments plans :

La masse de glissement potentielle est divisée en deux blocs par une ligne verticale AB (figure II.2.a), et les conditions d'équilibre sont établies pour chaque bloc. Les forces en présence sont :

- W_1, W_2 : les poids des deux blocs.
- U_1, U_2 : les forces exercées par la pression interstitielle.
- T_1, T_2 : les forces de cisaillement.
- N_1, N_2 : les forces normales agissant sur la surface de discontinuité.
- U_{12} : la pression interstitielle normale agissant sur la ligne de séparation (AB) entre les blocs.
- P_{12} : la force effective interblocs agissant avec une inclinaison par rapport à la normale à AB.

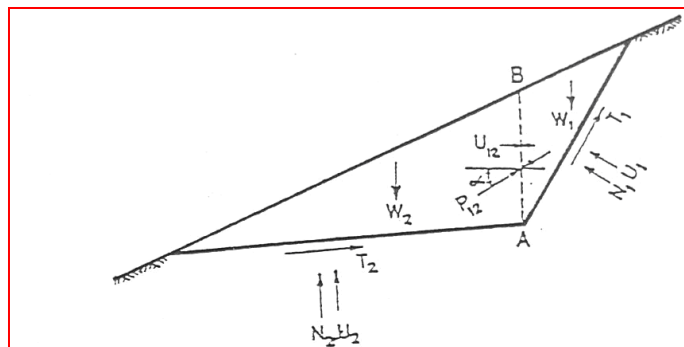


Figure (II.2.a) : Cas de surface de rupture a deux segments plans.

Une supposition sera faite concernant la valeur de α .

En considérant que $f = 1$ et en écrivant l'équilibre du premier bloc, la valeur de la force interblochs P_{12} sera obtenue.

Connaissant cette force, on pourra vérifier l'équilibre du bloc 2.

Si les forces agissant sur le bloc ne vérifient pas l'équilibre, la valeur supposée de f n'est pas correcte et l'analyse sera répétée avec une nouvelle valeur de f .

Pour réaliser l'équilibre des deux blocs, on répète l'opération autant de fois, et la valeur correspondant de f sera la plus correcte.

Si α est supposé nul, la valeur du coefficient de sécurité f est sous – estimée car aucune force de cisaillement n'est mobilisée le long de AB.

Si α est supposé égal à l'angle de frottement, la valeur de f est surestimée, ce qui impliquerait une mobilisation complète de la force de cisaillement sur l'interface AB.

b. Surface de glissement composée de trois segments plans

La masse glissée est divisée en trois blocs (figure II.2.b) : un bloc actif, un bloc central et un bloc passif. Ce type de situation se présente notamment dans les cas suivants :

- Lorsqu'une rupture traverse une couche fragile située sous une couche rigide, comme dans la fondation d'un remblai ou d'un barrage en terre.
- Lorsque la rupture suit une discontinuité, telle qu'un joint ou une faille.
- Dans les pentes naturelles.

L'analyse de stabilité dans ce cas suit la même démarche que celle adoptée dans le cas précédent.

Les angles de frottement inter – blocs, α_1, α_2 sont supposés ainsi que le coefficient de sécurité f

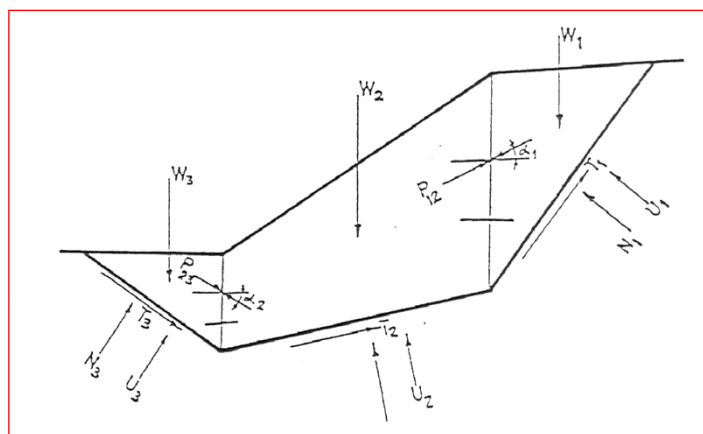


Figure (II.2.b) : Cas de surface de rupture à trois segments plans.

II.2.1.4.2. Surfaces de rupture circulaires

Si la surface de glissement ne peut être assimilée à un plan ou à une série de plans, les méthodes précédemment décrites deviennent inapplicables. Cependant, dans la pratique, il est fréquent de rencontrer des surfaces de rupture courbes.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes méthodes de calcul adaptées à ces situations :

a. Méthode des tranches

Les premières indications sur la stabilité globale d'un massif homogène peuvent être obtenues en appliquant la méthode globale, qui suppose une surface de rupture circulaire et considère que l'ensemble de la masse est en équilibre.

La méthode des tranches est la seule approche générale d'analyse de la stabilité permettant de prendre en compte l'irrégularité et l'hétérogénéité des sols ou des roches constituant les pentes, dans lesquels les valeurs de C et φ , ne sont pas nécessairement constantes.

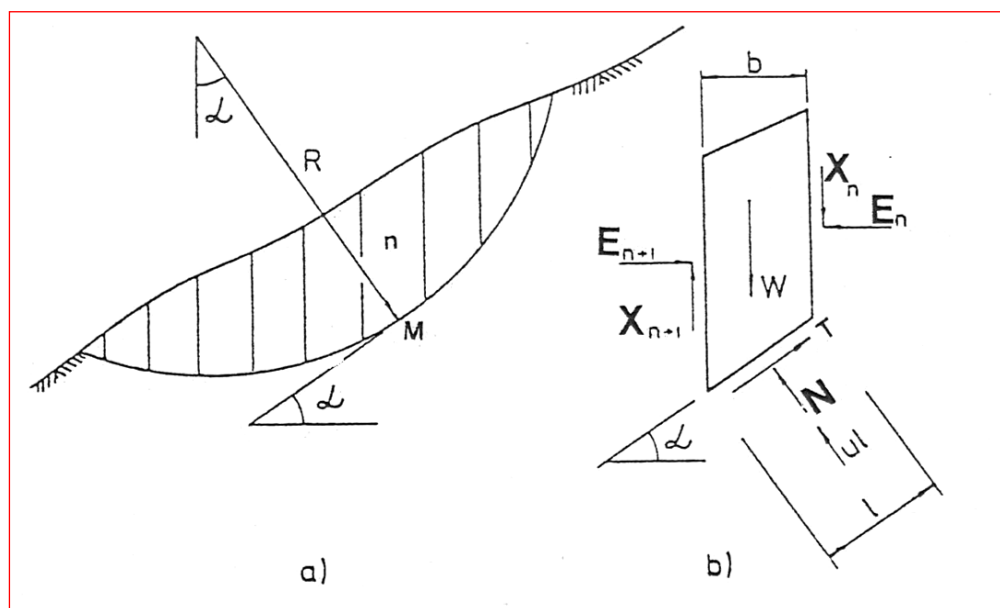


Figure (II.3) : Méthode des tranches.

b. Méthode de FELLENIUS

La surface de rupture est supposée circulaire, et la masse instable est divisée en plusieurs tranches verticales (figure II.3.a).

Pour chaque tranche, on identifie la répartition des forces actives et résistantes (figure II.3.b), puis on les totalise séparément.

Étant donné la complexité de l'évaluation des forces intertranches XX et EE, qui dépendent de nombreux paramètres comme les contraintes et déformations locales du matériau, Fellenius a proposé de négliger ces efforts dans le calcul du coefficient de sécurité. Il l'a défini comme le rapport des moments (ou forces) résistants aux moments (ou forces) moteurs :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n \{c' l_i + (w_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi'\}}{\sum_{i=1}^n w_i \cos \alpha_i} \quad (\text{II.11})$$

La méthode de Fellenius tend à sous-estimer le coefficient de sécurité, ce qui peut entraîner des erreurs significatives, notamment en termes de sécurité. Ce biais est particulièrement marqué dans le cas des ruptures profondes et des pressions interstitielles élevées.

De plus, cette approche peut conduire à des contraintes normales effectives négatives à la base de certaines tranches, ce qui est physiquement irréaliste et remet en question la fiabilité des résultats obtenus.

c. Méthode de BISHOP simplifiée ($X_n = 0$)

Bishop (1955) a proposé une approche plus rigoureuse en intégrant les forces intertranches dans les équations d'équilibre limite de chaque tranche. Il a démontré que même avec des calculs simplifiés, des résultats relativement précis peuvent être obtenus, même si ces forces intertranches sont négligées.

Le coefficient de sécurité dans cette méthode est alors défini par l'expression suivante :

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n \{c' b_i + (w_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \varphi'\}}{\sum_{i=1}^n w_i \sin \alpha_i} \bigg/ m_\alpha \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Avec : } m_\alpha = \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi'}{f} \right) \cos \alpha \quad (\text{II.13})$$

La valeur de m_α est donnée par un abaque permettant un calcul rapide de f .

Cette méthode, applicable uniquement aux surfaces de glissement circulaires, offre une précision satisfaisante mais repose sur une procédure itérative. Toutefois, la convergence vers la solution est généralement rapide.

En analysant la stabilité de plusieurs glissements naturels spontanés, et en comparant les méthodes de FELLENIUS et BISHOP simplifiée, plusieurs observations ont été faites :

- Lorsque la pression interstitielle est faible, la valeur du coefficient de sécurité (f) obtenue avec BISHOP (en contraintes totales ou effectives) est supérieure de 10 à 15 % par rapport à celle obtenue avec FELLENIUS.
- Lorsque la pression interstitielle est moyenne ou élevée, cette majoration de f en contraintes effectives peut atteindre 20 à 25 %.

Cette méthode est largement utilisée, car elle fournit des résultats très proches de ceux obtenus avec la méthode générale.

II.2.1.4.3. Surface de rupture de forme quelconque

Pour l'analyse de la stabilité des pentes où la surface de rupture peut présenter une forme non circulaire, plusieurs méthodes ont été développées, notamment celles de NORVEIUER (1965), JANBU (1957), BEU (1968) et CHOWDHURY (1978), entre autres. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques méthodes de calcul de stabilité couramment utilisées.

d. Méthodes de JANBU

JANBU (1954; 1957) propose de prendre en compte l'équilibre des forces et des moments d'une tranche verticale typique, ainsi que l'équilibre des forces pour l'ensemble de la masse glissée.

L'équation d'équilibre horizontal permet alors d'exprimer le coefficient de sécurité (f) comme suit :

$$f = \frac{\sum b \tau \frac{1}{\cos^2 \alpha}}{\sum (w + \Delta X) \tan \alpha} \quad (\text{II.14})$$

$$\tau = \frac{\left\{ c + \left(\frac{w + \Delta X}{b} - u \right) \tan \phi \right\}}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{f}} \quad (\text{II. 15})$$

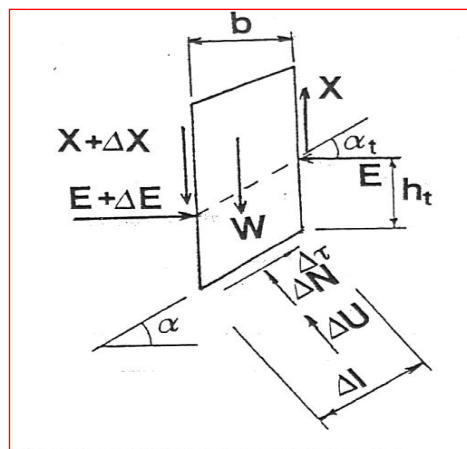


Figure (II.4) : Méthode de JANBU – forces en présence.

Les forces intertranches peuvent être déterminées à l'aide des équations suivantes, qui reposent sur les principes d'équilibre :

$$\Delta E = (w + \Delta X)tg\alpha - \frac{zb}{f} \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha}$$
$$X = -Etg\alpha_t + h_t \frac{\Delta E}{b} \quad (II.16)$$

Dans les quelles :

→ ΔE : est la différence des forces normales aux cotés de deux tranches successives.

→ ΔX : est la différence des forces parallèles aux cotés de deux tranches successive.

→ α_1, h_t : définissent la direction et la position de la ligne de poussée (figure II.4)

Le point de départ du calcul est la tranche située au sommet, où les valeurs de XX et EE sont nulles d'un seul côté. En appliquant les équations (IV.16) tranche par tranche, on détermine progressivement les forces EE et XX pour l'ensemble des tranches.

La méthode de JANBU permet un calcul rapide du coefficient de sécurité ff, pouvant être réalisé à l'aide d'une simple calculatrice de poche. Toutefois, des problèmes de convergence peuvent apparaître, principalement en raison des fluctuations importantes des forces horizontales latérales au cours des itérations successives.

Il est important de noter que cette méthode est adaptée aussi bien à l'analyse en contraintes totales qu'à celle en contraintes effectives. Cependant, JANBU a identifié certaines imprécisions dans la procédure de calcul de f. Pour y remédier, il a proposé d'appliquer un coefficient correcteur empirique afin d'améliorer la précision des résultats obtenus f_0 .

II.2.1.4.3.2. Méthode de SPENCER

SPENCER (1967, 1973) a proposé une méthode qui suppose que les forces intertranches sont parallèles entre elles.

Cette approche repose sur l'hypothèse selon laquelle il existe une relation constante entre l'intensité des forces intertranches normales et tangentielles, comme l'a suggéré FREDLUNG (1976).

Ainsi, on peut exprimer cette relation sous la forme suivante :

Soit :

$$tg\theta = \frac{X_G}{E_G} = \frac{X_D}{E_D} \quad (II.17)$$

θ : l'angle que fait la force intertranche résultante par rapport à l'horizontal.

SPENCER (1967) a additionné les forces perpendiculaires aux forces intertranches afin de déterminer la force normale.

Le même résultat peut également être obtenu en additionnant les forces dans les directions verticale et horizontale, comme illustré dans les figures (II.5) et (II.6).

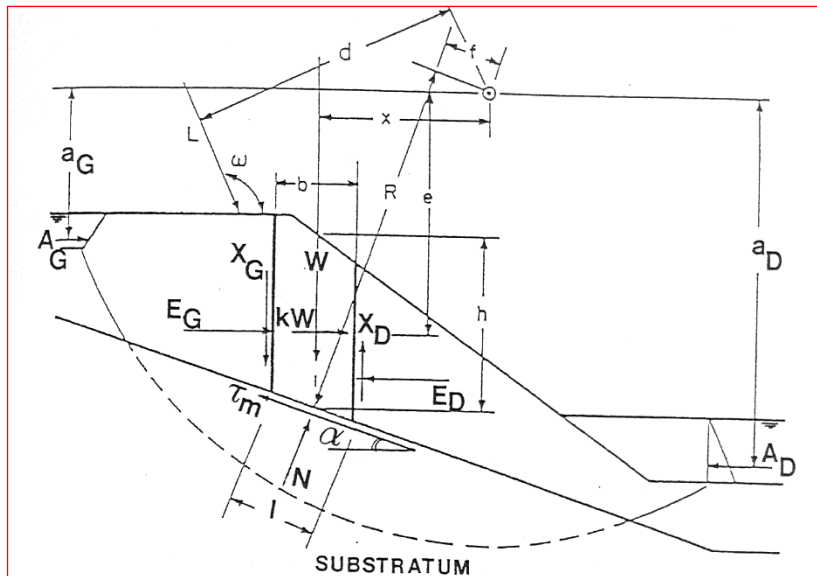


Figure (II.5) : Forces en présence dans la méthode des tranches.

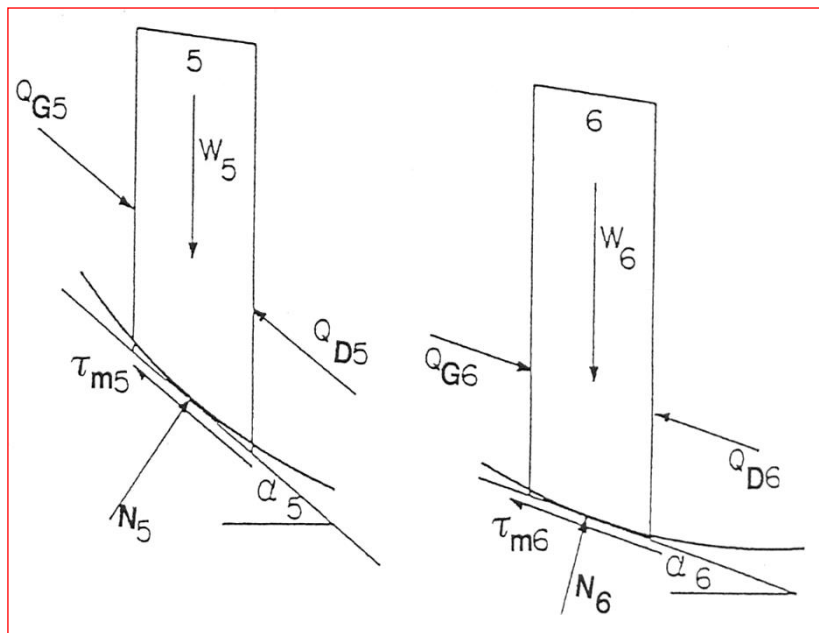


Figure (IV.6) : Forces inter – tranches pour la méthode ordinaire.

Soit :

$$\sum f_v = 0; W - (X_D - X_G) - N \cdot \cos \alpha - \tau_m \sin \alpha = 0 \quad (\text{IV.18})$$

$$\sum f_h = 0; -(E_D - E_G) + N \sin \alpha - \tau_m \cos \alpha + k \cdot w = 0 \quad (\text{IV.19})$$

Avec :

$$\tau_m = \frac{c' + \left(\frac{N}{1} - U\right) \cdot \text{tg} \varphi'}{f} \quad (\text{II.20})$$

La force normal peut être tirée de l'équation (II.18)

Alors que la force intertranche horizontale est obtenue de l'équation (II.19).

D'où :

$$N = \frac{W - (E_D - E_G) \text{tg} \theta - \frac{c' \cdot l \sin \alpha}{F} + \frac{u \cdot l \text{tg} \varphi'}{F} \sin \alpha}{m_\alpha} \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Avec : } m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \text{tg} \varphi'}{F}$$

SPENCER a proposé deux équations pour le coefficient de sécurité :

- La première est basée sur la sommation des moments par rapport à un point commun.
- La seconde repose sur la sommation des forces dans la direction parallèle aux forces intertranches.

L'équation du moment obtenue est identique à celle de la méthode ordinaire et simplifiée de BISHOP.

$$\sum \vec{M}_0 = 0; \sum W \cdot x - \sum \tau_m \cdot R - \sum N \cdot f + \sum k \cdot w \cdot e = 0 \quad (\text{II.22})$$

F donné par :

$$f = \frac{\sum [c' \cdot l \cdot r + (N - U \cdot l) R \cdot \text{tg} \zeta']}{\sum w \cdot x - \sum N \cdot f + \sum k \cdot w \cdot e} \quad (\text{II.23})$$

L'équation du coefficient de sécurité, basée sur l'équilibre des forces, peut être obtenue en sommant les forces dans la direction horizontale, soit :

$$\sum \vec{F}_h = 0; \sum (E_G - E_D) + \sum N \sin \alpha - \sum \tau_m \cos \alpha + \sum k \cdot w = 0 \quad (\text{II.24})$$

Les forces intertranches ($E_G - E_D$) doivent s'annuler, et l'équation du coefficient de sécurité par rapport à l'équilibre des forces s'écrit comme suit :

$$F_f = \frac{\sum [c'.l \cos \alpha + (N - u.l) \operatorname{tg} \varphi' \cos \alpha]}{\sum N \cdot \sin \alpha + \sum k.w} \quad (\text{II.25})$$

La méthode de SPENCER fournit deux coefficients de sécurité pour chaque angle des forces latérales. Cependant, pour un certain angle des forces intertranches, ces deux coefficients deviennent égaux, assurant ainsi l'équilibre à la fois des moments et des forces.

Chapitre 3 : Exposé des méthodes de prédiction utilisées

III.1 Introduction à la planification expérimentale

L'ensemble des méthodes statistiques mobilisées pour analyser le comportement d'un système expérimental a pour objectif de comprendre et améliorer son fonctionnement. Dans le domaine industriel en particulier, l'utilisation des plans d'expériences connaît une évolution constante. Ces plans constituent un outil stratégique pour optimiser les procédés de production, assurer le contrôle qualité, et, comme dans le cas qui nous concerne, améliorer les performances des procédés. Ils sont également largement utilisés pour la formulation des produits.

La planification expérimentale consiste à faire varier de manière contrôlée certaines entrées du système (appelées facteurs) et à mesurer les effets induits sur les réponses. L'objectif est d'établir des relations de cause à effet entre les variables.

On peut donc considérer cette démarche comme un système permettant d'exprimer une ou plusieurs réponses en fonction de plusieurs facteurs influents.

En général, les réponses obtenues sont représentées par des variables que l'on cherche à optimiser. Les facteurs sont les variables d'entrée du système ; ils doivent pouvoir varier de manière indépendante les uns des autres tout au long de l'expérimentation.

III.2. La méthodologie des surfaces de réponse

III.2.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants. L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.

III.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

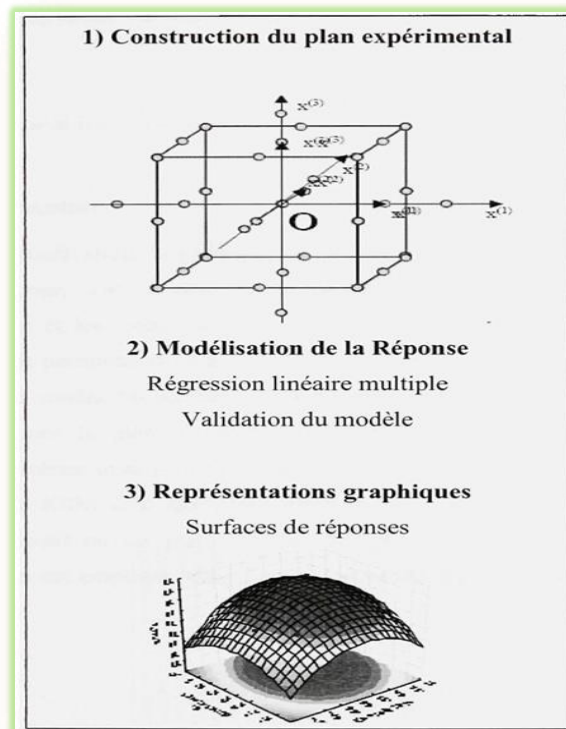


Figure III. 1: Etapes de la méthodologie de surface de réponse.

La Figure III.1 illustre de manière schématique les différentes étapes de la méthodologie de surface de réponse (RSM).

Les phases de conception du plan expérimental et de modélisation sont fortement interconnectées et peuvent être menées de façon itérative.

Dans un premier temps, un plan d'expérience optimal est élaboré en s'appuyant sur le modèle le plus simple possible. Par la suite, ce plan pourra être éventuellement enrichi si les étapes de modélisation et de validation révèlent que le modèle initialement envisagé n'est pas suffisamment représentatif du comportement du système étudié.

Les étapes principales de la méthode RSM sont les suivantes :

a. Planification expérimentale

Pour assurer une planification expérimentale efficace, il est souhaitable de minimiser le nombre d'expériences à réaliser, dans le but de réduire les besoins en ressources informatiques, ainsi que le temps et les coûts d'expérimentation. Un choix judicieux des points expérimentaux permet de diminuer la variance des coefficients du modèle mathématique, ce qui contribue à améliorer la fiabilité des surfaces de réponse obtenues.

Pour cela, il est essentiel de sélectionner le plan d'expérience le plus adapté afin d'identifier les combinaisons expérimentales les plus pertinentes, en fonction de la nature du problème étudié.

Dans le cadre d'une étude utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM), les plans expérimentaux privilégiés sont généralement des plans quadratiques, tels que :

- les plans centraux composites (ou plans de Box-Wilson),
- et les plans de Box-Behnken.

Parmi ces approches, le plan central composite (CCD) est le plus fréquemment utilisé. Toutefois, d'autres types de plans quadratiques peuvent également être envisagés selon les objectifs et les contraintes spécifiques de l'étude.

b. Modélisation

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés $X_1, X_2, \dots, X_k$ à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{III.1})$$

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_p) + \varepsilon \quad (\text{III.2})$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme. Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (\text{III.3})$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec d variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{III.4})$$

Où:

X_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ε : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse.

Dans la phase d'expérimentation de RSM, il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des variables courantes aux variables codées est :

$$X_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{[R_{max} - R_{min}]} \quad (III.5)$$

X_i : variables de prédiction centrée réduite (codée).

R_i : Variable courante (naturelle, réelle).

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle équation (2.4), sont estimés par la technique des moindres carrées et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = X_b \quad (III.6)$$

Où:

$\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: Estimation de la vectrice réponse des n réponses observées.

X : la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception

b est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SSE définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (III.7)$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

c. Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- le coefficient de détermination statistique : R^2
- le coefficient de détermination ajusté : R^2_{adj} ;
- l'erreur RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (III.8)$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (\text{III.9})$$

Où :

$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$: Est la moyenne de réponses.

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. R^2 est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (\text{III.10})$$

Le coefficient de détermination ajusté R^2_{adj} est une mesure améliorée de R^2 . Contrairement à R^2 , R^2_{adj} N'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (\text{III.11})$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_E}{(n-p)}} \quad (\text{III.12})$$

III.2.3 La RSM pour l'optimisation en ingénierie

Une fois la **modélisation** achevée, il convient de passer à l'**optimisation** du problème étudié.

Plusieurs **méthodes d'optimisation** peuvent être mobilisées afin d'**optimiser simultanément plusieurs réponses** issues de l'application de la **méthodologie de surface de réponse (RSM)**.

III.2.3.1 Méthode graphique

La première méthode de résolution consiste en une approche graphique. Elle repose sur le tracé des courbes d'iso-réponses pour chaque critère en fonction des variables d'entrée, suivi d'un hachurage des zones répondant aux objectifs visés. En superposant ensuite les différents graphiques, on fait apparaître visuellement les zones de compromis possibles.

Bien que cette méthode soit intuitive et efficace pour les cas simples impliquant deux ou trois variables, elle devient rapidement lourde et peu pratique dès que la complexité du problème augmente. En effet, l'utilisateur se retrouve confronté à un nombre important de

graphiques qu'il doit analyser et croiser pour identifier le meilleur compromis, ce qui rend l'approche difficilement exploitable dans un cadre multidimensionnel.

III.2.3.2 Méthodes numériques

A. Le quadrillage

Cette méthode numérique présente le double avantage d'une conception simple et d'une recherche systématique. Pour réaliser cette recherche, il suffit de quadriller la zone expérimentale, et de calculer en chacun des nœuds les valeurs obtenues pour les différentes réponses. On obtient ainsi les différents points présentant des valeurs obtenues pour tous les critères. L'inconvénient majeur vient essentiellement de la difficulté d'obtenir à la fois une grande précision et un temps de calcul raisonnable :

- Un maillage trop fin augmente le temps calcul,
- Un maillage trop large risque de ne pas signaler des zones solutions qui seraient intéressantes.

III.3. Réseaux de neurones artificiels

III.3.1 Introduction aux réseaux de neurones artificiels

Depuis une vingtaine d'années, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) s'est étendue dans des domaines très divers de l'industrie et des services. En géophysique les RNA ont été utilisés pour plusieurs méthodes, par exemples pour détecter les premières arrivées d'ondes sismiques (Murat and Rudman, 1992; McCormack et al., 1993); classifier les différents signaux par l'inversion (Roth and Tarantola, 1994; Langer et al., 1996); transformer un problème de déconvolution sismique dans un réseau de Hopfield afin de réduire le temps de calcul (Wang and Mendal, 1992); pour caractériser la distribution de résistivité du sous-sol par l'inversion de données magnétotelluriques (Zhang and Paulson, 1997) et électromagnétiques (Poulton et al., 1992). Ils sont particulièrement utilisés pour résoudre des problèmes de classification, de prédiction, de reconnaissance des formes, de catégorisation, de mémoire associative et d'optimisation (Drew et Monson, 2000). Par l'entraînement d'un système non linéaire de multiples variables, les RNA peuvent prédire la variable indépendante (Huang et al., 1996). Par conséquent, les RNA constituent une technique d'approximation de systèmes complexes, qui sont difficiles à modéliser par les méthodes statistiques classiques. Puisqu'il existe un grand nombre de structures des réseaux de neurones artificiels, il est nécessaire de faire un résumé de leurs caractéristiques afin de choisir un réseau de neurone approprié au développement de ce mémoire.

III.4. Notions de base sur les réseaux de neurones artificiels

III.4.1 Du Neurone biologique au neurone artificiel

Un neurone biologique est une cellule vivante spécialisée dans le traitement de l'information (voir Figure III.2). À partir de son corps cellulaire, appelé soma, s'étendent de nombreuses dendrites (pouvant atteindre jusqu'à 100 000), qui ont pour fonction de recevoir des signaux en provenance d'autres neurones ou de cellules sensorielles.

Ces signaux sont ensuite intégrés et traités par le neurone. Si certaines conditions d'activation sont réunies, celui-ci génère un signal électrique transmis le long de son axone vers d'autres neurones ou vers des cellules effectrices, comme des cellules musculaires. Dans ce cas, on dit que le neurone est activé.

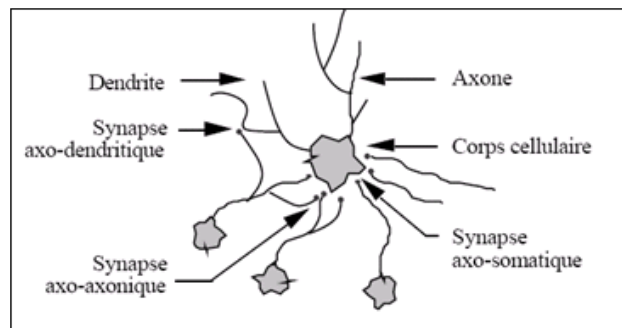


Figure III. 2: Un neurone avec son arborisation dendritique.

La Figure III.2 illustre la structure d'un neurone artificiel, conçu sur le modèle du neurone biologique. Chaque neurone artificiel agit comme un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées provenant des neurones situés en amont.

À chaque entrée est associé un poids synaptique noté w , qui représente l'intensité ou l'importance de la connexion.

Ce neurone possède une seule sortie, laquelle peut se ramifier pour alimenter plusieurs neurones en aval.

Chaque connexion entre neurones est ainsi caractérisée par un poids, influençant le traitement de l'information.

Le modèle général d'un neurone artificiel comprend les éléments suivants :

- Une ou plusieurs entrées pondérées,
- Un sommateur,
- Une fonction de transfert (ou d'activation),
- Une sortie unique.

Les notations associées sont :

- x_i est l'entrée i ,
- w_{ij} est la valeur du poids synaptique reliant l'entrée i au neurone j ,
- Σ est la somme pondérée des entrées x_i ,
- $F(.)$ est la fonction de transfert,
- s est la sortie du neurone.

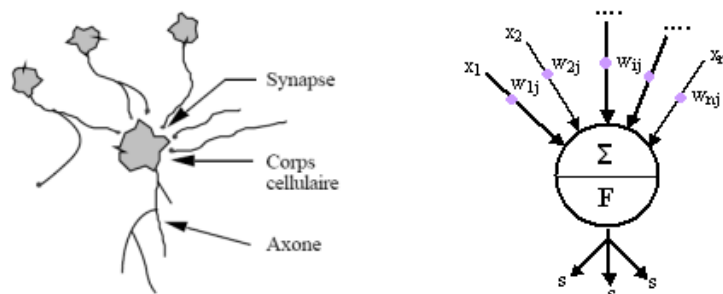


Figure III. 3: Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel.

III.4.2 Les réseaux de neurones

Définition : Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des processeurs élémentaires fortement connectés fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

De point de vue modélisation mathématique, on peut définir un réseau de neurone artificiel par les quatre éléments suivants :

- La nature des entrées et des sorties : Elles peuvent être :
- Binaire : $(-1 ; +1)$ ou $(0,1)$
- Réelles.
- La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées : Elle peut être :
- Booléenne
- Linéaire
- Affine
- Polynomiale de degré supérieur à deux
- La fonction d'activation du neurone qui définit son état en fonction de son entrée totale:

Elle peut être :

- Une fonction binaire à seuil ; dans ce cas on s'arrange pour que la forme de la fonction soit telle qu'on puisse utiliser la fonction de Heaviside (figure III.4.a) ou la fonction signe (Figure III.4.b) :

- Une fonction linéaire à seuil (figure III.4.a) : Soit SATUR la fonction à seuil
- Une fonction sigmoïde (figure III.4.b).
- La fonction de sortie qui calcule la sortie du réseau en fonction de son état d'activation ; en général cette fonction est considérée comme la fonction identité.

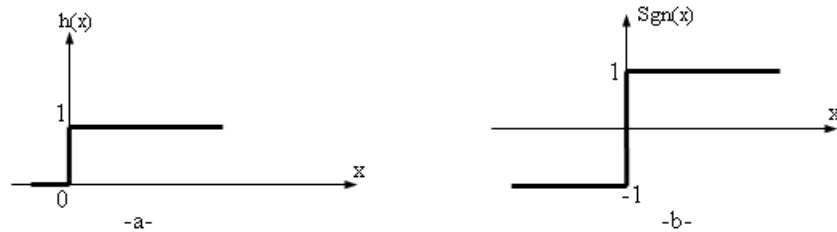


Figure III. 4: a-Fonction de Heaviside, b-Fonction signe.

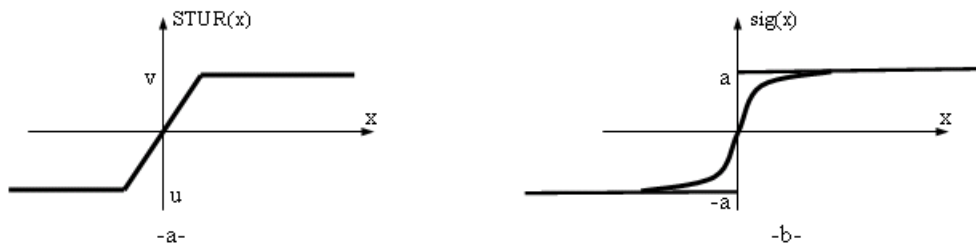


Figure III. 5: a-Fonction linéaire à seuil, b-Fonction sigmoïde.

On distingue deux types de réseaux de neurones : Les réseaux non bouclés et les réseaux bouclés.

III.4.2.1 Réseau de neurones non bouclé

Un réseau de neurones non bouclé se représente graphiquement comme un ensemble de neurones interconnectés, dans lequel l'information circule uniquement des entrées vers les sorties, sans rétroaction [Bis1995].

Ce type de réseau est caractérisé par un graphe acyclique, ce qui signifie que, quel que soit le neurone de départ, il est impossible de revenir à ce neurone en suivant les connexions du réseau.

Les neurones de sortie sont ceux qui effectuent le dernier calcul dans la composition des fonctions, tandis que les neurones cachés assurent les calculs intermédiaires (voir Figure III.6).

Dans les réseaux non bouclés à couches, l'architecture est organisée de manière hiérarchique :

- Les neurones d'une même couche ne sont pas connectés entre eux.
- Chaque couche reçoit des signaux de la couche qui la précède et transmet ses résultats à la couche suivante.

Les deux couches situées aux extrémités du réseau sont :

- La couche d'entrée, qui reçoit les données en provenance de l'environnement extérieur,
- La couche de sortie, qui fournit les résultats des traitements.

Les couches situées entre ces deux extrémités sont appelées couches cachées, et leur nombre peut varier selon la complexité du réseau.

Lorsqu'un réseau de neurones non bouclé possède une ou plusieurs couches cachées dont les neurones utilisent une fonction d'activation sigmoïde, on parle généralement de perceptron multicouche (MLP).

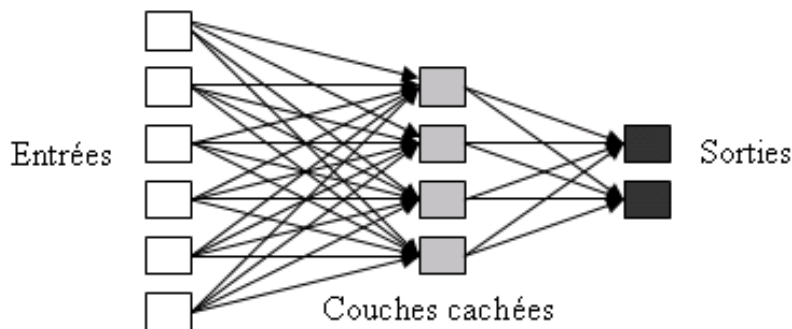


Figure III. 6: Structure d'un réseau de neurones non bouclé.

III.4.2.2 Réseau de neurones bouclé (ou récurrent) :

Un réseau de neurones bouclé est schématisé par un graphe des connexions qui est cyclique.

Lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de "cycle"). Ainsi, un retard entier multiple de l'unité de temps choisie est attaché à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arrête de son graphe). Une grandeur à un instant donné ne peut pas être fonction de sa propre valeur au même instant. Tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul.

La figure III.7 représente un exemple de réseau de neurones bouclé. Les chiffres dans les carrés indiquent le retard attaché à chaque connexion, exprimé en multiple de l'unité de temps. Ce réseau contient un cycle, qui part du neurone 3 et revient à celui-ci en passant par le neurone 4. La connexion de 4 vers 3 ayant un retard d'une unité de temps.

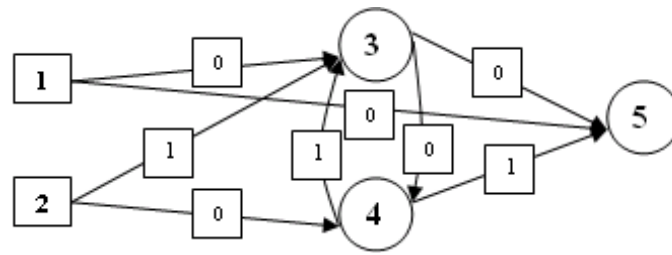


Figure III. 7: Un réseau de neurones bouclé à deux entrées.

III.5. Types de modèles de neurones

III.5.1 Modèle d'un neurone à entréer simple

Le scalaire d'entrée p est multiplié par le scalaire poids w pour former wp , un des termes de la somme. L'autre entrée, 1, est multipliée par le biais b , puis introduite dans la somme. La somme de sortie n , souvent dénommée entrée du réseau, passe dans la fonction de transfert f qui produit le scalaire de sortie à voir figure III.8.

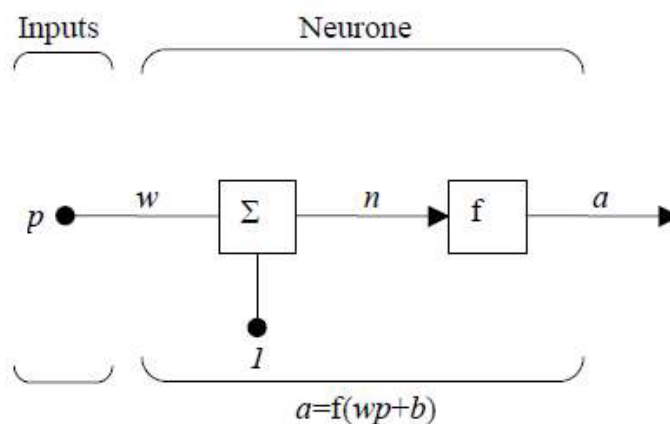


Figure III. 8: Neurone à simple entrée.

Le neurone de sortie est calculé par l'équation :

$$a = f(w \cdot P + b)$$

Si par exemple

$$w = 3$$

$$p = 2 \quad \Rightarrow \quad a = f(3 \cdot 2 - 1.5) = f(4.5)$$

$$b = -1.5$$

La sortie dépend de la fonction de transfert choisie. Le biais est quasi similaire au poids sauf qu'il possède une valeur d'entrée constante égale à 1. Il peut cependant être omis selon les conditions choisies par l'utilisateur.

A noter que w et b sont des paramètres scalaires ajustables du neurone. Typiquement, la fonction de transfert f est choisie par l'utilisateur et les paramètres w et b sont, ajustés par des lois d'apprentissage de façon à adapter le neurone entrée/sortie à un but spécifique.

III.5.2. Neurone à entrées multiples

Le point central du développement d'un réseau de neurones réside dans son processus d'apprentissage. Il s'agit d'un mécanisme adaptatif par lequel les connexions synaptiques entre les neurones sont ajustées en fonction d'une source d'information donnée.

Dans le cadre des réseaux de neurones artificiels, on associe généralement au modèle un algorithme d'apprentissage, sans lequel celui-ci aurait un intérêt limité. Dans la plupart des approches actuelles, les poids des connexions constituent les variables ajustées au cours de l'apprentissage. L'objectif est de modifier ces poids afin que la sortie du réseau corresponde le plus fidèlement possible aux exemples d'apprentissage.

Les poids sont tout d'abord initialisés aléatoirement. Ensuite, on présente au réseau des exemples expérimentaux représentatifs du comportement du système dans un domaine défini, sous forme de couples entrée-sortie. Un algorithme d'optimisation ajuste progressivement les poids au fil des itérations, dans le but de minimiser l'écart entre les sorties prédites et les sorties réelles.

Afin de prévenir le phénomène de surapprentissage, la base de données est scindée en deux sous-ensembles :

- Une base d'apprentissage, utilisée pour l'optimisation des poids,
- Et une base de test, servant à évaluer la capacité de généralisation du réseau.

Les poids finaux retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test, car une optimisation uniquement sur les données d'apprentissage pourrait entraîner une précision artificiellement élevée, sans que le modèle puisse bien s'adapter à de nouvelles données. En effet, après un certain nombre d'itérations, le réseau risque de s'ajuster aux fluctuations locales (bruit) au lieu de modéliser la relation globale entre les variables d'entrée et de sortie.

Comme illustré dans la Figure III.9, les premières itérations présentent une erreur relativement élevée sur la base d'apprentissage, notamment en raison de l'initialisation aléatoire des poids. Cette erreur tend ensuite à diminuer au fil des itérations. Quant à l'erreur sur la base de test, elle suit une courbe décroissante avant d'atteindre un minimum, puis augmente à nouveau si l'entraînement se poursuit trop longtemps. C'est à ce point de minimum d'erreur sur la base de test que l'on choisit généralement de conserver les poids optimaux.

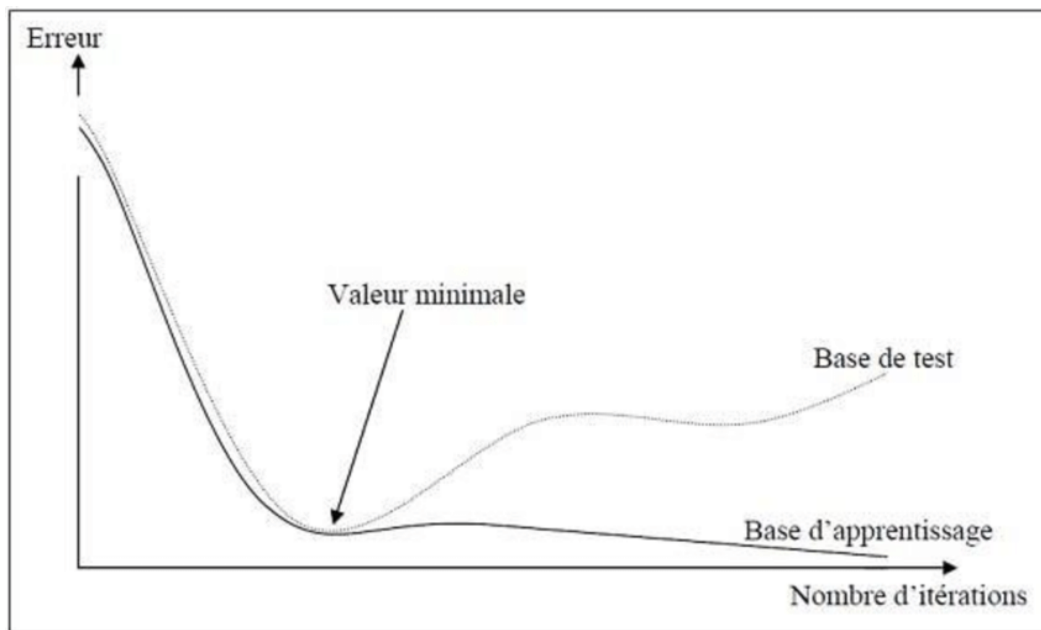


Figure III. 9: Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations.

III.6 Apprentissage des ANN

III.6.1. Type d'apprentissage

Il existe une grande diversité de règles d'apprentissage, que l'on peut regrouper en trois grandes catégories :

- Apprentissage supervisé,
- Apprentissage non supervisé,
- Et apprentissage par renforcement.

Malgré leurs différences, ces méthodes partagent un objectif fondamental commun : réaliser des tâches telles que la classification, l'approximation de fonctions, ou encore la prévision.

Dans le contexte spécifique de la prévision, l'apprentissage vise à extraire des régularités à partir d'un ensemble d'exemples observés, afin de généraliser ces connaissances et de pouvoir les appliquer à de nouveaux exemples.

III.6.1.1. Apprentissage supervisé :

Un apprentissage est qualifié de supervisé lorsque le réseau est contraint de converger vers un état final prédéfini au moment où un motif lui est présenté. Ce type d'apprentissage repose sur une base de données structurée, constituée d'un ensemble d'exemples associant des vecteurs d'entrée aux sorties souhaitées (ou solutions attendues pour les sorties du réseau).

Dans le cadre de la prévision, l'apprentissage supervisé – également appelé apprentissage par exemples – est la méthode la plus couramment utilisée. Elle consiste à associer une réponse cible à chaque signal d'entrée, de manière à guider l'apprentissage du réseau.

Les poids synaptiques sont alors ajustés de façon progressive, jusqu'à ce que l'erreur entre les sorties calculées par le réseau et les sorties attendues soit minimisée.

Ce type d'apprentissage requiert un ensemble de données suffisamment riche, et nécessite que les solutions soient connues pour tous les exemples de la base d'apprentissage.

III.6.1.2 Apprentissage renforcé :

L'apprentissage par renforcement constitue une approche proche de l'apprentissage supervisé, à ceci près que, plutôt que de fournir explicitement des sorties attendues, le réseau reçoit une évaluation (ou récompense) quant à la qualité de sa performance après un certain nombre d'itérations.

Ce score représente une mesure du degré de performance du réseau face à la tâche à accomplir, et oriente progressivement l'ajustement des poids synaptiques pour maximiser cette performance.

Les algorithmes d'apprentissage par renforcement sont particulièrement bien adaptés aux systèmes de contrôle, où l'objectif est d'apprendre une stratégie optimale à partir d'interactions avec l'environnement, sans connaissance préalable des réponses correctes.

III.6.1.3 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé repose sur l'ajustement des poids synaptiques à partir d'un ensemble d'apprentissage constitué uniquement de données d'entrée, sans qu'aucune sortie désirée ne soit spécifiée.

Mais que cherche à apprendre le réseau dans ce contexte ? L'objectif principal est d'identifier des similarités et des différences au sein des données. Ainsi, les poids du réseau, tout comme ses sorties, convergent – en théorie – vers des représentations qui traduisent les régularités statistiques présentes dans l'ensemble d'apprentissage.

Ce mode d'apprentissage est parfois qualifié de compétitif et/ou coopératif, en raison des mécanismes internes mis en œuvre pour répartir les rôles entre les neurones. Son principal avantage réside dans sa forte capacité d'adaptation, souvent assimilée à un processus d'auto-organisation.

L'apprentissage non supervisé trouve particulièrement ses applications dans des domaines tels que le traitement du signal, la réduction dimensionnelle, ou encore l'analyse factorielle.

III.6.2. Algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids n de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée. L'apprentissage est une méthode d'identification paramétrique qui permet d'optimiser les valeurs des poids du réseau.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note: l'algorithme de rétropropagation, la Méthode Quasi-Newton, Algorithme de BFGS etc...

L'algorithme de rétropropagation (ARP) ou de propagation arrière « back propagation » est l'exemple d'apprentissage supervisé le plus utilisé à cause de l'écho médiatique de certaines applications spectaculaires telles que la démonstration de Sejnowski et Rosenberg dans laquelle l'ARP est utilisé dans un système qui apprend à lire un texte. Un autre succès fut la prédiction des cours du marché boursier et plus récemment la détection de la fraude dans les opérations par cartes de crédit.

La technique de rétropropagation du gradient (Backpropagation en anglais) est une méthode qui permet de calculer le gradient de l'erreur pour chaque neurone du réseau, de la dernière couche vers la première. L'historique des publications montre que l'ARP a été découvert indépendamment par différents auteurs mais sous différentes appellations. Le principe de la rétropropagation peut être décrit en trois étapes fondamentales : acheminement de l'information à travers le réseau ; rétropropagation des sensibilités et calcul du gradient; ajustement des paramètres par la règle du gradient approximé. Il est important de noter que l'ARP souffre des limitations inhérentes à la technique du gradient à cause du risque d'être piégé dans un minimum local. Il suffit que les gradients ou leurs dérivées soient nuls pour que le réseau se retrouve bloqué dans un minimum local.

Ajoutons à cela la lenteur de convergence surtout lorsqu'on traite des réseaux de grande taille (c'est à dire pour lesquels le nombre de poids de connexion à déterminer est important.

Chapitre 4 : Proposition et validation d'un modèle numérique en 3D de stabilité de talus

IV.1. Introduction

L'analyse de la stabilité des talus génère des résultats complexes liés aux caractéristiques du sol, aux conditions de chargement et aux paramètres géométriques. Pour interpréter ces résultats de manière efficace, une approche statistique est nécessaire afin d'identifier les tendances, de mesurer la dispersion des données et de déterminer l'influence relative des différents facteurs. Cette étude se concentre sur l'exploitation des résultats obtenus à partir de simulations numériques en modélisant un talus à l'aide du logiciel PLAXIS 3D. À travers des méthodes statistiques appropriées, il sera possible d'établir des relations entre les propriétés du sol et le facteur de sécurité, et de proposer des modèles mathématiques capables de prédire le comportement du talus sous diverses conditions. La démarche adoptée vise à simplifier l'analyse de stabilité en fournissant des outils prédictifs fiables, tout en améliorant la compréhension des mécanismes de rupture. Cette approche contribue à une meilleure maîtrise du risque géotechnique et à l'optimisation des solutions de conception.

IV.2. Présentation du modèle numérique

Cette étude analyse la stabilité d'une pente homogène à l'aide du logiciel PLAXIS 3D. Le modèle représente une pente de hauteur $H = 40$ m, reposant sur un sol cohésif caractérisé par une cohésion $c = 40$ kPa, un angle de frottement interne $\varphi = 20^\circ$ et un poids volumique $\gamma = 20$ kN/m³. Afin d'assurer une représentation réaliste et de minimiser les effets de bord, la longueur du modèle est fixée à 200 m, soit cinq fois la hauteur de la pente, avec une profondeur de 10 m dans la troisième dimension. Les conditions aux limites imposent un blocage des déplacements horizontaux sur les parois latérales, tandis que la base est contrainte à la fois horizontalement et verticalement. La modélisation adopte le critère de rupture de Mohr-Coulomb, largement utilisé en géotechnique pour sa simplicité et sa pertinence dans l'analyse des sols cohésifs.

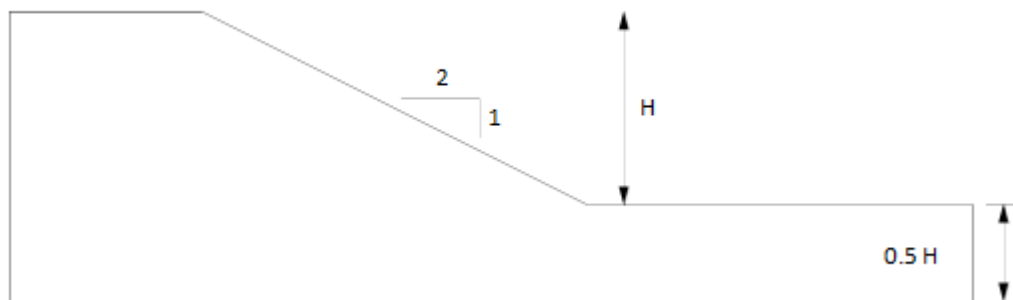


Figure IV.1 : Géométrie du modèle de référence.

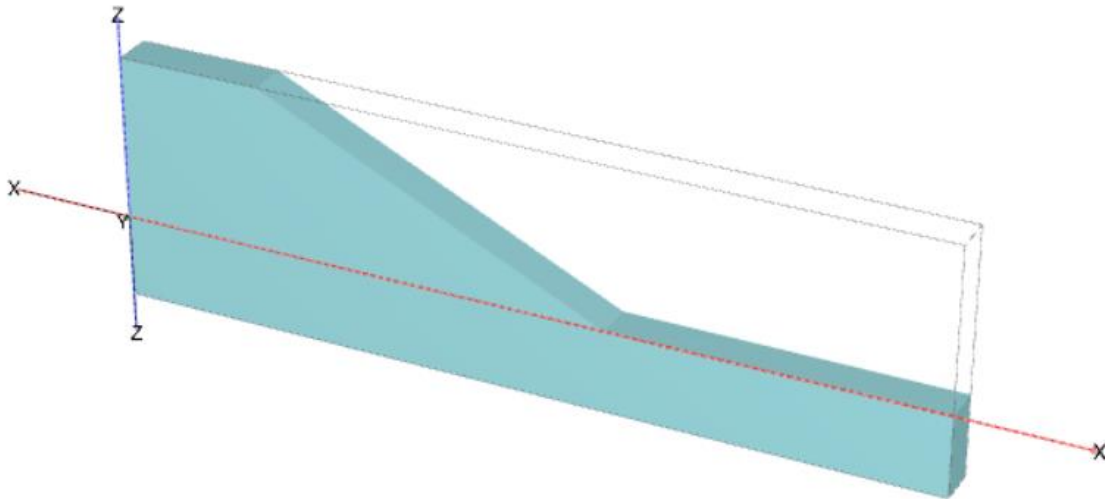


Figure IV.2 : Modèle numérique adopté en 3D.

Un maillage raffiné est appliqué dans les zones susceptibles de développer des mécanismes de rupture, afin d'améliorer la précision des résultats. Cette configuration permet de simuler de manière fiable le comportement de la pente et d'évaluer le facteur de sécurité associé à sa stabilité.

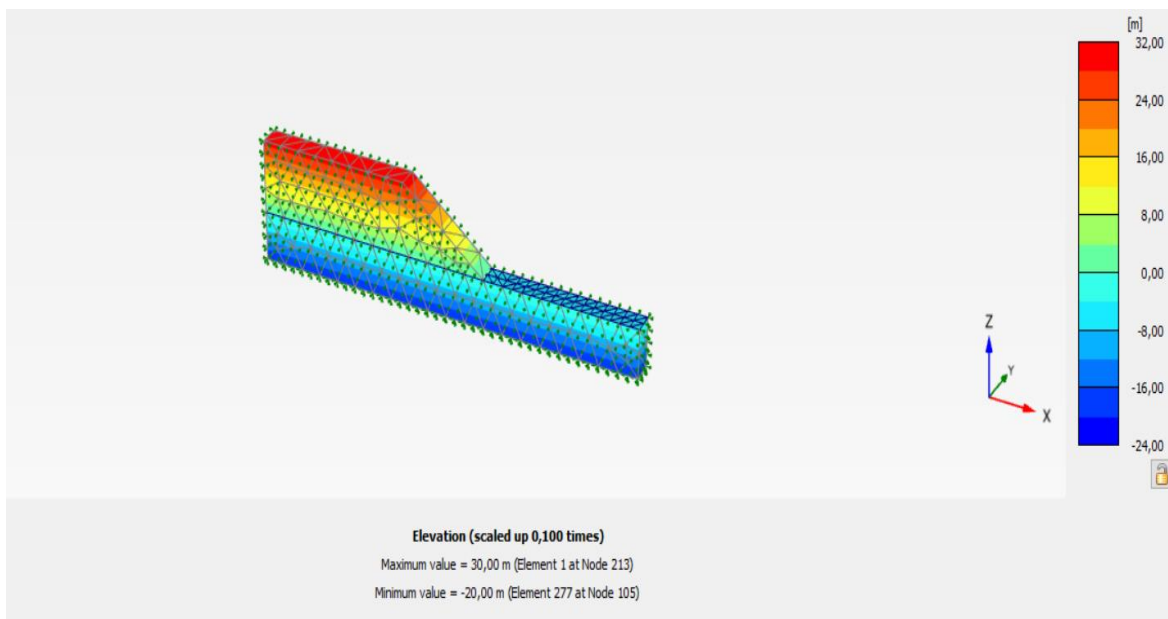


Figure IV.3 : Maillage du modèle.

Avant de procéder à l'étude paramétrique, des simulations préliminaires ont été réalisées pour valider les dimensions du domaine, le niveau de raffinement du maillage et l'application des conditions aux limites, garantissant ainsi la fiabilité des résultats. Pour évaluer la précision du modèle numérique, le cas de référence proposé par Griffiths et Lane (1999) a été examiné. Ce cas porte sur une pente inclinée à $26,57^\circ$, de hauteur $H = 40$ m, reposant sur une couche de sol de fondation d'épaisseur $H/2$. La géométrie du modèle est illustrée à la Figure IV.1, et les propriétés mécaniques utilisées sont résumées dans le Tableau IV.1.

Le problème est modélisé à l'aide d'un modèle géométrique en (3D), illustré dans la figure V.2. L'analyse numérique a été effectuée avec le logiciel PLAXIS 3D, qui permet de modéliser les déformations et l'évaluation détaillée de la stabilité du talus avec un temps de calcul optimisé.

Dans le modèle PLAXIS 3D, des conditions aux limites de type rouleau (roller) ont été appliquées sur les faces verticales, restreignant le déplacement horizontal, tandis que la base a été bloquée à la fois horizontalement et verticalement afin d'assurer la stabilité globale du modèle. La longueur du modèle dans la troisième direction a été fixée à 25 % de la hauteur du talus ($H = 10$ m), dans le but de réduire le temps de calcul et de permettre une comparaison cohérente avec les travaux antérieurs, notamment ceux de Ho (2017).

Tableau IV.1: Caractéristiques géomécaniques du sol.

Paramètre	Argile drainé	Unité
Modèle de comportement	Mohr-Coulomb	-
Module de Young (E)	50×10^3	(KN/m ²)
Coefficient de Poisson (ν)	0,3	-
Masse volumique (γ)	20	(KN/m ³)
Angle de frottement (ϕ)	20	(°)
Angle de dilatance (ψ)	00	(°)
Cohésion (C)	40	(KN/m ²)

IV.3 Modèles constitutifs et paramètres géomécaniques de modélisation

La modélisation du cas de référence est basée sur des paramètres géomécaniques réels, dont les détails sont présentés dans la section suivante.

IV.3.1 Le sol

Le matériau utilisé dans cette étude est une argile drainée, respectant le critère de Mohr-Coulomb. Et régie par une loi de comportement non linéaire. Ce critère a été choisi pour sa simplicité et la disponibilité des paramètres requis. Le modèle est constitué d'un sol argileux, comme illustré à la Figure IV.4, avec les caractéristiques détaillées dans le tableau V.1.

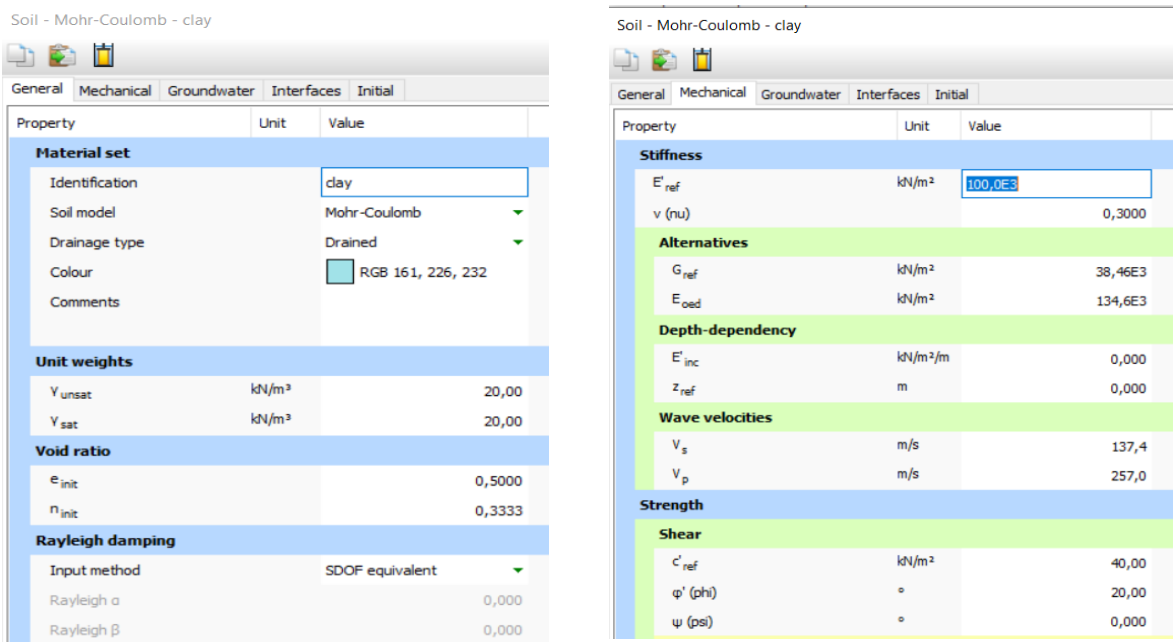


Figure IV.4 : Paramètres géotechniques du sol.

Le modèle de comportement adopté pour simuler le sol argileux est un modèle élastique parfaitement plastique, conforme au critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Ce modèle est caractérisé par quatre paramètres principaux, à savoir les paramètres élastiques (E : module d'Young, ν : coefficient de Poisson) et les paramètres plastiques (c : cohésion, ϕ : angle de frottement).

IV.4. Résultats de la modélisation

L'analyse tridimensionnelle effectuée avec PLAXIS 3D a donné un facteur de sécurité (FS) égal à 1,339, voir figure IV.5. Bien que cette valeur soit légèrement inférieure à celle rapportée par Ho (2017) utilisant ABAQUS 3D (1,39), elle reste dans une plage acceptable et montre une bonne concordance globale avec les résultats issus des méthodes d'équilibre limite telles que Bishop, Spencer et GLE. Cet écart mineur peut être attribué aux différences dans la modélisation géométrique, ou les paramètres numériques choisis pour l'analyse.

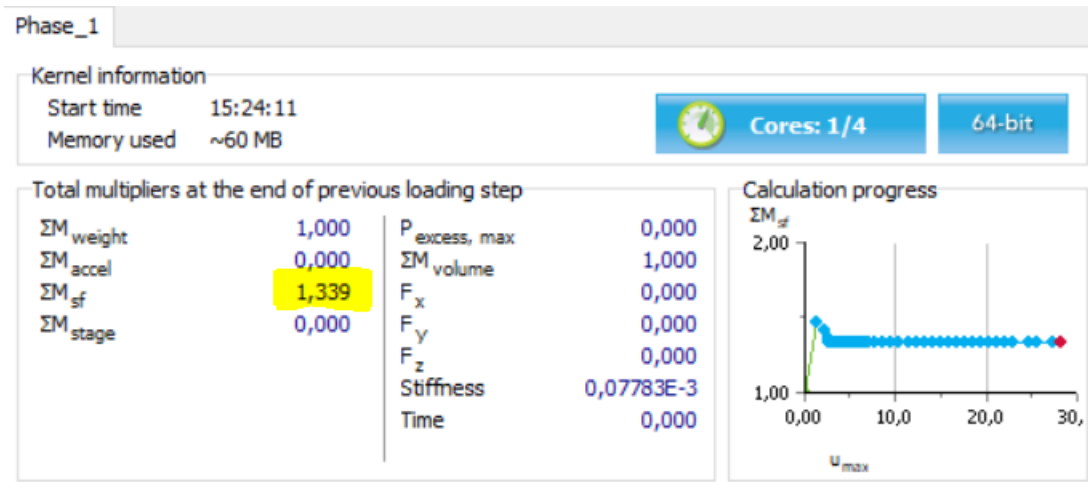


Figure IV.5 :Résultat de la modélisation en termes de coefficient de sécurité.

Tableau IV.2: Comparaison du résultat en termes de coefficient de sécurité avec des études antérieures.

Type de méthode	Méthode LE	Surface de rupture	FS (Circulaire)	FS (Spirale logarithmique)	Méthode FE	FS
Références	Janbu	Circulaire / Spirale log.	1,29	1,28	Ho (2017) – ABAQUS 2D	1,38
	Bishop	Circulaire / Spirale log.	1,376	1,361	Ho (2017) – ABAQUS 3D	1,39
	Spencer	Circulaire / Spirale log.	1,373	1,363	Griffiths & Lane (1999)	1,37
	GLE (Équilibre Limite Généralisé)	Circulaire / Spirale log.	1,378	1,348	-	-
Présente étude	Ordinaire	Circulaire / Spirale log.	1,309	1,287	PLAXIS 2D	1,36
	-	-	-	-	PLAXIS 3D	1,34

Ce résultat confirme que l'utilisation de PLAXIS 3D permet d'obtenir une estimation fiable du facteur de sécurité, tout en offrant une représentation plus réaliste du comportement du sol et du talus, en particulier dans les situations complexes difficilement modélisables en deux dimensions.

IV.5. Étude paramétrique

IV.5.1. Introduction

L'analyse de la stabilité des talus repose sur une compréhension approfondie de l'influence des paramètres géométriques et géotechniques. Une étude paramétrique des paramètres géotechniques et géométrique, permet d'identifier et de quantifier l'impact de ces paramètres sur le coefficient de sécurité.

IV.5.2. Influence de la cohésion sur le coefficient de sécurité

La cohésion du sol est l'un des paramètres géotechniques les plus déterminants dans l'évaluation de la stabilité des talus. Elle représente la capacité intrinsèque du sol à résister aux contraintes de cisaillement sans pression normale. Dans cette section, nous nous intéressons à l'effet de la variation de la cohésion sur le coefficient de sécurité, en supposant que les autres paramètres (hauteur du talus (H), inclinaison du talus (Beta), angle de frottement interne (Phi) et le poids volumique (Gamma)) restent constants. Des simulations numériques seront réalisées à l'aide de Plaxis 3D selon les configurations définies en tableau IV.3, afin d'analyser la sensibilité du talus à ce paramètre. Les résultats obtenus permettront de tracer une courbe de réponse illustrant la relation entre la cohésion et la stabilité du talus.

Tableau IV.3: Valeurs du coefficient de sécurité F_s en fonction de la variation de la cohésion c .

C (KPa)	Phi (°)	H (m)	Beta (°)	Gamma (KN/m ³)	Fs
40	18	30	25	17,5	1,47
50	18	30	25	17,5	1,61
60	18	30	25	17,5	1,75
70	18	30	25	17,5	1,88

On observe sur le graphe de la figure IV. 6, que plus la cohésion (C) augmente, plus le coefficient de sécurité (F_s) s'élève. La relation entre ces deux paramètres semble être approximativement linéaire dans l'intervalle étudié.

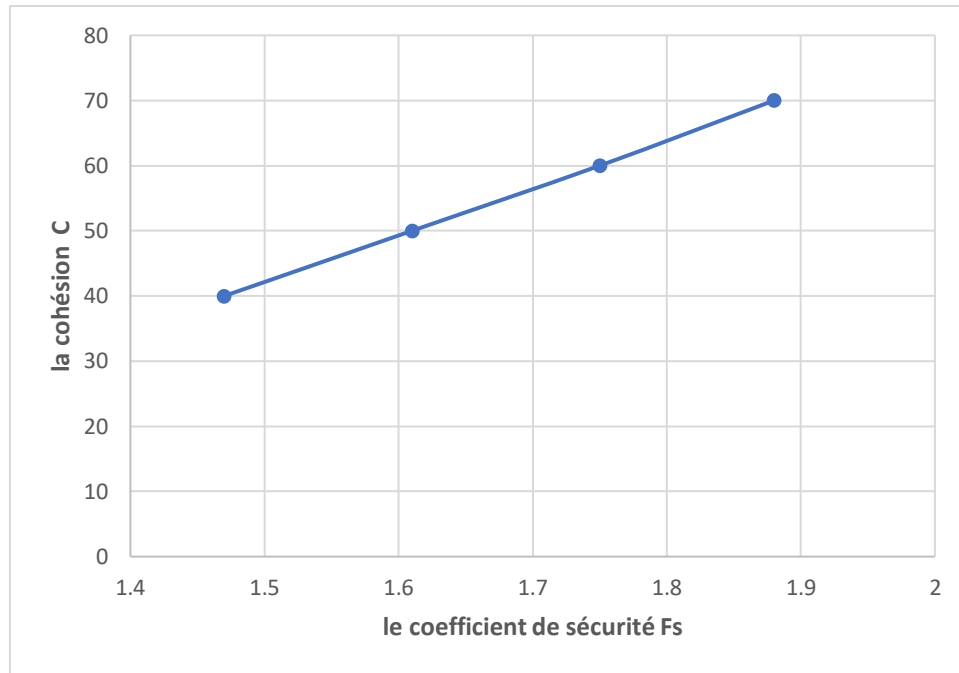


Figure IV.6 : Variation du coefficient de sécurité en fonction de la cohésion c .

IV.5.3. Influence de l'angle de frottement interne sur le coefficient de sécurité

L'angle de frottement interne reflète la résistance au cisaillement générée par le frottement entre les particules du sol. C'est un facteur déterminant dans la stabilité des structures en sol. L'analyse des simulations, avec les autres paramètres fixés, révèle qu'une augmentation de cet angle améliore le coefficient de sécurité. Ce comportement met en évidence le rôle crucial de la résistance au frottement dans la limitation des glissements. Ainsi, un sol avec un angle de frottement élevé présente une stabilité accrue.

Tableau IV.3: Valeurs du coefficient de sécurité F_s en fonction de la variation de l'angle de frottement interne Φ .

C (KPa)	Phi (°)	H (m)	Beta (°)	Gamma (KN/m ³)	Fs
50	15	30	25	17,5	1,45
50	18	30	25	17,5	1,61
50	21	30	25	17,5	1,78
50	24	30	25	17,5	1,95

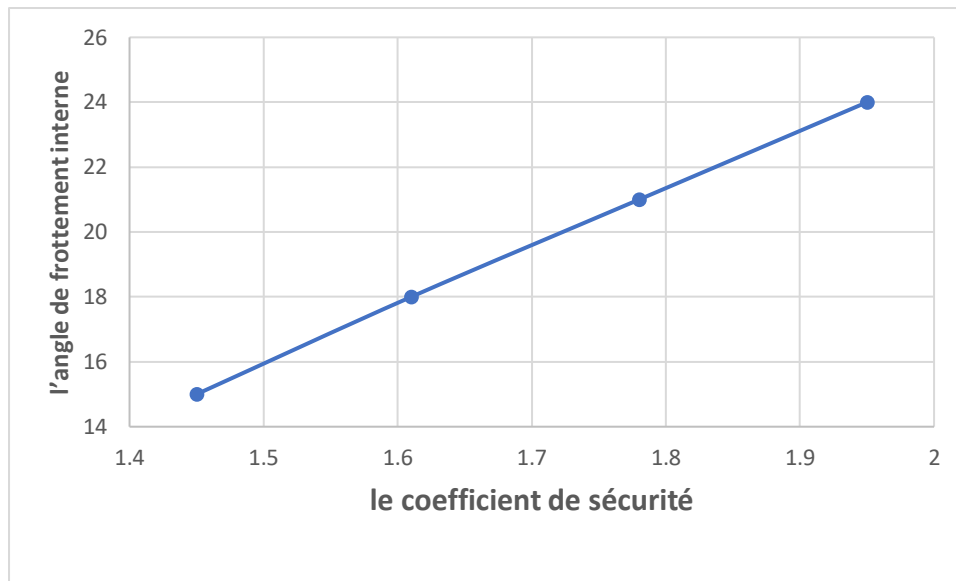


Figure IV.7 : Variation du coefficient de sécurité en fonction de de la variation de l'angle de frottement interne Phi.

Sur le graphique de la figure IV.7, on constate qu'à mesure que l'angle de frottement interne (ϕ) augmente, le coefficient de sécurité (F_s) augmente également.

IV.5.4. Influence de la hauteur du talus sur le coefficient de sécurité

La hauteur du talus est un facteur géométrique fondamental influençant sa stabilité globale. En augmentant la hauteur, la masse de sol en mouvement potentiel devient plus importante, ce qui peut accroître les efforts de cisaillement internes.

Tableau IV.4: Valeurs du coefficient de sécurité F_s en fonction de la variation de la hauteur du talus H.

C (KPa)	Phi (°)	H (m)	Beta (°)	Gamma (KN/m ³)	Fs
50	18	20	25	17,5	1,97
50	18	30	25	17,5	1,61
50	18	40	25	17,5	1,42
50	18	50	25	17,5	1,3

Dans cette section, nous analysons l'effet de la variation de la hauteur sur le coefficient de sécurité, tout en maintenant constants les autres paramètres (cohésion, angle de frottement, inclinaison et poids volumique). Les résultats illustrés sur la figure IV.8, issus des simulations numériques montrent une diminution progressive du coefficient de sécurité avec l'augmentation de la hauteur, traduisant une baisse de stabilité. Cette tendance confirme que les talus plus hauts sont généralement plus vulnérables à l'instabilité.

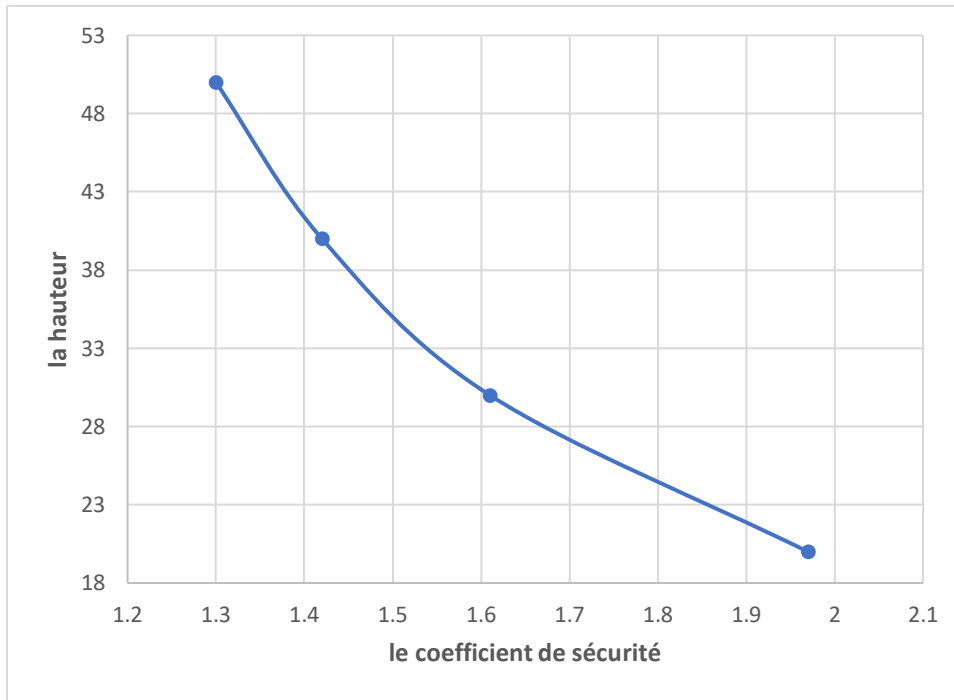


Figure IV.8: Variation du coefficient de sécurité en fonction de de la variation de la hauteur du remblai H.

IV.5.5. Influence de l'inclinaison du talus sur le coefficient de sécurité

L'inclinaison du talus détermine l'angle de la pente, ce qui influence la composante de la force gravitationnelle dirigée vers le bas. Plus la pente est raide, plus les risques de glissement sont élevés.

Tableau IV.5: Valeurs du coefficient de sécurité F_s en fonction de l'inclinaison du talus.

C (KPa)	Phi (°)	H (m)	Beta (°)	Gamma (KN/m ³)	Fs
50	18	30	20	17,5	1,77
50	18	30	25	17,5	1,61
50	18	30	30	17,5	1,49
50	18	30	35	17,5	1,38

En gardant constants les paramètres géotechniques et géométriques, les résultats numériques sur la figure IV.9, montrent que le coefficient de sécurité diminue avec l'augmentation de l'inclinaison. Cette diminution traduit une réduction de la capacité de résistance du sol face aux forces déstabilisantes, rendant le talus plus vulnérable aux ruptures.

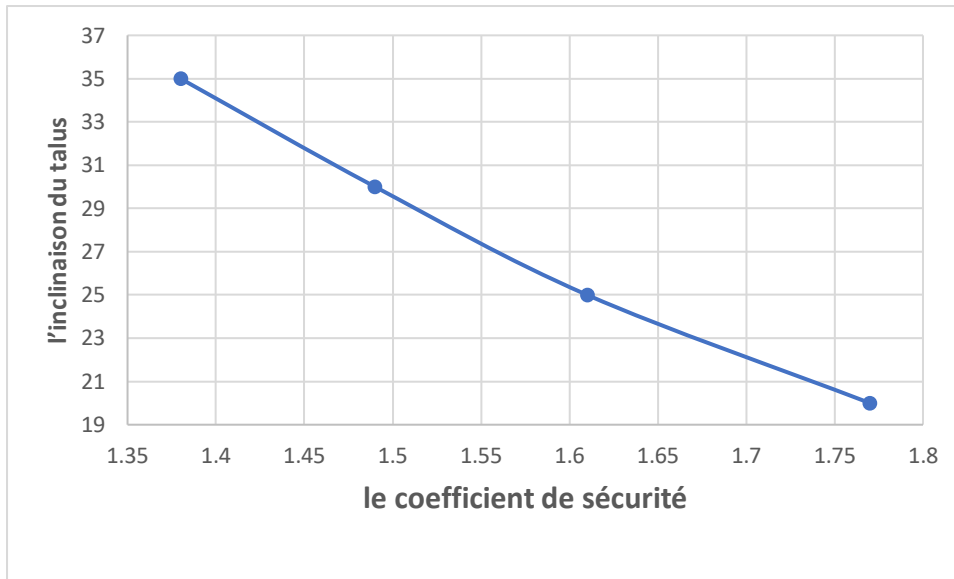


Figure IV.9: Variation du coefficient de sécurité en fonction de de l'inclinaison du talus.

IV.5.6. Influence du poids volumique du sol sur le coefficient de sécurité

Le poids volumique représente la densité du sol, c'est-à-dire la masse par unité de volume. Un sol plus dense génère des charges gravitationnelles plus importantes, ce qui peut compromettre la stabilité du talus.

Tableau IV.6: Valeurs du coefficient de sécurité F_s en fonction du poids volumique du sol.

C (KPa)	Phi (°)	H (m)	Beta (°)	Gamma (KN/m ³)	Fs
50	18	30	25	15	1,68
50	18	30	25	17,5	1,61
50	18	30	25	20	1,55

Les résultats obtenus et illustrés sur la figure IV.10, indiquent que lorsque le poids volumique augmente, le coefficient de sécurité tend à diminuer légèrement. Cette tendance s'explique par l'augmentation des forces internes qui favorisent le glissement, bien que l'effet reste moins prononcé que pour d'autres paramètres.

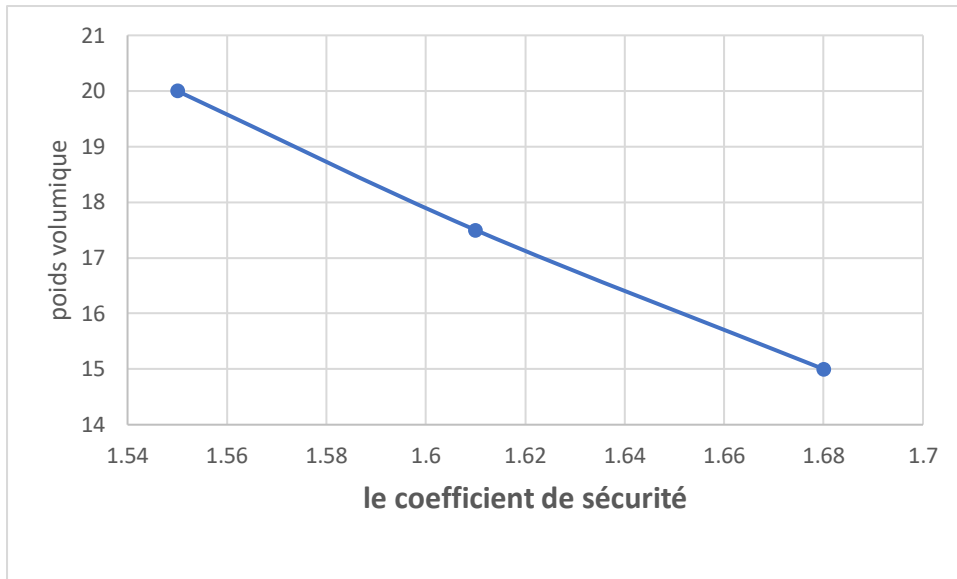


Figure IV.10: Variation du coefficient de sécurité en fonction du poids volumique du sol.

IV.6. Conclusion

L'étude paramétrique menée a permis de mettre en évidence l'influence respective des différents paramètres géométriques et géotechniques sur la stabilité des talus. Il en ressort que la **cohésion** et l'**angle de frottement interne** jouent un rôle fondamental dans l'augmentation du coefficient de sécurité, traduisant une amélioration significative de la stabilité du talus. À l'inverse, l'**augmentation de la hauteur** et de l'**inclinaison du talus** entraîne une diminution notable de la stabilité, en raison de l'accroissement des efforts de cisaillement. Quant au **poids volumique**, son effet reste modéré mais non négligeable.

Ces résultats permettent de mieux orienter les choix de conception et d'optimisation dans le dimensionnement des talus, en identifiant les paramètres les plus sensibles à contrôler pour assurer leur stabilité à long terme.

Chapitre 5 : Analyse comparative des méthodes de prédiction

V.1 Introduction

Ce chapitre de validation de la méthode de prédiction vise à évaluer la stabilité des talus à travers le coefficient de sécurité F_s , en fonction des paramètres géotechniques et géométriques du talus. Les principaux paramètres considérés sont la cohésion (c), l'angle de frottement interne (φ), la hauteur du talus (H), l'inclinaison du talus (β) et le poids volumique (γ).

Pour réaliser cette prédiction, nous employons la méthode de surface de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). La démarche consiste d'abord à sélectionner, à partir d'un recueil de tables, le plan d'expériences le plus adapté au modèle utilisé. Ce modèle comprend cinq facteurs, chacun ayant quatre niveaux, dont les intervalles de variation sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau V. 2: Intervalle de variation des paramètres du talus.

Paramètres	Niveaux de variation			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
C (KPa)	40.0	50.0	60.0	70.0
φ (°)	15.0	18.0	21.0	24.0
H (m)	20.0	30.0	40.0	50.0
β (°)	20.0	25.0	30.0	35.0
γ (KN/m ³)	15.0	17.5	20.0	-

V.2 Choix d'un plan d'expériences

Il est maintenant nécessaire de choisir un plan d'expériences, c'est-à-dire une liste ordonnée d'essais permettant d'identifier les paramètres recherchés. Pour cette étude, nous adopterons un plan factoriel complet L724, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau V.3: Partie du plan d'expérience factoriel complet L724 (5 facteurs, 4 niveaux).

N° d'essai	Facteurs				
	C (KPa)	φ (°)	H (m)	β (°)	γ (KN/m ³)
1	40	18	40	25	15
2	70	15	20	25	20
3	50	24	30	25	17,5

4	70	15	30	35	20
5	40	18	50	30	15
6	50	24	20	35	15
7	60	21	30	25	15
8	60	18	40	20	20
9	50	24	40	20	15
10	50	15	20	20	20
11	70	18	20	35	20
12	70	21	30	25	17,5
13	70	15	50	35	20
14	50	18	20	35	17,5
15	70	18	20	30	15
16	50	15	30	30	20
17	40	18	50	25	15
18	40	15	40	35	20
19	60	18	40	25	20
20	60	18	40	20	17,5
21	50	24	20	20	17,5
22	70	18	40	20	15
23	50	15	50	30	15
24	40	24	30	35	17,5
25	40	24	50	35	15
26	40	24	30	25	20
27	60	21	20	30	17,5
28	60	15	40	25	17,5
29	40	18	40	25	15
30	70	15	20	25	20

Dans ce tableau, chaque ligne représente une modélisation à effectuer numériquement à l'aide du logiciel Plaxis 3D. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser 724 modèles numériques conformes aux données présentées ci-dessus.

V.3. Modélisation des résultats par la méthode des surfaces de réponse

V.3.1. Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre les paramètres d'entrées, à savoir la cohésion(C), l'angle de frottement interne (ϕ) et la hauteur (H) et l'angle d'inclinaison (β) et le poids volumique (γ) et les paramètres de sorties (le facteur de sécurité (Fs)) est donnée par : $Fs = f(C, \phi, H, \beta, \gamma)$

Où : Fs est la fonction de réponse.

L'approximation des Fs est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres du modèle. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$Fs = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction.

X_i : représente les paramètres d'entrée(C, ϕ , H, β , γ);

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2}$$

Avec :

y_i : Valeur de la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience ;

$\bar{y}_i$: Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience ;

$\bar{y}$: Valeur moyenne des réponses mesurées.

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (facteur de sécurité (Fs)) et les variables d'entrées (C, ϕ , H, β , γ) a été exprimé avec un coefficient de détermination ($R^2 = 97 \%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse

statistique peut être utilisé pour prédire la sortie G en fonction des facteurs étudiés. Le modèle obtenu est présenté par l'équation.

$$\begin{aligned}
 F_s = & 1.53 - 0.0106 * C + 0.0668 * \varphi - 0.0263 * H + 0.0177 * \beta - 0.0792 * \gamma - 0.00015 * C^2 - 0.00115 * \varphi^2 \\
 & + 0.0004 * H^2 + 0.00042 * \beta^2 + 0.00148 * \gamma^2 - 0.00002 * \varphi * C + 0.00005 * C * H - 0.00045 * C * \beta - \\
 & 0.00077 * C * \gamma - 0.00044 * \varphi * H + 0.00029 * \gamma * \beta - 0.00026 * \varphi * \gamma - 0.00005 * H * \beta + 0.00016 * H * \gamma - \\
 & 0.00031 * \beta * \gamma \quad (V.1)
 \end{aligned}$$

D'après la figure, les résidus du modèle de capacité portante peuvent être jugés comme normalement distribués. Le test de normalité est donc satisfaisant

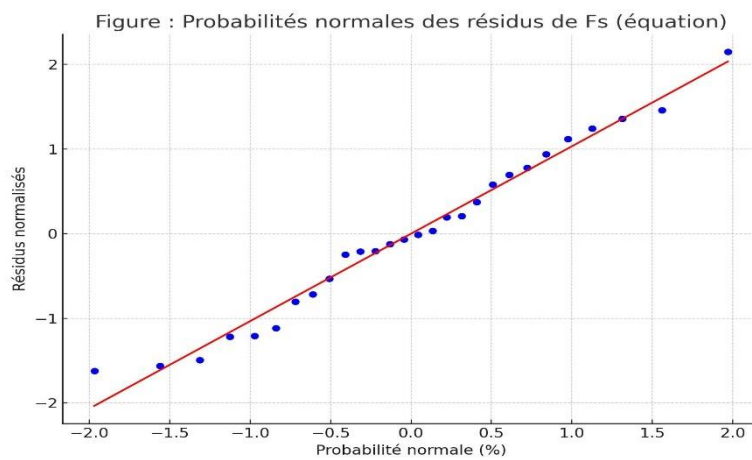


Figure V. 4: Probabilités normales des résidus du facteur de sécurité.

V.4. Modélisation des résultats par la méthode des réseaux de neurones artificiels

La figure V.2 illustre l'architecture adéquate du modèle du facteur de sécurité (F_s) par les réseaux de neurones artificiels (5-5-5-1), représentée avec cinq nœuds d'entrée (C , φ , H , β , γ), cinq nœuds dans la première couche cachée et cinq nœud dans la deuxième couche cachée un nœud pour la couche de sortie (facteur de sécurité). Cette architecture finale est obtenue après un nombre optimal de 30 itérations.

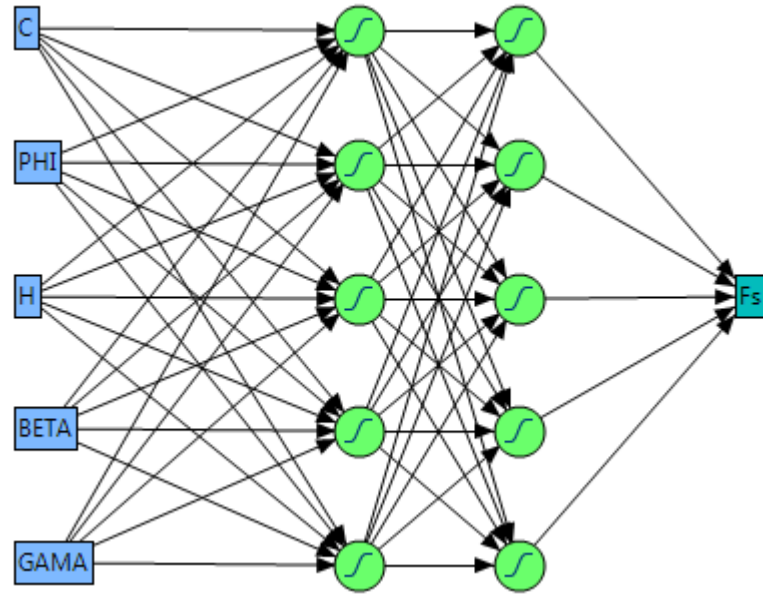


Figure V.5: Architecture du réseau de neurones artificiels (5-5-5-1) pour facteur de sécurité.

Le modèle mathématique de l'architecture de réseau de neurones artificiels (ANN) ci-dessus est présenté par l'équation 6.8. Ce modèle résulte du produit des couches cachées des six neurones avec une fonction linéaire.

$$F_s = 1.004 - 2.82 * H_{1-1} + 1.88 * H_{1-2} + 0.964 * H_{1-3} - 0.414 * H_{1-4} + 0.53 * H_{1-5} \quad (V.2)$$

Où H1 à H6 sont les sorties de chaque neurone de la couche cachée et sont exprimées comme suit :

$$H_{1-1} = \tan H(0.5(-1.105 + 0.48H_{2-1} - 1.332H_{2-2} + 1.272H_{2-3} + 0.501H_{2-4} - 0.808H_{2-5}))$$

$$H_{1-2} = \tan H(0.5(1.521 - 3.16H_{2-1} - 1.642H_{2-2} + 2.062H_{2-3} - 3.097H_{2-4} + 1.04H_{2-5}))$$

$$H_{1-3} = \tan H(0.5(0.534 + 0.93H_{2-1} + 2.403H_{2-2} + 2.057H_{2-3} - 0.601H_{2-4} - 0.215H_{2-5}))$$

$$H_{1-4} = \tan H(0.5(-0.194 - 3.603H_{2-1} + 1.858H_{2-2} + 2.407H_{2-3} - 0.623H_{2-4} + 3.351H_{2-5}))$$

$$H_{1-5} = \tan H(0.5(-2.858 - 0.613H_{2-1} - 2.457H_{2-2} - 0.374H_{2-3} + 0.88H_{2-4} + 0.273H_{2-5}))$$

Et

$$H_{2-1} = \tan H(0.5(0.354 + 0.032C + 0.122\phi - 0.12H - 0.087\beta - 0.108\gamma))$$

$$H_{2-2} = \tan H(0.5(-0.046 + 0.013C + 0.045\phi - 0.044H - 0.078\beta + 0.023\gamma))$$

$$H_{2-3} = \tan H(0.5(4.6 - 0.005C - 0.036\phi - 0.3H + 0.53\beta - 0.1\gamma))$$

$$H_{2-4} = \tan H(0.5(1.7 - 0.01C - 0.09\phi + 0.048H - 0.107\beta + 0.031\gamma))$$

$$H_{2-5} = \tan H(0.5(0.826 + 0.042C + 0.085\phi - 0.077H - 0.0001\beta - 0.203\gamma))$$

Les résultats prédits et observés pour les cas d'entraînement et de validation sont présentés dans la figure V.3.

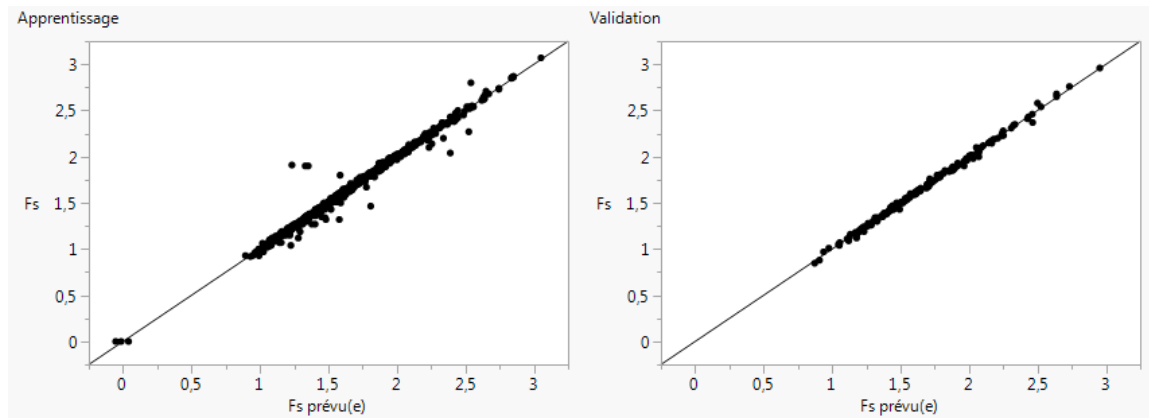


Figure V.6: Valeurs prédites par rapport aux valeurs numériques pour le facteur de sécurité.

Comme le montre la figure V.3, il est crucial de noter que l'intersection entre les valeurs numériques et prédites du facteur de sécurité est proche de la ligne médiane pour les deux cas. Le coefficient de détermination R^2 est de 0,981 pour le cas d'apprentissage et de 0,997 pour le cas de validation ; la valeur de la RMSE est de 5,919% et 2,238% pour les deux cas, respectivement. Cela révèle la robustesse du modèle mathématique ajusté.

V.5. Comparaison des modèles RSM et ANN

Une comparaison entre les méthodes RSM et ANN a été établie pour déterminer la précision des modèles prédictifs. À cette étape, certaines comparaisons étaient nécessaires pour évaluer la différence entre les résultats numériques et les valeurs prédites obtenues par les modèles RSM et ANN. Les critères de comparaison pour les deux modèles prédictifs sont le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, les faibles valeurs de l'erreur quadratique moyennent (RMSE) et de l'erreur absolue moyenne (MAE). Les réponses numériques et prédites en utilisant les modèles RSM et ANN sont présentées dans le tableau V.3. Il est évident d'après les résultats de ce tableau que les valeurs numériques et prédites par le modèle ANN sont très proches les unes des autres comparativement aux valeurs prédites par le modèle RSM.

Tableau V.3: Partie du plan d'expérience factoriel complet L724 (5 facteurs, 4 niveaux).

C (KPa)	φ (°)	H (m)	β (°)	γ (KN/m ³)	Fs	Fs Prédit_ANN	Fs Prédit_RSM
50	24	20	35	15	2,15	2,141501944	2,0607
60	18	40	20	20	1,66	1,653097852	1,676
50	15	20	20	20	1,86	1,849998315	1,8724
50	18	20	35	17,5	1,73	1,712855377	1,6835

50	24	50	30	15	1,5	1,500093147	1,4722
70	21	30	30	17,5	1,9	1,910966893	2,0006
60	21	30	25	20	1,84	1,855083991	1,9341
60	15	40	35	20	1,1	1,126572106	1,1099
50	24	30	20	15	2,2	2,191451811	2,2312
60	15	50	25	20	1,9	1,330177634	1,1429
60	15	30	20	15	1,82	1,791983914	1,9044
70	21	20	30	20	2,24	2,259372614	2,1726
70	15	40	30	20	1,3	1,297595477	1,3814
60	18	30	20	20	1,85	1,877894895	1,918
40	18	20	30	15	1,74	1,761307525	1,757
70	21	20	25	17,5	2,54	2,558711714	2,3801
50	18	50	35	17,5	1,08	1,079198354	0,9575
60	24	30	30	20	1,84	1,84143589	1,9502
70	24	30	30	20	1,96	1,983870072	2,0842
70	18	40	25	20	1,56	1,612432995	1,6725
50	21	20	30	15	2,11	2,112236906	2,0446
50	21	20	25	20	2,076	2,057556649	2,0421
40	18	30	30	17,5	1,35	1,362090696	1,445
50	21	20	35	20	1,778	1,730925602	1,7671
50	21	40	30	17,5	1,44	1,430317253	1,4906
60	15	30	30	17,5	1,47	1,456094067	1,5594
40	21	20	25	20	1,89	1,893332759	1,9081
40	18	20	30	17,5	1,64	1,655002937	1,687
50	21	20	30	20	1,89	1,879268445	1,9046
60	15	30	35	20	1,29	1,30657308	1,3519
40	21	20	30	20	1,71	1,723607105	1,7706
60	18	40	20	15	1,78	1,771071287	1,816
40	24	40	25	17,5	1,62	1,605654646	1,6477
60	15	50	35	17,5	1,05	1,045750101	0,9379
60	21	30	35	17,5	1,64	1,626719389	1,7291
60	18	20	25	15	2,28	2,278309396	2,1625
50	21	40	20	15	1,83	1,812818645	1,8356
70	24	20	25	20	2,62	2,634745956	2,4637
50	18	40	20	15	1,65	1,619719425	1,682
50	15	20	25	20	1,71	1,702197945	1,7349
60	21	20	20	17,5	2,54	2,525359186	2,3836
40	24	20	30	15	2,05	2,072171784	2,0642
40	21	50	35	15	1,16	1,167787298	1,0471
50	18	50	30	15	1,23	1,229867504	1,165
50	21	30	30	20	1,56	1,562509883	1,6626
40	18	30	35	15	1,32	1,340896303	1,3775
60	15	30	20	17,5	1,73	1,735363988	1,8344
70	24	30	35	17,5	1,91	1,914624846	2,0167
70	18	50	25	20	1,43	1,492513069	1,4305
70	15	50	30	17,5	1,22	1,232920211	1,2094

50	15	20	30	17,5	1,68	1,664727696	1,6674
60	15	40	35	17,5	1,17	1,174241225	1,1799
50	24	20	30	17,5	2,15	2,142589529	2,1282
70	21	30	30	15	2,01	2,011396181	2,0706
50	21	20	20	20	2,28	2,24881723	2,1796
40	21	30	20	17,5	1,82	1,813786504	1,8736
40	21	40	35	20	1,15	1,178733266	1,1491
60	15	20	30	15	2	1,995489228	1,8714
70	15	40	30	17,5	1,36	1,359468159	1,4514
70	24	40	25	20	1,9	1,913067721	1,9797
50	18	40	35	15	1,26	1,256450118	1,2695
40	24	30	20	17,5	2,01	1,979835613	2,0272
40	24	40	30	17,5	1,48	1,461267951	1,5102
70	18	30	30	17,5	1,75	1,752784044	1,847
40	15	30	25	15	1,364	1,37448305	1,4989
70	21	50	35	20	1,3	1,328274988	1,3091
50	15	50	35	15	1,027	1,019008496	0,8739
50	18	30	20	15	1,836	1,829488513	1,924
70	15	20	30	15	2,2	2,209207649	2,0054
60	18	50	25	17,5	1,39	1,406885447	1,3665
60	15	20	20	20	2,03	2,021552315	2,0064
50	15	30	35	17,5	1,25	1,266315187	1,2879
70	21	50	25	15	1,7	1,700379388	1,7241
70	15	40	20	20	1,6	1,579445435	1,6564
50	24	50	25	17,5	1,8	1,584846566	1,5397
40	18	40	30	15	1,24	1,242157928	1,273
70	24	40	30	17,5	1,81	1,793768143	1,9122
60	24	40	25	20	1,8	1,791835051	1,8457
60	24	20	25	17,5	2,54	2,529815559	2,3997
60	15	40	30	15	1,34	1,311743395	1,3874
60	15	30	25	20	1,505	1,513071568	1,6269
70	18	40	30	20	1,43	1,448341674	1,535
50	21	30	25	15	1,84	1,84406595	1,9401
50	21	40	35	20	1,26	1,262007745	1,2831
40	18	40	20	17,5	1,5	1,467366759	1,478
50	15	40	20	17,5	1,42	1,402996011	1,4584
40	21	50	25	17,5	1,36	1,404297056	1,2521
40	24	50	25	20	1,5	1,58890416	1,3357
60	15	20	35	20	1,65	1,622025426	1,5939
70	15	30	30	15	1,7	1,696002472	1,7634
50	24	30	30	20	1,71	1,709326584	1,8162
70	24	50	35	20	1,43	1,454393088	1,4627
50	15	40	30	15	1,23	1,204217009	1,2534
40	21	20	30	15	1,89	1,917008527	1,9106
50	24	50	25	20	1,59	1,625938491	1,4697
40	15	50	30	17,5	0,97	0,936891941	0,8074

60	24	40	30	17,5	1,69	1,679103785	1,7782
40	21	50	35	20	1,07	1,060892194	0,9071
40	15	50	25	15	1,1	1,131276433	1,0149
60	21	40	30	15	1,62	1,608451684	1,6946
60	18	20	20	15	2,44	2,420097264	2,3
60	15	30	30	15	1,56	1,539959096	1,6294
60	24	20	20	20	2,68	2,638506701	2,4672
50	24	30	20	17,5	2,16	2,129497949	2,1612
70	15	50	35	17,5	1,13	1,131026632	1,0719
40	21	50	30	20	1,19	1,157447859	1,0446
60	15	40	25	20	1,31	1,319287544	1,3849

Tableau V.1: Comparaison entre les modèles RSM et ANN.

ANN			RSM		
R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE
0.997	0.0229	0.0168	0.980	0.0591	0.0238

En conclusion, nous pouvons affirmer que le modèle ANN démontre une capacité supérieure à modéliser les relations complexes et non linéaires entre les paramètres d'entrée (C , ϕ , H , β , γ) et la réponse (F_s) (voir tableau V.4). Bien que le modèle RSM reste acceptable, sa précision est inférieure à celle du réseau de neurones. Par conséquent, le modèle ANN a été retenue comme référence pour la prédiction du coefficient de sécurité du talus (F_s)

Conclusion Générale

Conclusions Générales et perspectives

Dans cette étude, deux approches de modélisation ont été développées pour prédire le facteur de sécurité (F_s) des talus à base fixe et sommet variable : la méthode des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Les principaux paramètres géotechniques considérés sont la cohésion (C), l'angle de frottement interne (ϕ), la hauteur du talus (H), l'angle d'inclinaison du talus (β) et le poids volumique du sol (γ).

Les résultats obtenus montrent que :

- Le modèle RSM a permis de développer une relation quadratique explicite entre les paramètres d'entrée et le facteur de sécurité, avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 97\%$), indiquant une bonne capacité prédictive.
- Le modèle ANN, basé sur une architecture (5-5-5-1), a montré une précision remarquable avec un R^2 de 0,981 pour l'apprentissage et de 0,997 pour la validation, et des erreurs faibles (RMSE et MAE).
- La comparaison entre les deux méthodes montre une légère supériorité du modèle ANN en termes de précision globale, notamment dans la capacité à capturer les non-linéarités complexes entre les paramètres.

Ces résultats confirment la pertinence des techniques d'intelligence artificielle dans l'ingénierie géotechnique, en complément des approches statistiques classiques.

Cette étude a abouti à des résultats significatifs dans le domaine de l'évaluation de la stabilité des pentes, démontrant la supériorité des modèles de réseaux de neurones artificiels (ANN) dans la prédiction précise du facteur de sécurité par rapport à la méthodologie des surfaces de réponse (RSM).

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de l'intelligence artificielle appliquée à l'ingénierie géotechnique, tout en soulignant l'importance d'exploiter les technologies modernes pour résoudre des problèmes d'ingénierie complexes.

Pour approfondir cette étude, plusieurs pistes peuvent être envisagées - Étendre la base de données à des cas réels ou à des simulations plus complexes pour renforcer la robustesse des modèles.

- Intégrer d'autres techniques d'intelligence artificielle (comme les forêts aléatoires ou les algorithmes génétiques) pour une comparaison plus large.
- Développer une interface utilisateur simplifiée intégrant le modèle ANN pour une utilisation directe par les ingénieurs sur le terrain.
- Prendre en compte l'effet du drainage, de la saturation du sol ou des conditions sismiques pour des analyses plus réalistes.

Bibliographie

- [1] Durville, J.-L., Magnan, J.-P., & Blivet, J.-C. (2010). *Prévention et stabilisation des glissements de terrain : Conception, mise en œuvre et maintenance des dispositifs*. Guide technique, LCPC, Paris, 358 p.
- [2] Roby, J.-P. (1991). *Les mouvements de terrain : Typologie, prévention, stabilisation*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [3] Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. In: Schuster, R. L., & Krizek, R. J. (Eds.), *Landslides: Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington D.C., pp. 11–33.
- [4] Huang, Y. H. (1983). *Stability analysis of earth slopes*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [5] Bouassida, M. (1999). *Risques naturels et mouvements de terrain : Approche géotechnique*. Centre des publications universitaires, Tunis.
- [6] Lebrun, R. (1983). *Étude de la stabilité d'un talus en remblai*. Mémoire de fin d'études, École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), Lyon.
- [7] Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 700 p.
- [8] Casagli, N., & Fanti, R. (2012). *Remote Sensing Techniques for Landslide Monitoring*. In: Clague, J., Stead, D. (Eds.), *Landslide Science and Practice, Volume 1: Fundamentals, Mapping and Monitoring*. Springer, pp. 115–122.
- [9] Fall, M. (1997). *Modélisation numérique des glissements de terrain*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada.
- [10] Wang, Y., et al. (2022). *Deep learning for geotechnical engineering: A state-of-the-art review*. *Underground Space*, 7(2), 143–162.
- [11] Box, G.E.P., & Wilson, K.B. (1951). *On the Experimental Attainment of Optimum Conditions*. *Journal of the Royal Statistical Society*.

Bibliographie

- [12] Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of Landslides*. Geological Society of America.
- [13] Fellenius, W. (1936). *Calculation of the Stability of Earth Dams*. Transactions of the Royal Swedish Geotechnical Institute.
- [14] Janbu, N. (1954). *Stability Analysis of Slopes with Dimensionless Parameters*. Harvard Soil Mechanics Series.
- [15] Bishop, A.W. (1955). *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Géotechnique.
- [16] Hutchinson, J.N. (1968). *Mass Movement*. Geological Society, London.
- [17] Morgenstern, N.R., & Price, V.E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, 15(1), 79-93.
- [18] Spencer, E. (1967). *A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces*. Géotechnique.
- [19] Varnes, D.J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. Transportation Research Board.
- [20] Fredlund, D.G., & Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal, 14(3), 429-439.
- [21] Skempton, A.W. (1985). *Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory*. Géotechnique, 35(1), 3-18.
- [22] Sejnowski, T.J., & Rosenberg, C.R. (1987). *Parallel Networks that Learn to Pronounce English Text*. Complex Systems.
- [23] Cruden, D.M., & Varnes, D.J. (1996). *Landslide Types and Processes*. National Academy Press.
- [24] Turner, A.K., & Schuster, R.L. (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press.
- [25] Bishop, C.M. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.

Bibliographie

- [26] Griffiths, D.V., & Lane, P.A. (1999). *Slope stability analysis by finite elements*. Géotechnique, 49(3), 387-403.
- [27] Dawson, E.M., Roth, W.H., & Drescher, A. (1999). *Slope stability analysis by strength reduction*. Géotechnique, 49(6), 835-840.
- [28] Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall.
- [29] Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer.
- [30] Duncan, J.M., & Wright, S.G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- [31] James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning*. Springer.
- [32] Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). *The Varnes classification of landslide types, an update*. Landslides, 11(2), 167-194.
- [33] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). *Deep learning*. Nature, 521(7553), 436-444.
- [34] Myers, R.H., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley.
- [35] Montgomery, D.C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley.
- [36] Abiodun, O.I., et al. (2018). *State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey*. Heliyon, 4(11), e00938.
- [37] Li, X., et al. (2020). *Response surface methodology for optimization in geotechnical engineering: Recent applications*. Geoscience Frontiers, 11(3), 925-936.
- [38] Zhang, W., et al. (2021). *Machine learning in slope stability assessment: A review*. Landslides, 18(4), 1523-1542.