

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En : Génie civil**

**Spécialité : Géotechnique**

**Par : TAOURITE SANA**

**Sujet**

**Analyse de la stabilité des falaises à l'aide de méthodes numériques, cas d'étude : Oran**

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

BEDJAOUI M.	Maitre-assistant	Université de Tlemcen	Président
SMAIL N.	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
EL HOUARI N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Encadrante
REDOUANE M. A.	Ingénieur	CTC Oran	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024 /2025

## Dédicaces

Je dédie ce travail  
A ce cœur chaud qui m'a toujours porté  
A celle qui a veillé tard, qui m'a entouré de ses prières sincères  
A celle qui mérite tout l'amour, toute la gratitude et tout le respect  
A ma mère  
A mon père  
Mon appui, ma force, la source de mon énergie  
A mon frère Mohamed  
Mon compagnon de route, mon deuxième regard, celui qui voit ce que je ne vois pas  
A mes sœurs Karima, Hanane et Farida  
Mon refuge, ma paix, ma chaleur  
Votre présence dans ma vie est un trésor  
À mes neveux et nièces Alae, Aness, Arine, Razane, Amir et mimi  
Abdelhafid et Meriem  
La plus grande chance qu'un être humain puisse avoir, c'est une famille  
Celui qui a dit "la seule armée d'un individu, c'est sa famille" avait raison  
Je dédie donc cette réussite à ma seule armée  
À mes amis, mes proches, mes camarades, et ceux que j'aime

Merci pour chaque instant de présence et de soutien  
À tous ceux qui ont croisé ma route pendant ces cinq dernières années  
Ceux que le temps a éloignés et ceux qui sont encore là  
Vous avez tous une part dans cette réussite  
À mes chères amies, qui donnent un sens à la vie.  
Meryem, Ikram  
Merci pour vos cœurs, votre sincérité, votre présence  
Vous avez été la beauté de ce voyage  
A toute la promotion Géotechnique 2024/2025

A tous ceux que nous aimons, un grand merci

*Sana Taourite*

## Remerciements

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à mon encadrante, Mme Nesrine El Houari, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour ses conseils, sa patience, sa disponibilité et pour l'environnement de travail motivant qu'elle m'a offert tout au long de cette expérience. Mes remerciements s'adressent également à Mr Mohammed Adel Redouane, ingénieur au CTC Oran, pour son implication en tant que co-encadrant. Son accompagnement technique, ses remarques constructives et sa disponibilité ont été d'un grand soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également Mr Mohamed Chakib Bedjaoui, Maître assistant à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce jury.

J'exprime ma gratitude à Mme Nadia Smail, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je remercie chaleureusement les ingénieurs ainsi que le directeur du laboratoire Sigma à Oran, notamment Mr Yasser Belabbes, pour ses conseils pertinents et les informations précieuses qui ont enrichi mon travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire.

**Merci à tous**

## Résumé

Ce mémoire de master porte sur l'analyse de la stabilité des falaises et la proposition de solutions de stabilisation adaptées aux conditions géotechniques locales. La première partie présente une revue bibliographique sur les caractéristiques des falaises, les mécanismes d'instabilité et les méthodes courantes de stabilisation. La seconde partie est consacrée à une étude de cas d'une falaise située à Oran, dans le cadre d'un projet de construction d'un immeuble R+35 comprenant quatre niveaux de sous-sol en tête de falaise, nécessitant une excavation profonde jusqu'à 25 m et la mise en place d'un radier de fondation. L'analyse de stabilité est menée à l'aide de deux approches complémentaires : une modélisation numérique avec le logiciel PLAXIS 2D, basé sur la méthode des éléments finis, et une méthode analytique via le logiciel GEO5 basé sur des méthodes de l'équilibre limite. La confrontation des deux outils montre que la méthode des éléments finis offre une modélisation plus précise, mais demande un temps de calcul élevé, un bon calibrage et une expertise technique, tandis que GEO5 est plus rapide et accessible, particulièrement utile en phase de diagnostic ou pour des vérifications croisées. Les résultats montrent que l'utilisation conjointe des deux approches permet une évaluation plus fiable de la stabilité de la pente, en croisant les résultats d'une modélisation détaillée avec ceux des méthodes classiques. Cette complémentarité renforce la robustesse des analyses et optimise la conception des mesures de stabilisation.

**Mots clés** : Falaise, stabilité, MEF, MEL, Falaise, stabilité, PLAXIS, GEO5, soutènement.

## ABSTRACT

This master's dissertation focuses on the analysis of cliff stability and the proposal of stabilization solutions adapted to local geotechnical conditions. The first part presents a literature review covering the characteristics of cliffs, instability mechanisms, and commonly used stabilization methods. The second part is dedicated to a case study of a cliff located in Oran, as part of a construction project for a 35-story building (R+35) with four basement levels situated at the top of the cliff. This project requires a deep excavation up to 25 meters and the installation of a general foundation raft. Stability analysis is carried out using two complementary approaches: numerical modeling with PLAXIS 2D software, based on the finite element method (FEM), and an analytical approach using GEO5 software, based on limit equilibrium methods (LEM). The comparison between both tools shows that FEM offers more precise modeling but demands high computation time, proper calibration, and technical expertise, while GEO5 is faster and more accessible, particularly useful during the diagnostic phase or for verification. Results show that the combined use of both approaches provides a more reliable evaluation of slope stability by comparing detailed modeling with classical methods. This combination strengthens the robustness of the analysis and improves the design of stabilization measures.

**Keywords:** Cliff, stability, FEM, LEM, cliff, stability, PLAXIS, GEO5, support.

## ملخص:

تتناول هذه المذكرة دراسة تحليلية لاستقرار المنحدرات الصخرية (المنحدرات الساحلية) واقتراح حلول تدعيم مناسبة تتماشى مع الظروف الجيوتهكنيكية المحلية. يتضمن الجزء الأول مراجعةً نظريةً لخصائص المنحدرات، وآليات عدم الاستقرار، والطرق التقليدية المتبعة في أعمال التثبيت والدعم. أما الجزء الثاني فيتمثل في دراسة حالة لمنحدر طبيعي يقع بمدينة وهران، في إطار مشروع تشييد مبنى سكني مكون من 35 طابقاً (R+35)، يشتمل على أربعة طوابق تحت الأرض تقع مباشرة في أعلى المنحدر، مما يتطلب إجراء حفريات عميقة تصل إلى 25 متراً، وإنجاز حصيرة أساس (radier) تم إجراء تحليل الاستقرار بالاعتماد على مقاربتين مكملتين: الأولى تعتمد على النمذجة العددية باستخدام برنامج PLAXIS 2D المبني على طريقة العناصر المحدودة (MEF)، والذي يسمح بمحاكاة دقيقة لسلوك التربة وتأثيرات الحفر. والثانية تعتمد على التحليل التحليلي باستخدام برنامج GEO5 المعتمد على طرق التوازن الحدي (MEL)، والذي يتميز بالسرعة وسهولة الاستخدام، خاصة في المراحل الأولية من الدراسة أو في عمليات التحقق والمقارنة. أظهرت المقارنة بين الطريقتين أن طريقة العناصر المحدودة توفر تمثيلاً أدق وأكثر تفصيلاً للواقع الجيوتهكنيكي، لكنها تتطلب وقتاً أطول في الحساب ومعايرة دقيقة وخبرة فنية عالية. في المقابل، تتميز طريقة التوازن الحدي بالبساطة والسرعة، مما يجعلها مناسبة لأغراض التشخيص السريع والتحقق المتقاطع. وقد أظهرت النتائج أن الدمج بين الطريقتين يوفر تقييماً أكثر موثوقية لاستقرار المنحدر، من خلال التقاطع بين نتائج النمذجة التفصيلية والطرق الكلاسيكية، مما يعزز من موثوقية التحاليل ويساهم في تحسين تصميم حلول التدعيم بشكل فعال وآمن.

**الكلمات المفتاحية:** منحدر صخري، الاستقرار، طريقة العناصر المحدودة، طريقة التوازن الحدي، PLAXIS، GEO5، التدعيم، الحفر العميق.

# Listes des figures et tableaux

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> Profilage d'une falaise	22
<b>Figure 1.2</b> System de drainage	23
<b>Figure 1.3</b> Technique de boulonnage	23
<b>Figure 1.4</b> Contrefort en béton	24
<b>Figure 1.5</b> bande d'encrochement	24
<b>Figure 1.6</b> Géogrille renforcée (Oran)	25
<b>Figure 1.7</b> filet épinglé	25
<b>Figure 1.8</b> sable au pied de la falaise	25
<b>Figure 1.9</b> la purge d'une falaise	26
<b>Figure 1.10</b> végétalisation d'une falaise	27
<b>Figure 1.11</b> schéma représentative de l'effet de végétalisation a la stabilité de Falaise	27
<b>Figure 1.12</b> Mur de soutènement	28

## Chapitre 2

<b>Figure 2.1</b> Forme de la surface de glissement	32
<b>Figure 2.2</b> surface de glissement circulaire	32
<b>Figure 2.3</b> Recherche avec un rayon constant	34
<b>Figure 2.4</b> Recherche avec des cercles à travers un point commun	34
<b>Figure 2.5</b> Recherche avec des cercles tangents à une ligne tangente prescrite	34
<b>Figure 2.6</b> schéma de Calcul du facteur de sécurité d'une tranche	39
<b>Figure 2.7</b> Forces agissant sur une tranche pour la méthode de Bishop simplifiée	42
<b>Figure 2.8</b> Schéma statique – Méthode Spencer	44
<b>Figure 2.9</b> Schéma statique – Méthode Janbu	45
<b>Figure 2.10</b> Schéma statique – Méthode Morgenstern-Price	47
<b>Figure 2.11</b> Schéma statique – Méthode de Sarma	49

<b>Figure 2.12</b> Etude de la stabilité d'un talus (Plaxis 2D)	52
---	----

### **Chapitre 3**

<b>Figure 3.1</b> Plane de situation de la falaise	60
--	----

<b>Figure 3.2</b> Extrait de la carte géologique de l'Algérie Nord-Ouest 1/500.000	61
--	----

<b>Figure 3.3.</b> Photos de terrain	62
--------------------------------------	----

<b>Figure 3.4</b> Emplacement du site du projet (Google Earth)	62
--	----

<b>Figure 3.5</b> Principales terrains trouvés sur le site (E.U.R.L- L.E.G))	63
--	----

<b>Figure 3.6</b> Positionnement des sondages (E.U.R.L- L.E.G))	64
---	----

<b>Figure 3.7</b> Coupe AA (Rapport du Laboratoire des Études Géotechniques (E.U.R.L- L.E.G))	64
---	----

<b>Figure 3.8</b> Rapport du sondage (S1) (Laboratoire des Études Géotechniques (E.U.R.L- L.E.G))	65
---	----

<b>Figure 3.9</b> Modèle numérique retenu pour les simulations	68
--	----

<b>Figure 3.10</b> Maillage de model - Plaxis 2D	71
--	----

<b>Figure 3.11</b> Stabilité de la falaise sous son propre poids- Plaxis 2D Cercle de glissement- Coefficient de sécurité	72
---	----

<b>Figure 3.12</b> Stabilité de la falaise : Béton Projeté -Plaxis 2D Cercle de glissement- Coefficient de sécurité	73
---	----

<b>Figure 3.13</b> Solutions de stabilisation : Béton Projeté et Tirants d'ancrage- Plaxis 2D Cercle de glissement- Coefficient de sécurité	75
---	----

<b>Figure 3.14</b> Tassement au niveau de fouille- Plaxis 2D	76
--	----

<b>Figure 3.15</b> Tassement causé par la réalisation de l'immeuble	77
---	----

<b>Figure 3.16</b> Stabilité de la falaise sous son propre poids- Geo5 Cercle de glissement	78
---	----

<b>Figure 3.17</b> Solutions de stabilisation : Tirants d'ancrage- Geo5 Cercle de glissement	80
--	----

<b>Figure 3.18</b> Solutions de stabilisation après : Tirants d'ancrage- Geo5 Cercle de glissement- Coefficient de sécurité	81
---	----

<b>Figure 3.19</b> cercle de glissement dans la phase de surcharge de bâtiment	81
--	----

## **Chapitre 1**

<b>Tableau 1.1</b> les mouvements de terrain	12
<b>Tableau 1.2</b> le facteur de sécurité correspondant à l'état de l'ouvrage	13

## **Chapitre 2**

<b>Tableau 2.1</b> Tableau récapitulatif du calcul du facteur de sécurité selon Fellenius	40
<b>Tableau 2.2</b> Inconnues et équations pour la méthode simplifiée de Bishop	42
<b>Tableau 2.3</b> Distribution du nombre d'éléments pour différentes grosseurs de maillage pour FEM 2D et 3D	57
<b>Tableau 2.4</b> Valeur FS générée à partir de calculs numériques par PLAXIS 2D et PLAXIS 3D	57

## **Chapitre 3**

<b>Tableau 3.1</b> Caractéristique des couches (S1) (Laboratoire des Études Géotechniques (E.U.R.L- L.E.G))	70
<b>Tableau 3.2</b> Vérification de la stabilité (selon plusieurs méthodes)	78
<b>Tableau 3.3</b> Vérification de la stabilité de la pente	80
<b>Tableau 3.4</b> étude comparative entre FS après et avant surcharge	82
<b>Tableau 3.5</b> Etude comparative avant stabilisation: Plaxis 2D vs Geo5	82
<b>Tableau 3.6</b> Etude comparative après stabilisation	83

# TABLE DES MATIERES

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Liste des figures et tableaux	VI
Table des matières	IX
Chapitre 1 Synthèse bibliographique sur les falaises	
1.1 Introduction	3
1.2 Types des falaises	4
1.3 Mouvements de terrain	5
1.3.1 Les mouvements lents et continus	5
1.3.1.1 Les affaissements	5
1.3.1.2 Les tassements	6
1.3.1.3 Le fluage du terrain	6
1.3.1.4 Les solifluxions	6
1.3.1.5 Les glissements de terrain	7
a Glissement rotationnel (circulaire)	7
b Glissement plan	8
c Glissement en coin (dièdre)	8
d Basculement (toppling)	8
1.3.2 Les mouvements rapides et discontinus	8
1.3.2.1 Les effondrements	8
1.3.2.2 Les chutes de pierres ou de blocs	9
1.3.2.3 Les éboulements ou écroulements	10

1.3.2.4	Les coulées boueuses	11
1.3.2.5	Les laves torrentielles	11
1.4	Facteur affectante la stabilité des pentes	13
1.4.1	Géométrie des pentes	13
1.4.2	Lithologie	14
1.4.3	Eaux souterraines	14
1.4.4	Méthode et équipement d'exploitation minière	15
1.4.5	Forces dynamiques	15
1.4.6	Angle de frottement interne	16
1.4.7	Cohésion	16
1.5	Instrumentation pour la surveillance des glissements de terrain	17
1.5.1	Niveaux d'eau	17
1.5.2	Mesure de déplacement et mouvement	17
1.5.2.1	Inclinomètres et inclinomètres en place	18
1.5.2.2	Extensomètres	18
1.5.2.3	Réflexométrie temporelle (TDR)	19
1.6	Technique de stabilisation et d'amélioration des falaises instable	20
1.6.1	Remodelage et profilage des falaises	22
1.6.2	Drainage des falaises	22
1.6.3	Boulonnage	23
1.6.4	Contreforts en béton et bandes d'enrochement	24
1.6.5	Géogrille renforcée et filet épinglé	24
1.6.6	Rechargement de la bande littorale	25
1.6.7	Purges	26
1.6.8	Re-végétalisation	27
1.6.9	Le soutènement	27

1.7 Conclusion	28
Chapitre 2 Méthodes d'analyse de la stabilité des pentes	
2.1 Introduction	29
2.2 Méthode d'équilibre limites	30
2.3 Forme de la surface de glissements	31
2.3.1 Surfaces de glissements circulaires	32
2.3.2 Surfaces de glissements triangulaires	35
2.4 Méthode des tranches	36
2.4.1 Méthode de Fellenius	38
2.4.2 Méthode de bishop simplifiée (1955)	40
2.4.2.1 Limitations	42
2.4.2.2 Recommandation d'utilisation	43
2.4.3 Méthode de Spencer	43
2.4.4 Méthode de Janbu	45
2.4.5 Méthode de Morgenstern-Price	47
2.4.6 Méthode de Sarma	48
2.5 Méthode des éléments finis (MEF)	50
2.5.1 Méthode des éléments finis pour l'analyse de la stabilité des pentes	53
2.5.2 avantages de la methode des éléments finis	54
2.5.3 Limites de la méthode des elements finis	55
2.6 Conclusion	58
Chapitre 3 Analyse de la stabilité d'une falaise-Cas d'étude Oran	
3.1 Introduction	59
3.2 Présentation de site du projet d'étude	60
3.2.1 Contexte géologique du site	60
3.2.2 Description géotechnique et conditions du site	63

3.3	Methodologie d'analyse -approche numerique et analytique	66
3.3.1	Conditions de chargement	67
3.3.2	Modèle de comportement du sol	67
3.4	Presentation du modele retenu pour les analyse	68
3.5	Implementation nemerique dans Plaxis-2D pour l'analyse du site	71
3.5.1	Discrétisation et maillage	71
3.5.2	Analyse de la stabilité de la falaise sous son propre poids	71
3.6	Technique de stabilisation de la falaise-Plaxis-2D	72
3.6.1	Béton projeté seule	72
3.6.2	Tirants d'ancrages avec béton projeté	73
3.6.3	Realisation de limmeuble de R+35 -plaxis 2D	75
3.7	Analyse numerique de la falaise a l'aide du logiciel GEO5- Slope Stability	77
3.7.1	Analyse de la stabilité de la falaise sous son propre poids	77
3.7.2	Technique de stabilisation de la falaise- Geo5	79
3.7.3	Réalisation de l'immeuble de R+35- Geo5	81
3.8	Etude comparative entre les deux logiciels -Plaxis 2D vs GEO5	82
3.9	Conclusion	84
	Conclusion générale	85
	Bibliographie	87

## INTRODUCTION GENERALE

Les falaises, éléments naturels fragiles souvent exposés à divers phénomènes d'instabilité, représentent un enjeu majeur en génie civil et géotechnique, notamment dans les zones urbaines où leur stabilité conditionne la sécurité des infrastructures et des populations. Comprendre les mécanismes qui influencent leur stabilité et maîtriser les techniques de stabilisation sont donc indispensables pour prévenir les risques liés aux glissements et effondrements.

Ce mémoire de master s'inscrit dans cette problématique et propose une évaluation approfondie de la stabilité d'une falaise côtière, à travers une double approche : analytique et numérique. L'étude repose sur la comparaison entre deux outils largement utilisés : le logiciel GEO5, fondé sur les méthodes classiques d'équilibre limite (Bishop, Janbu, Fellenius...), et PLAXIS 2D, basé sur la méthode des éléments finis (MEF), permettant une représentation plus détaillée du comportement des sols.

Le cas d'étude se situe à Oran, au niveau de la Cité Ibn Rochd – lieu-dit Les Falaises, où est prévu un projet de construction d'un immeuble de type R+35 avec quatre niveaux de sous-sol, nécessitant une excavation profonde de 25 m et la mise en place d'un radier en tête de falaise. Cette configuration impose des sollicitations importantes sur le terrain naturel, rendant indispensable une analyse rigoureuse de la stabilité.

La falaise étudiée, d'environ 80 m de hauteur, est typique des formations façonnées par l'érosion marine et les processus géomorphologiques. Sa stabilité dépend de nombreux paramètres : propriétés mécaniques des terrains, réseau de fractures, infiltration d'eau, climat local, etc. L'objectif est d'évaluer les risques d'instabilité dans ce contexte et de proposer des mesures de renforcement adaptées. À travers cette analyse, ce mémoire entend également contribuer à l'enrichissement des pratiques de stabilisation des pentes dans les zones côtières à forte urbanisation.

La confrontation entre les deux méthodes révèle que PLAXIS 2D, bien qu'exigeant en termes de temps de calcul et de paramétrage, permet une modélisation fine des interactions sol-structure. À l'inverse, GEO5 se distingue par sa rapidité et son accessibilité, utile pour les études préliminaires ou les vérifications croisées. L'usage combiné de ces deux approches offre une vision plus complète et fiable de la stabilité de la pente, renforçant la pertinence des choix techniques. Cette complémentarité constitue une base méthodologique pouvant être adaptée à d'autres sites présentant des contraintes géotechniques similaires.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

Le premier présente les falaises, les types de mouvements de terrain, les facteurs d'instabilité, les techniques de stabilisation et les outils de surveillance. Le deuxième détaille les méthodes analytiques et numériques utilisées, leurs principes, avantages et limites.

Le troisième applique ces méthodes au cas de la falaise d'Oran, en intégrant les données géotechniques disponibles, les résultats des simulations et une analyse comparative, menant à des recommandations de stabilisation adaptées.

En somme, ce mémoire vise à fournir une méthode d'analyse rigoureuse de la stabilité des falaises, à identifier l'approche la plus fiable selon les conditions locales, et à contribuer à la sécurisation durable des sites sensibles comme celui étudié à Oran. Il s'inscrit également dans une perspective plus large de gestion des risques et d'aménagement sécurisé des zones côtières à enjeux.

Le travail se termine par une conclusion générale qui résume les objectifs, les résultats, les limites de l'étude et les recommandations pour la gestion future des risques et des perspectives.

## Chapitre 1

# ***SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES FALAISES***

### **1.1 Introduction**

Les falaises sont des formations côtières résultant de l'érosion marine. Elles se forment lorsque la mer attaque un relief continental, qu'il s'agisse de montagnes, de plateaux ou de collines. On les trouve à toutes les latitudes, mais elles sont moins fréquentes dans les régions chaudes et humides, où l'érosion terrestre domine. Elles sont particulièrement développées le long des côtes montagneuses de l'océan Pacifique, où la subduction des plaques lithosphériques crée des reliefs escarpés exposés à de fortes houles.

Dans ce chapitre, nous avons défini ce qu'est une falaise ainsi que ses différents types. Nous avons également étudié les risques qui les menacent et leurs conséquences. Ces risques, souvent d'origine naturelle, sont généralement liés à des phénomènes annexes pouvant affecter l'homme et l'environnement. Nous avons aussi analysé les principaux

facteurs influençant la stabilité des pentes. Enfin, les méthodes les plus couramment utilisées pour leur stabilisation ont été présentées.

## 1.2 Type de falaises

On distingue de nombreux types de falaises selon leur évolution :

1. Falaises vives : Ces falaises sont instables et sont fréquemment battues par la mer.
2. Falaises stabilisées : elles sont créées grâce à une protection naturelle ou à une modification du trait de côte, l'érosion a diminué.
3. Falaise morte : elles ne sont plus atteintes par les vagues et ne reculent plus.

La hauteur des falaises varie de manière significative. Certaines microfalaises mesurent seulement quelques dizaines de centimètres, tandis que les hautes falaises atteignent entre 100 et 500 m. Certaines falaises dépassent même ces hauteurs.[1]

La base d'une falaise correspond à la limite de progression de la plate-forme d'abrasion, souvent marquée par une encoche ou des grottes creusées par les vagues. Ces formations indiquent l'endroit où les matériaux abrasifs déplacés par la mer cessent leur action.

La falaise évolue principalement par des écroulements successifs, tandis que la mer se charge d'évacuer les débris accumulés au pied de la falaise. Bien que l'érosion marine joue un rôle déterminant, d'autres facteurs influencent la morphologie des falaises. Les embruns altèrent notamment les roches calcaires et basaltiques, et dans certaines zones exposées, les vagues projettent des galets à des hauteurs impressionnantes.

Toutes les falaises ne sont pas verticales. Leur pente dépend des caractéristiques des matériaux qui les composent. Les falaises de sable, par exemple, perdent rapidement leur verticalité après un effondrement et adoptent une pente plus douce, tandis que les falaises de craie conservent des parois dures plus longtemps.

La gravité reste le principal moteur des écroulements, mais elle est influencée par d'autres processus, comme le gel, l'altération chimique, la dissolution et le ruissellement. La cohésion de la roche retarde souvent l'effondrement, ce qui maintient certaines falaises dans un état d'instabilité permanent.

Lorsque l'encoche à la base recule plus vite que le reste du versant, la falaise continue de s'effondrer et de reculer au fil du temps. Une falaise est une structure en perpétuel changement : si elle cessait de reculer, elle perdrait sa forme abrupte et deviendrait un simple versant terrestre.[2]

### **1.3 Mouvements de terrain**

Nous pouvons définir un mouvement de terrain comme un type de déplacement de masse où les matériaux formant des pentes, tels que le sol, la roche ou le remblai artificiel, se déplacent vers le bas ou vers l'extérieur, se détachant d'une couche sous-jacente plus stable [3], on peut noter deux types de mouvements de terrain sont :

#### **1.3.1 Mouvements lents et continus**

Les mouvements lents et continus de terrains se traduisent par des déformations progressives du sol ou du sous-sol. Moins visibles que les mouvements rapides, ils peuvent toutefois compromettre la stabilité des infrastructures et exiger une surveillance rigoureuse.

##### **1.3.1.1 Les affaissements**

L'affaissement est un phénomène géologique progressif qui se traduit par un enfoncement lent du sol, généralement sans rupture brutale. [4]

L'affaissement peut également résulter d'événements naturels tels que les tremblements de terre, le compactage des sols, l'équilibre de pression glaciaire, l'érosion, la formation de dolines et l'apport d'eau aux sols meubles par le vent (un processus naturel appelé

dépôt de lœss). Il peut se produire sur de très vastes zones, comme des États ou des provinces entiers, ou sur de très petites superficies.[5]

#### **1.3.1.2 Les tassements**

Le tassement du sol correspond à une déformation verticale provoquée par l'application de charges extérieures telles que les remblais, les fondations ou le poids propre du sol. Il se distingue de la compaction du sol, qui peut résulter de phénomènes naturels comme les pluies intenses ou d'actions humaines telles que le piétinement excessif et le passage répété de machines agricoles.[6]

#### **1.3.1.3 Le fluage du terrain**

Comme nous le savons, le type de mouvement de masse le plus lent est le fluage du sol. Il se produit lorsque la gravité tire progressivement le sol vers le bas au fil du temps.

Nous définissons le fluage du sol comme une forme de mouvement de masse, un type d'érosion dans lequel le sol, les roches et les matériaux de surface se déplacent vers le bas de la pente sous l'effet de la gravité.

Plusieurs conditions influencent le fluage du sol. La première est la pente : la pente doit être suffisamment raide pour que la gravité agisse, les pentes plus raides entraînant un mouvement plus rapide. L'humidité du sol joue également un rôle, car l'eau agit comme un lubrifiant, augmentant le mouvement. D'autres facteurs, tels que les variations de température et la végétation, peuvent également y contribuer.[7]

#### **1.3.1.4 Les solifluxions**

La solifluxion désigne un écoulement lent et visqueux de sols saturés en eau, généralement compris entre 0,5 et 5 cm par an. Ce phénomène se manifeste principalement en haute altitude, dans des régions où un sol gelé temporairement ou de façon saisonnière empêche l'infiltration de l'eau, créant une barrière à la percolation. Il résulte de cycles de gel et de dégel successifs, qui fragmentent et liquéfient la couche superficielle du sol.

L'eau de fonte issue de la neige et de la glace intensifie ce déplacement. Bien que parfois assimilée au fluage du sol, la solifluxion s'en distingue par une vitesse généralement plus élevée. Si son usage a été élargi aux régions tempérées et tropicales, elle demeure plus caractéristique des environnements périglaciaires.[8]

#### **1.3.1.5 Les glissements de terrain**

Les glissements de terrain font partie des risques naturels les plus fréquents, affectant toutes les régions du monde. Chaque année, ils causent des destructions importantes, tant humaines que matérielles. Ils touchent aussi bien des pentes naturelles que des constructions humaines, telles que les digues, barrages ou remblais.

Les glissements de terrain sont des déplacements gravitaires de masses de sol, dont le volume varie de quelques dizaines de m<sup>3</sup> à plusieurs millions de m<sup>3</sup>. Leur épaisseur peut aller de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, et leur surface peut couvrir plusieurs km<sup>2</sup>.

On observe donc une grande diversité de glissements, du plus petit, qui peut fermer une route, au plus grand, qui peut transformer entièrement un paysage. Ces mouvements peuvent se produire sur terre ou sous l'eau. Des traces de glissements ont également été retrouvées sur Mars[9] [10].

Les glissements de terrain s'expriment sous différentes formes, chacune caractérisée par des mécanismes spécifiques de déplacement des masses terrestres. Voici les principaux types :

##### **a. Glissement rotationnel (circulaire)**

Le glissement rotationnel, généralement rencontré dans des pentes de sol meubles. Toutefois, une pente rocheuse peut connaître ce type d'instabilité lorsque la roche est extrêmement fracturée.

**b. Glissement plan**

Dans ce cas, le mouvement se fait le long d'un plan de faiblesse préexistant, tel qu'un joint de stratification, une faille ou une interface entre deux couches géologiques distinctes. Le glissement plan est fréquent dans les terrains où des discontinuités géologiques offrent une surface de glissement favorable.

**c. Glissement en coin (dièdre)**

Le glissement dièdre, le long de la ligne d'intersection de deux plans, qui est un mécanisme fréquent dans tous les types de roches.

**d. Basculement (Toppling)**

Comme son nom l'indique, un basculement est un type de glissement de terrain où les roches, la terre ou les débris pivotent vers l'avant, s'éloignant de la pente et basculent vers le bas. En conditions normales, la rotation se produit autour d'un axe situé au bas de la pente ou à proximité.

**1.3.2 Les mouvements rapides et discontinus****1.3.2.1 Les effondrements**

Les effondrements sont des déplacements verticaux soudains du sol causé par la rupture de cavités souterraines naturelles ou artificielles, entraînant la formation de dépressions en surface. Ce phénomène résulte de la perte de résistance mécanique du toit des cavités, aggravée par des processus tels que la dissolution des roches solubles, l'érosion interne des sols ou l'affaissement d'anciennes excavations.

Les facteurs déclenchants incluent les fortes précipitations, la circulation d'eau souterraine, la variation du niveau des nappes phréatiques et les activités humaines comme les travaux de construction ou les pompages excessifs. Les conséquences peuvent être graves, allant de la destruction d'infrastructures et de la modification du paysage à des risques directs pour la population. La prévention repose sur la cartographie des zones

à risque, la surveillance hydrogéologique, le renforcement des sols par injection de coulis et l'application de réglementations strictes pour limiter l'impact des activités humaines.

Les processus naturels, comme la dissolution des roches du sous-sol, ou les activités humaines, comme l'exploitation de carrières et la construction souterraine, peuvent fragiliser les toits des cavités. Lorsqu'ils s'effondrent, ils créent une dépression circulaire à la surface.

Les effondrements se produisent lorsque les supports ou le toit d'une cavité souterraine cèdent. Cette rupture se propage vers le haut, formant un gouffre – une excavation grossièrement cylindrique de moins de dix mètres de diamètre.[11] (Glissement par modélisation)

#### ***1.3.2.2 Les chutes de pierres ou de blocs***

Ce sont des phénomènes rapides et brutaux qui mobilisent des blocs de roches plus ou moins homogènes. Ils consistent en la chute libre ou le roulement au départ, après rupture, de blocs formés par fragmentation, le mouvement pouvant ensuite se poursuivre par une série de rebonds de hauteur décroissante (dans le cas d'une pente régulière). L'ampleur du phénomène est liée à la quantité et au volume de blocs mobilisables et à la surface et la topographie de l'aire de réception des blocs éboulés .[12]

Les chutes de blocs font partie des processus de chute, qui incluent aussi les pierres, les blocs de roche ou même les masses de glace en mouvement. Ces éléments peuvent se déplacer de quelques centimètres à plusieurs mètres et affecter des zones localisées, menaçant des personnes ou des infrastructures. L'évaluation du risque repose principalement sur le volume de roches observé dans la zone affectée.

Les chutes de blocs se classent en plusieurs catégories :

- Chutes de pierres (volume inférieur à 1 dm<sup>3</sup>)
- Chutes de blocs (volume supérieur à 1 dm<sup>3</sup>)

- Éboulements (volume supérieur à 100 m<sup>3</sup>)
- Écroulements massifs (volume atteignant plusieurs millions de m<sup>3</sup>)

### **1.3.2.3 Les éboulements ou écroulements**

Un éboulement se produit lorsqu'une masse rocheuse se détache d'une falaise, d'une montagne ou d'une pente et tombe ou glisse vers le bas sous l'effet de la gravité. Il se distingue des autres types de mouvements de terrain tels que les glissements de terrain, les affaissements, les coulées de boue, les effondrements et les avalanches.

Les chutes de pierres peuvent être soudaines et rapides, impliquant d'importants volumes de roche. Plusieurs facteurs contribuent aux éboulements, notamment l'érosion, qui fragilise les structures rocheuses au fil du temps ; l'infiltration d'eau, qui augmente la pression dans les fissures et les failles ; les tremblements de terre, qui génèrent des vibrations qui rompent les liaisons rocheuses ; et les activités humaines comme l'exploitation minière ou la construction, qui déstabilisent les formations rocheuses. [13]

Les éboulements varient selon la nature du terrain, la structure de la roche et le mécanisme de rupture :

**Éboulements de pente** : est un glissement d'une masse rocheuse sur une pente, souvent lié à la présence de failles ou à une saturation en eau.

**Éboulements de falaise** : est une instabilité affectant des parois abruptes, causée par l'érosion et les variations climatiques.

**Éboulements de versant** : est un glissement de matériaux sur une pente plus douce que les falaises, sous l'effet de l'eau ou d'une déstabilisation mécanique.

**Éboulements de roche meuble** : est un effondrement de sédiments ou de graviers sous l'action de l'eau et du vent.

**Éboulements de glace** : détachement de blocs de glace sur les glaciers, dû à la fonte, aux fractures ou aux variations de température.

#### ***1.3.2.4 Les coulées boueuses***

Les coulées de boue se produisent lorsqu'un excès d'eau provoque une érosion rapide des sols sur des pentes raides. Des éléments déclencheurs tels que de fortes pluies ou une fonte rapide des neiges se mélangent au sol, le liquéfiant et provoquant son écoulement vers le bas. Selon leur gravité, les coulées de boue peuvent aller de la boue liquide à une boue épaisse charriant des débris tels que des rochers, des arbres, des véhicules et même des maisons.

Elles causent chaque année de nombreux décès et d'importants dégâts matériels. Les pentes raides, les bas de pente et les canyons sont particulièrement vulnérables, notamment dans les zones aménagées pour la construction d'habitations ou de routes. Les activités humaines et les événements naturels comme les incendies de forêt, qui augmentent l'érosion, augmentent encore le risque de coulées de boue.[14]

#### ***1.3.2.5 Les laves torrentielles***

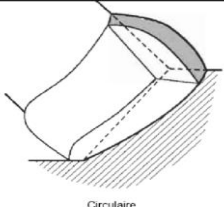
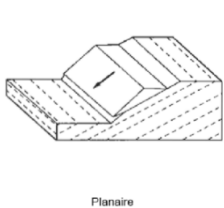
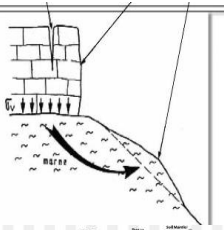
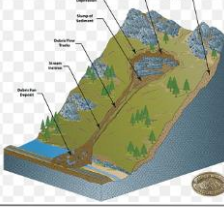
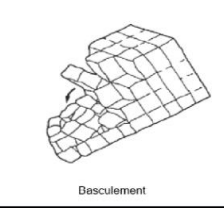
Les laves torrentielles sont des écoulements rapides de mélanges d'eau, de sédiments et de blocs rocheux qui se produisent sur des pentes raides. Elles se forment généralement lors de fortes précipitations ou de la fonte des neiges, mobilisant des matériaux meubles accumulés sur les versants. Leur vitesse peut dépasser 50 km/h, et leur densité élevée leur permet d'entraîner des blocs de plusieurs tonnes.

Ces phénomènes se distinguent par leur déplacement en vagues successives et la formation d'un « front » où s'accumulent les éléments les plus volumineux. Lorsqu'une lave torrentielle atteint un cours d'eau important, elle peut être dispersée sans provoquer de dégâts majeurs.

Les plus grandes laves torrentielles des Alpes ont transporté jusqu'à 500 000 m<sup>3</sup> de matériaux, soit l'équivalent de 40 000 camions. Il est difficile de prévoir précisément leur

déclenchement et leur ampleur, ce qui rend la surveillance des zones à risque essentielle pour limiter les impacts.

**Tableau 1.1** Les mouvements de terrain

	Types	Terrains concernés	Remaniements internes	Vitesse moyenne	Schémas
Glissements de terrains	Glissement circulaire	Roches peu cohérentes : Marnes ; Alluvions ; Moraines	Plutôt faible	Quelques centimètres à quelques mètres par jour	 Circulaire
	Glissement plan			Discontinu (saison)	 Planaire
Coulées	Coulées de solifluxion	Roches meubles	Plutôt fort	Discontinu (saison)	
	Coulées boueuses			Plusieurs mètres par seconde	
Basculement (Toppling)	Fauchage	Roches cohérentes stratifiées ou non	Variable selon le stade	Très lent, quelques cm par an	 Basculement

L'évaluation de la stabilité varie selon le type de glissement de terrain et s'appuie sur des méthodes de calcul développées par les chercheurs. Ces méthodes évaluent l'équilibre de la pente en fonction des valeurs du coefficient de sécurité (CS) présentées dans le tableau 1.2. [15]

**Tableau 1.2** Facteur de sécurité correspondant à l'état de l'ouvrage

Facteur de sécurité (Fs)	État de la pente
$F_s < 1$	Danger
$F_s = 1$	Stabilité limite
$1 \leq F_s \leq 1.25$	Sécurité contestable
$1.25 \leq F_s \leq 1.40$	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants mais sécurité contestable pour les talus des carrières à ciel ouvert.
$F_s > 1.4$	Sécurité satisfaisante

#### 1.4 Facteurs affectant la stabilité des pentes

Étant donné l'importance de la stabilité des pentes, il est essentiel d'identifier les facteurs qui l'influencent, notamment les causes importantes :

##### 1.4.1 Géométrie des pentes

La hauteur, l'angle de pente global et la surface de rupture constituent les principaux paramètres géométriques des pentes. La stabilité des pentes diminue nettement avec l'augmentation de leur hauteur. Le risque de rupture en arrière de la crête croît avec l'angle global de la pente, ce qui exige de prévenir toute déformation du sol dans la zone périphérique de la mine. Dans des conditions normales, un angle global de 45° est considéré comme sûr par la DGMS (*Directorat General of Mines Safety*)

La courbure de la pente exerce également une influence notable sur l'instabilité. Les sections convexes doivent être évitées lors de la conception des pentes, car elles favorisent le glissement. Plus une pente est haute et raide, plus sa stabilité diminue.[16]

#### **1.4.2 La lithologie**

Les matériaux rocheux constituant une falaise influencent directement la résistance de la masse rocheuse, laquelle peut être altérée par la présence de discontinuités, de plissements, de failles, d'anciens travaux ou encore par l'altération naturelle. Une faible résistance se manifeste souvent par des ruptures circulaires, des phénomènes d'effritement ou des chutes de blocs.

Lorsque la falaise est constituée d'alluvions ou de roches altérées en surface, sa résistance au cisaillement est faible, et celle-ci diminue encore davantage en cas d'infiltration d'eau. Dans ce type de configuration, les versants doivent généralement présenter des inclinaisons plus douces afin de garantir une meilleure stabilité.[16]

#### **1.4.3 Eaux souterraines**

La présence d'eau souterraine provoque les altérations suivantes dans les strates :

- Modifie les paramètres de frottement et de cohésion.
- Réduit le stress effectif normal

Cela peut entraîner une augmentation de la poussée ascendante et des forces motrices et a un effet très négatif sur la stabilité des pentes. Les effets physiques et chimiques de l'eau dans les articulations peuvent modifier le frottement et la cohésion de la surface de discontinuité.

L'effet physique réduit la résistance au cisaillement le long d'un plan de défaillance en fournissant un soulèvement sur les articulations et en réduisant la résistance au frottement et donc réduire le stress normal effectif.

#### **1.4.4 Méthode et équipement d'exploitation minière**

L'exploitation à ciel ouvert est la méthode principale utilisée pour créer les pentes ou falaises artificielles en mines.

Cette méthode permet de réduire le temps d'exposition des faces, ce qui améliore la stabilité des pentes. Cependant, plus la hauteur de la pente est importante, plus le risque de rupture par détachement de dalles ou flambement augmente.

De plus, l'équipement installé sur les bancs de la mine augmente la surcharge, ce qui favorise les forces susceptibles de provoquer la rupture. Sur les terrains meubles ou altérés, les ruptures sont souvent de type circulaire.

Cette compréhension est essentielle pour concevoir des falaises artificielles sûres en exploitation minière.

#### **1.4.5 Forces dynamiques**

Le dynamitage augmente les contraintes de cisaillement et l'accélération dynamique, provoquant l'instabilité des pentes et des fractures rocheuses. Des techniques de dynamitage inadaptées augmentent l'angle des talus, ce qui entraîne une instabilité.

Les méthodes de dynamitage doux permettent d'atténuer ces effets sur les petites pentes, tandis que les pentes plus importantes subissent moins de ruptures grâce aux ondes de choc à haute fréquence qui stabilisent les masses rocheuses.

Les événements sismiques à basse fréquence augmentent le risque de glissements de terrain de grande ampleur.

Des facteurs externes tels que la surcharge et la pression des eaux souterraines due au gel contribuent également à l'instabilité des pentes.

#### 1.4.6 Angle de frottement interne

C'est l'angle entre la force normale et la force résultante lorsque la défaillance se produit simplement en raison à la contrainte de cisaillement. La mesure du matériau peut résister à n'importe quelle quantité de contrainte de cisaillement.

Les facteurs sont responsables de la rondeur des particules, de la taille des particules et de la quantité de quartz contenue dans le sol. Un angle de frottement interne plus grand implique que la pente sera plus élevée.

#### 1.4.7 Cohésion

La cohésion est une propriété de la roche qui lui permet de résister à la déformation ou à la rupture sous l'effet de forces. Elle peut également résulter de forces électrostatiques, notamment dans les argiles, ou être liée à la pression capillaire négative et à la pression interstitielle générée lors du chargement.

Les pentes présentant une faible cohésion sont généralement moins stables. Plusieurs facteurs influencent la force de cohésion, notamment :

- La friction
- L'adhérence entre les particules
- La cimentation des grains par des minéraux comme la calcite ou la silice
- Le renforcement artificiel du matériau
- La teneur en eau
- L'expansion ou la contraction répétée due aux cycles de mouillage et de séchage,
- La découpe ou modification de la pente,
- Les vibrations provoquées par les tremblements de terre ou les explosions.

## **1.5 Instrumentation pour la surveillance des glissements de terrain**

Les données critiques requises dans le cadre d'un programme de surveillance des pentes sont les niveaux d'eau dans la pente, la profondeur et la vitesse du mouvement.

### **1.5.1 Niveaux d'eau**

La méthode la plus simple pour surveiller les niveaux d'eau sur une pente consiste à forer et à creuser un forage.

La surface de l'eau peut être déterminée en déposant un ruban à mesurer dans le trou de forage. Bien que cette méthode soit efficace pour la surveillance de base de la nappe phréatique et les évaluations peu fréquentes, des techniques plus avancées peuvent être préférables.

Ces techniques utilisent des instruments plus sophistiqués, qui peuvent être mécaniques ou électriques. [17]

### **1.5.2 Mesure de déplacement et mouvement**

Pour surveiller les mouvements des pentes, plusieurs instruments peuvent être utilisés seuls ou en combinaison : inclinomètres à sonde, inclinomètres « en place », extensomètres et TDR (Time Domain Reflectometry).

Les inclinomètres à sonde requièrent une opération manuelle pour la prise de mesure, tandis que les autres capteurs permettent une lecture électronique.

Ces capteurs électroniques peuvent être reliés à un enregistreur de données, ce qui permet une collecte automatisée des mesures. De plus, ces systèmes peuvent être associés à la télémétrie pour la transmission à distance des données.

Avec une programmation appropriée, ce dispositif peut déclencher des alertes automatiques en cas de détection de mouvements critiques. [17]

### **1.5.2.1 Les inclinomètres et inclinomètres en place**

Les inclinomètres et les inclinomètres « en place » permettent de détecter un nouveau mouvement, d'identifier une accélération des déplacements, ainsi que la direction de ces mouvements.

Les inclinomètres « en place » sont installés dans un forage protégé par un boîtier spécial. Le câblage est souvent enterré et le forage recouvert d'un capuchon verrouillé afin de protéger l'équipement contre le vandalisme.

En revanche, les inclinomètres classiques sont fixés à la surface du sol. Ils représentent une solution adaptée aux sites très pentus, où le forage est difficile, ou lorsque le budget du projet ne permet pas de réaliser un forage.

Ces inclinomètres peuvent également être protégés par un boîtier anti-vandalisme, avec des fils enterrés pour sécuriser davantage l'installation. [17]

### **1.5.2.2 Les extensomètres**

Les extensomètres mécaniques simples utilisent un câble en acier fixé à un point stable sur la face de la pente, à une extrémité, et à un poids monté sur un rail situé en dehors de la zone de glissement, à l'autre extrémité. Lorsque la pente se déplace, elle tire le poids le long d'une piste graduée. La quantité et la vitesse du mouvement peuvent alors être mesurées manuellement.

Ces dispositifs sont peu coûteux, mais il existe un risque de manquer des événements critiques si les mesures ne sont pas effectuées régulièrement. De plus, ils restent vulnérables au vandalisme.

Les extensomètres peuvent aussi fonctionner avec des potentiomètres pour mesurer le déplacement. Fonctionnant comme un rhéostat de train miniature, ils utilisent une résistance variable : un bras mobile établit un contact électrique le long d'une bande de résistance fixe.

La résistance électrique change en fonction de la position du bras, et la tension de sortie, sous un courant continu régulé, correspond à la quantité de déplacement due au mouvement du sol. [17]

### **1.5.2.3 Réflectométrie temporelle (TDR)**

La réflectométrie temporelle (TDR) surveille les mouvements de pente en détectant les déformations des câbles dans les forages. Elle envoie des impulsions électriques qui se réfléchissent lorsqu'elles se déplacent, identifiant ainsi leur localisation et leur amplitude.

Initialement utilisée pour les lignes électriques, son application géotechnique a débuté en 1980. Cette technologie utilise un câble coaxial et un testeur de câble.

Parmi les avantages de la TDR par rapport aux inclinomètres à sonde, on peut citer :

1. Le câble coaxial coûte moins cher que le boîtier de l'inclinomètre.
2. Les relevés TDR prennent plusieurs minutes, tandis que les relevés d'inclinomètre peuvent prendre plus d'une heure.
3. Le câble coaxial peut être étendu jusqu'à un emplacement de lecture pratique hors pente ou loin d'une autoroute.
4. Les relevés TDR peuvent être facilement automatisés.
5. Le mouvement des pentes peut être déterminé immédiatement pendant la collecte des données plutôt que d'attendre que les données soient tracées sur un ordinateur.

La TDR présente également certains inconvénients comme :

1. La TDR ne peut pas déterminer la quantité réelle de mouvement, les quantités relatives peuvent être estimées.
2. La direction du mouvement ne peut pas être déterminée à partir d'une signature TDR.
3. Si de l'eau pénètre dans un câble TDR, elle modifiera les propriétés électriques du câble et peut rendre les signatures difficiles à interpréter.

La TDR peut stocker des données à des fins d'analyse et faire office de piézomètre.

Cependant, en raison d'interférences électriques, elle ne peut pas mesurer les déformations sous la surface de l'eau.[17]

## **1.6 Technique de stabilisation et d'amélioration des falaises instable**

Le choix d'une technique de stabilisation repose sur un processus décisionnel rigoureux, essentiel pour toute étude de cas, notamment dans les zones soumises à une forte érosion côtière.

Cette érosion devient particulièrement préoccupante lorsqu'elle affecte des zones à enjeux, telles que les habitations, infrastructures, routes ou sites patrimoniaux, combinée à l'instabilité des falaises.

Avant de définir une stratégie d'intervention, plusieurs étapes d'analyse sont nécessaires:

- 1 Études préliminaires** : qui inclut des observations de terrain, une synthèse des connaissances existantes, et une évaluation des structures présentes, sur des unités géologiques cohérentes, afin d'identifier les zones vulnérables.
- 2 Diagnostic des dysfonctionnements** : il s'agit d'identification des processus actifs de dégradation.
- 3 Évaluation des aléas** : repérage des agents d'érosion, cartographie et classification du niveau d'aléa.
- 4 Évaluation des enjeux exposés** : analyse des éléments susceptibles d'être affectés dans l'horizon temporel défini, ainsi que du degré de vulnérabilité.
- 5 Proposition de contre-mesures** : prise en compte de leurs impacts, faisabilité technique, coût et durée de vie.

**6 Analyse coûts-avantages** : pour estimer les pertes potentielles, ajuster les investissements et intégrer les objectifs de préservation et ou restauration des écosystèmes.

**7 Analyse multicritère** : évaluation globale de la faisabilité de la solution retenue et de son acceptabilité face au risque.

L'objectif principal des techniques de stabilisation est de garantir la stabilité des falaises, de réduire ou supprimer les risques pesant sur les vies humaines et les infrastructures, et de renforcer globalement la stabilité des pentes, tout en protégeant le pied des falaises contre l'érosion.

Ces techniques se regroupent en deux grandes catégories :

- **Parades actives** : elles visent à prévenir le déclenchement des phénomènes instables, par élimination des masses rocheuses menaçantes, fixation de ces masses ou prévention de leur altération.
- **Parades passives** : elles cherchent à limiter les conséquences d'un phénomène après son déclenchement, en en contrôlant la propagation (par exemple, chutes de blocs).

Ainsi, on distingue deux types d'approches :

- L'une agit activement pour réduire les risques de glissements de terrain et de chutes de blocs.
- L'autre agit passivement pour atténuer les effets de ces phénomènes une fois déclenchés.

Les falaises côtières d'Oran, notamment celles de Mers El-Kébir, présentent des signes évidents d'érosion marine. Cette érosion est accentuée par les conditions climatiques et la nature géologique des roches.

Pour contrer les risques liés à l'érosion, des travaux de confortement ont été entrepris le long de la corniche inférieure d'Oran. Ces interventions incluent l'injection de béton et la mise en place d'ancrages pour stabiliser les parois rocheuses.

### 1.6.1 Remodelage et profilage des falaises

La stabilisation par remodelage consiste à modifier l'angle de pente ou à réduire la hauteur des falaises en éliminant les blocs instables. Des terrasses peuvent parfois être aménagées pour améliorer la stabilité. L'angle de stabilisation dépend du type de roche, de la structure géologique et de la teneur en eau. Cette méthode réduit les mouvements de masse, mais elle n'est pas adaptée aux falaises rocheuses ou très hautes et abruptes (figure 1.1). [18]



**Figure 1.1** Profilage d'une falaise

### 1.6.2 Drainage des falaises

Le drainage vise à éliminer le ruissellement et l'infiltration d'eau sur la pente, en créant notamment des fossés au sommet ou sur la face de la falaise. Il permet aussi de réduire la pression interstitielle en évacuant l'eau vers l'extérieur.

Cette technique convient aux falaises rocheuses exposées à un ruissellement ou à une infiltration modérée. Elle peut aussi s'appliquer aux nappes souterraines lorsque celles-ci

fragilisent la roche, en installant des drains forés ou des tubes perforés sur la pente (figure 1.2).[18]



**Figure 1.2** System de drainage

### 1.6.3 Boulonnage

Cette technique consiste à fixer des roches instables afin d'en accroître la cohésion et la stabilité et d'empêcher les glissements, à l'aide de boulons métalliques, de tirants et de clous en acier enfoncés horizontalement dans la falaise. Elle prévient les mouvements de masse tels que les éboulements et les effondrements, réduisant ainsi les taux d'érosion nette (figure 1.3). [18]



**Figure 1.3** Technique de boulonnage

#### 1.6.4 Contreforts en béton et bandes d'enrochement

Cette technique consiste à installer des appuis en béton armé sur des zones rocheuses en contre-dépouille ou à la base des falaises. Des bandes d'enrochement, composées de blocs de pierre ou de béton, sont également placées au pied de la falaise pour limiter l'érosion marine. Elle est particulièrement adaptée aux falaises rocheuses de petite à moyenne dimension (figures 1.4 et 1.5). [18]



Figure 1.4 Contrefort en béton



Figure 1.5 Bande d'enrochement

#### 1.6.5 Géogridle renforcée et filet épinglé

Cette méthode consiste à utiliser des géogridles en polymère renforcé, fixées par des ancrages latéraux, ou à enrouler des blocs instables à l'aide de filets ou de grilles installés sur la paroi. Les géogridles conviennent aux falaises tendres et de faible hauteur pour prévenir les glissements de terrain, tandis que les filets sont adaptés aux falaises rocheuses présentant une instabilité localisée (figures 1.6 et 1.7). [18]



Figure 1.6 Géogrille renforcée (Oran)



Figure 1.7 Filet épinglé

### 1.6.6 Rechargement de la bande littorale

Cette technique consiste à déposer du sable ou des galets au pied de la falaise pour compenser l'érosion marine et rétablir l'équilibre sédimentaire. Elle s'apparente au rechargement des plages et s'applique aux zones où le transport littoral naturel est insuffisant (figure 1.8). [18]

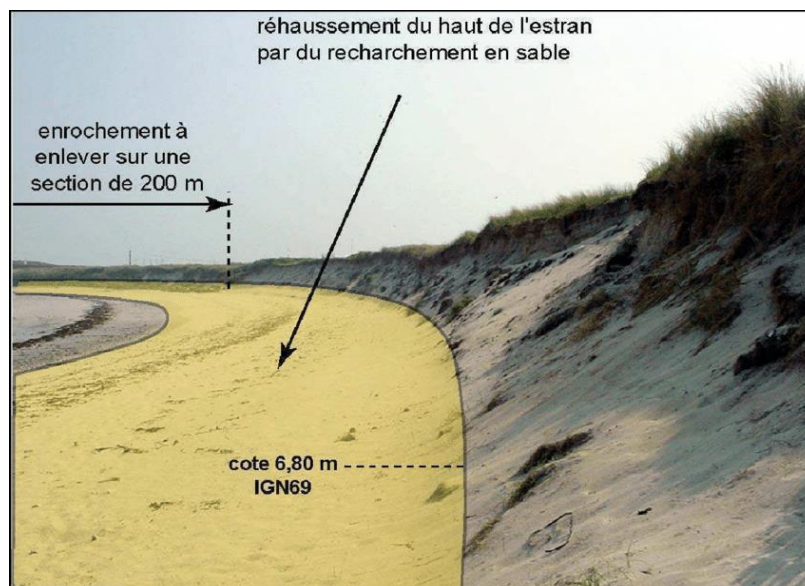


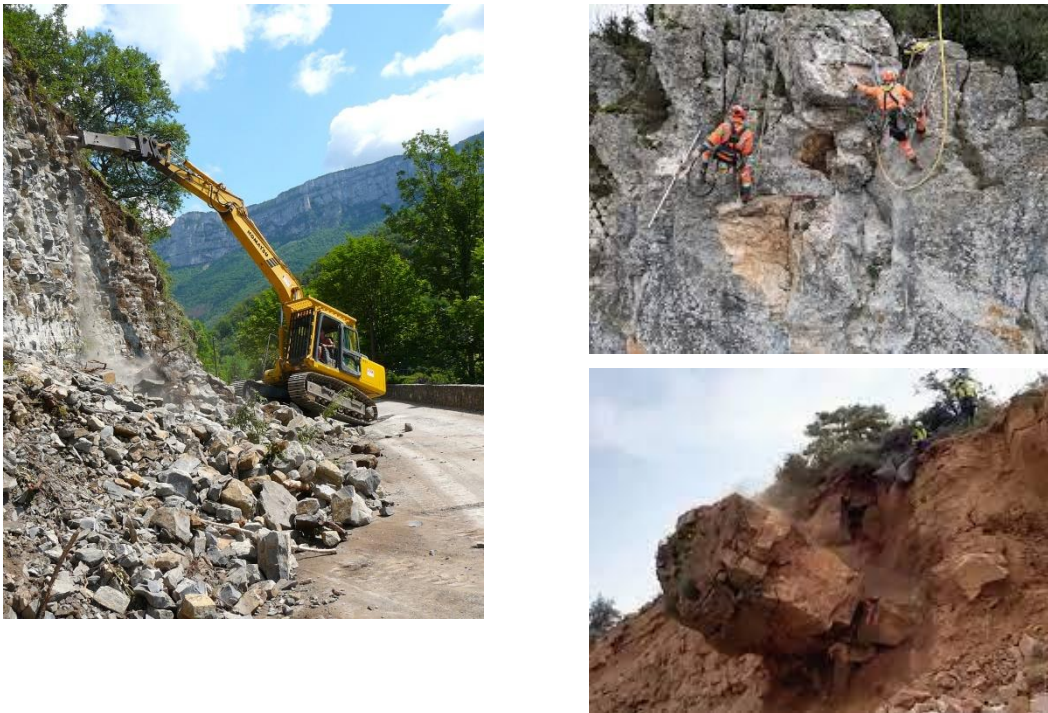
Figure 1.8 Sable au pied de la falaise

### 1.6.7 Purges

Une purge consiste à enlever les pierres instables pour réduire le risque de chute. Cela n'affecte pas la stabilité de la falaise. Ces éléments sont enlevés manuellement en suivant les plans de fracture entre la pierre et la paroi (figure 1.9).

Le périmètre de la zone à purger doit être protégé contre toute chute de pierres pendant l'intervention (la circulation est arrêtée sur tout ou partie de la route). La purge est une solution à court terme ; l'opération doit être répétée aussi souvent que nécessaire.

Le processus d'érosion et de fracturation de la falaise n'est ni contrôlé ni supprimé ; de nouveaux éléments instables peuvent réapparaître avec le temps. Une surveillance régulière de l'évolution de la paroi permet d'identifier l'apparition de ces éléments. [19]



**Figure 1.9** La purge d'une falaise

### 1.6.8 Re-végétalisation

Cette technique vise à limiter l'instabilité des falaises en restaurant ou en installant un couvert végétal sur le talus. Elle peut inclure la création de bermes boisées ou de fossés drainants (figures 1.10 et 1.11).

Le choix des espèces végétales dépend du degré d'instabilité : sur les talus très instables, on privilégie des plantes à croissance rapide et à enracinement profond ; sur les talus plus stables, un simple couvre-sol végétal peut suffire. Elle est particulièrement adaptée aux falaises sableuses ou rocheuses meubles. [18]



Figure 1.10 Végétalisation d'une falaise

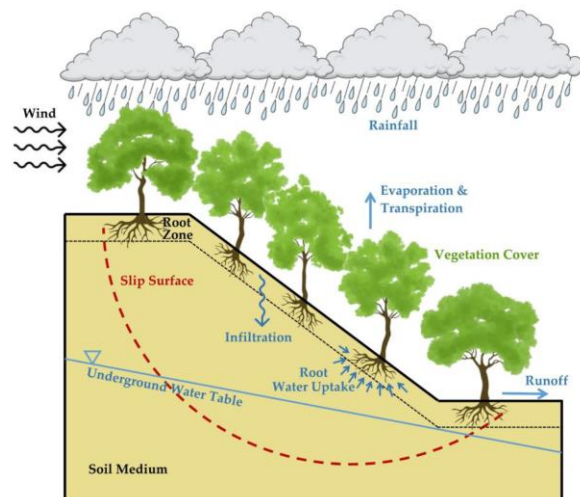


Figure 1.11 Schéma représentative de l'effet de végétalisation a la stabilité de falaise

### 1.6.9 Le soutènement

Il s'agit d'une structure massive consistant à maintenir en place une masse instable bien délimitée (figure 1.12).

C'est la solution retenue lorsqu'il apparaît difficile de purger ou d'ancrer la masse instable.[20]



**Figure 1.12** Mur de soutènement

### **1.7 Conclusion**

Ce chapitre a abordé la notion de falaise, les facteurs qui influencent la stabilité des pentes, ainsi que les risques naturels susceptibles de les affecter. Ces risques représentent une menace pour la sécurité humaine et l'environnement, ce qui impose la mise en œuvre de solutions adaptées.

Avant toute intervention de stabilisation, une analyse rigoureuse de la stabilité de la pente est indispensable. Plusieurs techniques de stabilisation ont été présentées et détaillées dans ce chapitre.

La stabilité des pentes constitue un enjeu majeur en ingénierie géotechnique, ce qui justifie pleinement l'importance de ce travail.

Le chapitre suivant se concentrera sur les méthodes d'analyse de la stabilité, en particulier la méthode des éléments finis, largement utilisée, ainsi que la méthode d'équilibre limite fondée sur des approches analytiques.

*Chapitre 2****METHODES D'ANALYSE DE LA STABILITE  
DES PENTES*****2.1 Introduction**

L'estimation de la stabilité des pentes en ingénierie géotechnique exige une modélisation intégrant la mécanique des sols, l'hydraulique et la mécanique générale. La surface de rupture est essentielle pour déterminer le facteur de sécurité ( $F_s$ ), qui est le rapport entre la résistance ultime au cisaillement et la contrainte de cisaillement mobilisée au point de rupture.

Pour analyser cette stabilité, deux approches sont couramment utilisées : la méthode d'équilibre limite (MEL), qui évalue l'équilibre statique des forces et des moments sans considérer les déformations du sol, et la méthode des éléments finis (MEF) plus

représentative, qui prend en compte le comportement des sols sous charges variables et les déformations progressives.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes utilisées pour analyser la stabilité des pentes, déterminer le facteur de sécurité adéquat et identifier la surface de glissement critique. Ces approches constitueront la base de notre étude dans le chapitre suivant.

## **2.2 Méthodes d'équilibre limite**

L'une des premières techniques développées pour étudier la stabilité des pentes est la méthode d'équilibre limite (MEL). Elle nécessite des calculs de contrainte appliquée ainsi que de résistance mobilisée dans la pente d'une surface de glissement d'essai.

Dans ce type de méthodes, le facteur de sécurité est mesuré par ces deux quantités données.

À cet égard, les surfaces de rupture d'essai calculent la valeur minimale et la valeur la plus critique.

Les hypothèses liées à la forme de la surface de glissement fournissent la différence significative entre les différentes méthodes d'équilibre limite, telles que circulaire, plane, logarithmique, etc.

L'équation d'équilibre est également basée sur les mêmes hypothèses, telles que l'équilibre des moments ou l'équilibre des forces ou, dans certains cas, les deux.

Parfois, une troisième dimension est considérée, qui est dans une direction perpendiculaire au plan d'une section transversale, affectant le résultat de la pente. La plupart du temps, les méthodes des tranches sont utilisées dans l'approche d'équilibre limite pour l'analyse de la stabilité des pentes.[21]

Les procédures d'analyse conventionnelles caractérisent la stabilité d'une pente en calculant un facteur de sécurité.

Le facteur de sécurité est défini pour la résistance au cisaillement du sol comme le rapport entre la résistance au cisaillement disponible ( $s$ ) et la résistance au cisaillement requise pour l'équilibre ( $\tau$ ), c'est-à-dire :

$$F_s = \frac{\text{Résistance au cisaillement disponible}}{\text{Contrainte de cisaillement à l'équilibre}} = \frac{s}{\tau}$$

Si la résistance au cisaillement est définie en termes de contraintes effectives, le facteur de sécurité est exprimé comme suit : [2]

$$F_s = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\tau}$$

Où

$c'$  et  $\phi'$  = cohésion de Mohr-Coulomb et angle de frottement, respectivement, exprimés en termes de contraintes effectives

$\sigma$  = contrainte normale totale sur le plan de rupture

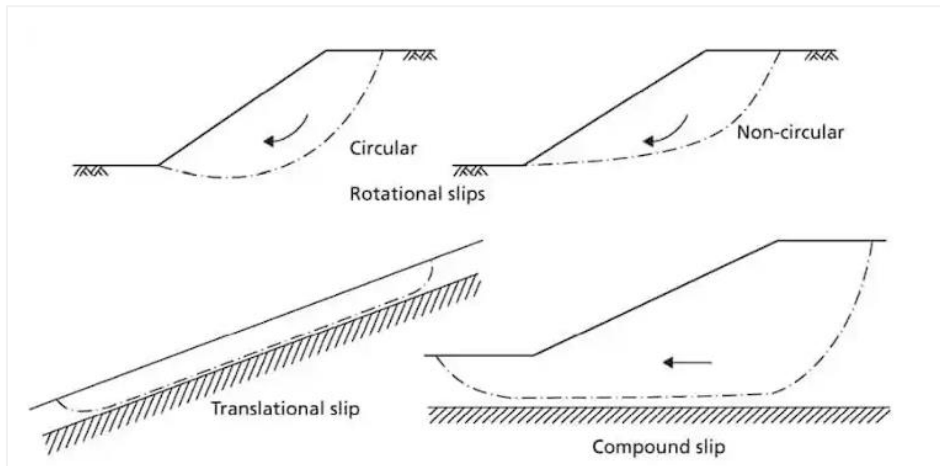
$u$  = pression interstitielle.

### 2.3 Forme de la surface de glissement

Avant d'évaluer le coefficient de sécurité, il faut définir la surface à laquelle les méthodes d'équilibre limite seront appliquées.

Les calculs du coefficient de sécurité sont effectués à plusieurs reprises pour un nombre de surfaces possédant le facteur minimal de sécurité.

Il est important de considérer la géométrie, les caractéristiques matérielles et les possibilités du procédé d'analyse utilisé pour déterminer la forme de la surface de glissement. La surface de glissement peut présenter des formes circulaires ou non circulaires, comme le montre la figure 1.

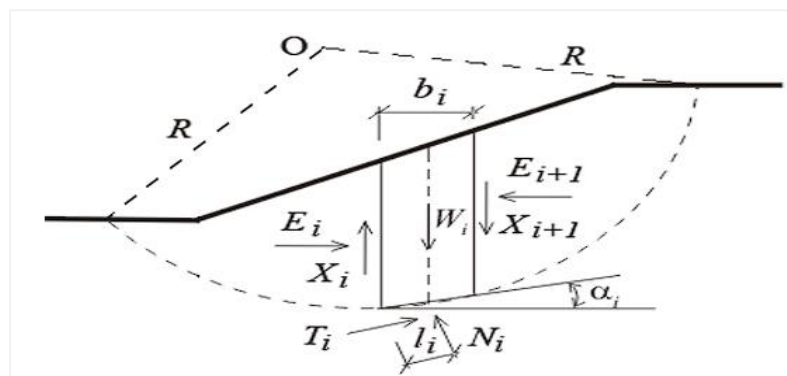


**Figure 2.1** Forme de la surface de glissement

### 2.3.1 Surfaces de glissements circulaires

Toutes les méthodes d'équilibre limite supposent que le corps du sol au-dessus de la surface de glissement est subdivisé en blocs (les plans de division entre les blocs sont toujours verticaux).

Les forces agissant sur les blocs individuels sont représentées sur la figure 2.2.



**Figure 2.2** Surface de glissement circulaire

$X_i$  et  $E_i$  : sont les forces de cisaillement et normales agissant entre les blocs individuels,

$T_i$  et  $N_i$  : sont les forces de cisaillement et normales sur des segments individuels de la surface de glissement,

$W_i$  sont les poids des blocs individuels.

Les méthodes individuelles de tranches diffèrent dans leurs hypothèses de satisfaction des équations de force d'équilibre et de l'équation de moment d'équilibre concernant le centre O.

### **Optimisation de la surface de glissement**

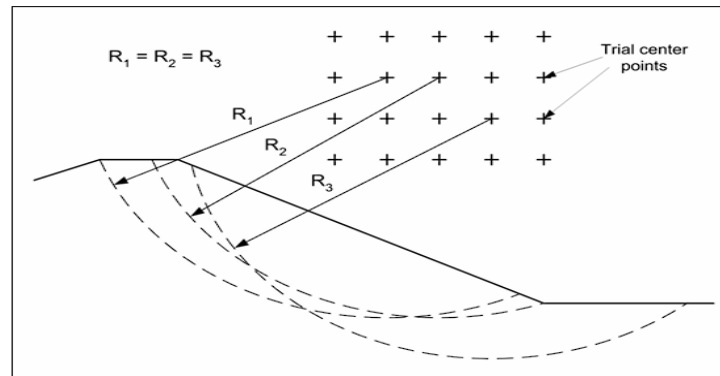
Les surfaces de glissement circulaires sont définies par la position du centre et l'un des éléments suivants : le rayon, un point fixe par lequel le cercle doit passer (souvent le pied de la pente) ou un plan auquel la surface de glissement doit être tangente (figures 2.3 et 2.4 et 2.5).

Pour trouver le facteur de sécurité minimum, on ajuste une variable tout en faisant varier une autre, c'est ce qu'on appelle le processus de recherche. Il est possible de modifier la position du centre en conservant le plan de tangence fixe, ou de modifier le rayon en restant fixe.

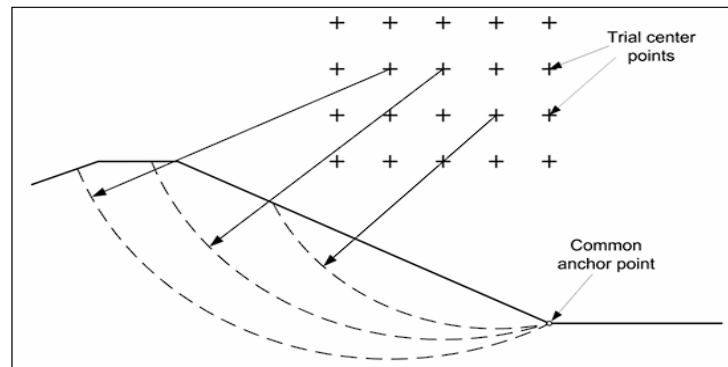
Cette procédure se répète jusqu'à ce que le facteur de sécurité le plus bas soit repéré. Dans les pentes homogènes avec un sol sans cohésion ( $c = 0$ ), ( $c' = 0$ ), la surface de glissement critique peut dégénérer en un plan parallèle à la pente, rendant son facteur de sécurité identique à celui d'une pente infinie.

De manière générale, le centre critique a un centre infiniment éloigné de la pente et un rayon infini.

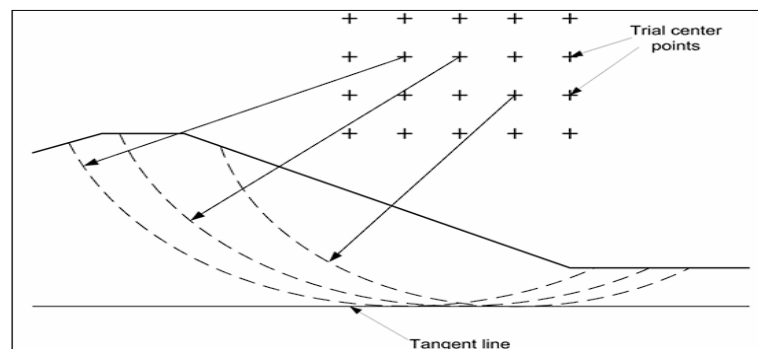
Dans de tels cas, les programmes informatiques peuvent avoir du mal à déterminer le cercle critique, ce qui fait que la recherche s'éloigne de la pente en raison d'erreurs numériques, de limitations d'arrondi ou de contraintes logicielles. Lorsqu'il en est ainsi, il est préférable d'utiliser la méthode d'analyse Pente infinie. [22]



**Figure 2.3** Recherche avec un rayon constant



**Figure 2.4** Recherche avec des cercles à travers un point commun



**Figure 2.5** Recherche avec des cercles tangents à une ligne tangente prescrite

### 2.3.2 Surfaces de glissements triangulaires

La solution de stabilité des pentes par surface de glissement polygonale repose sur la détermination de l'état limite des forces agissant sur le sol au-dessus de la surface de glissement.

Pour introduire ces forces, la surface est subdivisée en blocs séparés par des plans, généralement verticaux mais parfois inclinés, comme dans la méthode Sarma.

Les forces considérées incluent les forces normales  $N_i$  et de cisaillement  $T_i$  sur chaque segment, ainsi que les forces normales  $E_i$  et de cisaillement  $X_i$  entre les blocs, avec leurs points d'application  $l_i$  et  $z_i$ , et un facteur de sécurité  $F_s$ .

Le problème est modélisé par  $4n$  équations incluant l'équilibre horizontal, vertical, des moments et les relations de Mohr-Coulomb, mais reste indéterminé avec  $6n-2$  inconnues, nécessitant la fixation préalable de  $2n-2$  valeurs.

Chaque méthode, comme Sarma, Spencer, Janbu, Morgenstern-Price ou ITF, sélectionne ces valeurs différemment, et la résolution se fait de manière itérative pour assurer l'équilibre et l'admissibilité cinématique.

Différentes méthodes peuvent être adoptées :

- Sarma
- Spencer
- Janbu
- Morgenstern-Price

### **Optimisation de la surface de glissement**

L'optimisation de la surface de glissement ajuste progressivement les positions des points pour minimiser le facteur de stabilité FS. Les points d'extrémité se déplacent sur la surface du sol, tandis que les points internes se déplacent verticalement et horizontalement.

La taille du pas initial est un dixième de la plus petite distance entre points voisins, puis elle est réduite de moitié à chaque itération. L'optimisation progresse de gauche à droite et s'arrête lorsque plus aucun point ne bouge. Ce processus peut se bloquer dans un minimum local, empêchant l'identification de la surface critique, surtout pour des profils complexes.

Pour éviter cela, plusieurs configurations initiales sont testées et une approche combinée avec les surfaces circulaires est recommandée. La surface circulaire critique est d'abord identifiée, puis utilisée pour définir la surface polygonale initiale.

L'optimisation peut être contrainte si la surface de glissement doit traverser ou contourner certaines zones. Deux méthodes permettent d'imposer ces restrictions : forcer la surface à éviter des segments spécifiques ou limiter le déplacement de certains points à une seule direction. [23]

### **2.4 Méthode des tranches**

La méthode de découpage en tranches selon l'approche d'équilibre limite demeure l'une des techniques les plus couramment utilisées dans l'analyse de la stabilité des pentes, en raison de sa base théorique solide et de son historique d'application éprouvé. Initialement développée à partir de considérations empiriques et d'intuitions en

ingénierie, cette méthode a par la suite été renforcée par des principes rigoureux de mécanique des sols, ce qui a conduit à son adoption généralisée à partir des années 1950.

Les contributions majeures incluent les travaux fondateurs de Fellenius (1936), Bishop (1955), Janbu (1954), Morgenstern et Price (1965), Spencer (1967), Fredlund et al. (1981), et Duncan (1996), qui ont chacun proposé des variantes améliorant la précision ou la rigueur des calculs du facteur de sécurité.

Ces méthodes diffèrent principalement dans la manière dont elles satisfont les conditions d'équilibre statique (forces et moments), et dans leur capacité à traiter des surfaces de glissement circulaires ou non circulaires.

Des développements plus récents ont permis l'intégration de modèles de comportement plus complexes, notamment en sol non saturé (Fredlund et Rahardjo, 1993), ou encore l'utilisation de techniques d'optimisation numériques pour la recherche automatique de la surface de rupture critique (Griffiths et Lane, 1999 ; Cheng et al., 2007). Par ailleurs, l'intégration de la variabilité spatiale des paramètres géotechniques grâce à l'analyse probabiliste a permis d'élargir la portée des méthodes traditionnelles (Cho, 2007 ; Griffiths et Fenton, 2004).

Aujourd'hui, bien que des approches plus avancées comme les éléments finis soient de plus en plus utilisées, la méthode des tranches reste une référence essentielle, notamment pour les analyses préliminaires et les comparaisons normatives. Elle constitue la base conceptuelle de nombreuses applications logicielles en ingénierie géotechnique.

[21]

Parmi les méthodes classiques d'analyse de la stabilité des pentes basées sur l'équilibre limite, plusieurs approches peuvent être adoptées, chacune avec ses propres hypothèses et niveaux de précision. Les plus couramment utilisées sont :

- La méthode de Fellenius (ou Petterson).
- La méthode de Bishop modifiée.
- La méthode de Janbu.
- La méthode de Spencer.
- Morgenstern-Price

#### 2.4.1 Méthode de Fellenius

Fellenius (1927) a proposé une méthode limitée aux ruptures circulaires, basée sur l'hypothèse supplémentaire suivante : les forces  $E(x)$  et  $T(x)$  sont invariables d'une tranche à l'autre, autrement dit  $\frac{dT}{dx} = \frac{dE}{dx} = 0$  (1)

$$\sigma = \gamma h \cos^2(\alpha) \quad (2)$$

$$\tau = \cos(\alpha) \gamma h \sin(\alpha) \quad (3)$$

Soit FS le coefficient de sécurité locale d'une tranche donnée, tel que :

$$FS = \frac{\tau_{ult}}{\tau} \quad (4)$$

En combinant les trois dernières équations, on aboutit à :

$$FS = \frac{\tau_{ult}}{\tau} = \frac{C + \gamma h \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\gamma h \cos \alpha \sin \alpha} \quad (5)$$

En cas d'un talus non surchargé, la contrainte normale  $\sigma$  est due seulement au poids  $W$  de la tranche, comme le montre la figure :

$$\sigma = W \frac{\cos \alpha}{ds} \quad (6)$$

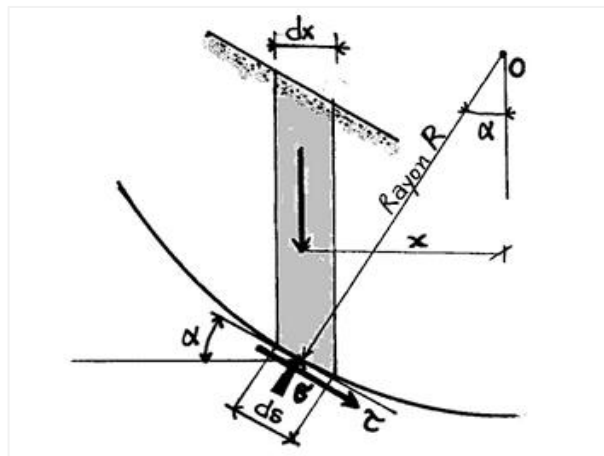
$ds = dx / \cos \alpha$  étant la longueur de l'arc formant la base de la tranche.

Le facteur de sécurité locale devient alors :

$$FS = \frac{\tau_{ult}}{\tau} = \frac{\frac{c}{\cos \alpha} + W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{W \sin \alpha} \quad (7)$$

Définissons un facteur de sécurité globale de la zone concernée par le glissement. Le moment moteur du glissement par rapport au centre O du cercle, est dû au poids de la tranche et éventuellement des surcharges, et le moment résistant au glissement est dû à la résistance au cisaillement.

Le facteur global de sécurité peut être défini pour les N tranches étudiées formant le bloc ABCD (k=1, N) :



**Figure 2.6** schéma de Calcul du facteur de sécurité d'une tranche

On doit essayer le plus grand nombre possible de cercles possibles de glissement, calculer le coefficient de sécurité globale FS pour chaque cercle, et retenir le cercle ayant le facteur minimal.

La stabilité au glissement est assurée si la valeur minimale est supérieure ou égale à **1.50**.

Le tableau 2.1 présente la méthodologie de calcul du facteur de sécurité pour un cercle de rayon et de centre donnés. Le calcul, étant fatigant, il est courant d'avoir recours à un programme sur ordinateur pour effectuer une telle tâche.[24]

**Tableau 2.1** Tableau récapitulatif du calcul du facteur de sécurité selon Fellenius

Tranche	$\alpha$ (1)	$Cb/\cos\alpha$ (2)	W (3)	$W\cos\alpha\text{tg}\phi$ (4)	$W \sin\alpha$ (5)	(2)+(4) (6)
1						
...						
...						
K						
...						
...						
N						
$F_s = \Sigma(6) / \Sigma(5)$						

#### 2.4.2 Méthode de bishop simplifiée (1955)

La méthode simplifiée de Bishop a été développée par Bishop (1955). Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les forces entre les tranches sont horizontales, comme le démontre la figure 2.7.

Une surface de glissement circulaire est également supposée dans la méthode simplifiée de Bishop. Les forces sont additionnées dans la direction verticale.

L'équation d'équilibre résultante est combinée à l'équation de Mohr-Coulomb et à la définition du facteur de sécurité pour déterminer les forces sur la base de la tranche.

Enfin, les moments sont additionnés autour du centre de la surface de glissement circulaire pour obtenir l'expression suivante pour le facteur de sécurité :

$$F_s = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta x + (W + P \cos \beta - u \Delta x \sec \alpha) \tan \phi'}{m\alpha} \right]}{\sum W \sin \alpha - \frac{\sum Mp}{R}}$$

Où  $\Delta x$  est la largeur de la tranche et  $m\alpha$  est défini par l'équation suivante

$$m\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}$$

Les termes  $W$ ,  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $u$ ,  $P$ ,  $MP$  et  $R$

$c'$  et  $\phi'$  = paramètres de résistance au cisaillement au centre de la base de la tranche

$W$  = poids de la tranche

$u$  = pression interstitielle au centre de la base de la tranche

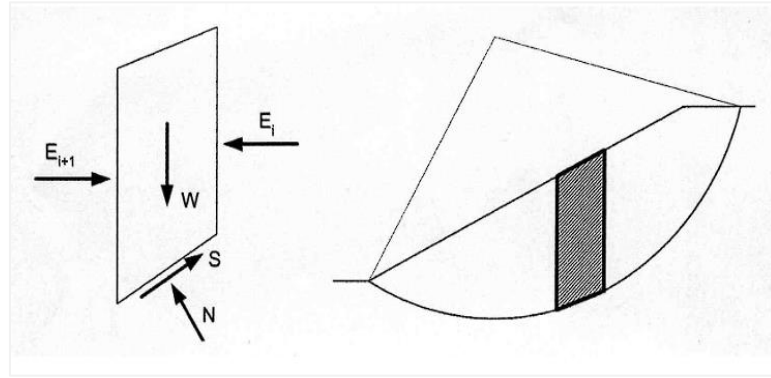
$P$  = force résultante de l'eau agissant perpendiculairement au sommet de la tranche

$MP$  = moment autour du centre du cercle produit par la force de l'eau agissant sur le sommet de la tranche

$R$  = rayon du cercle

Les facteurs de sécurité calculés à partir de l'équation précédent satisfont à l'équilibre des forces dans la direction verticale et à l'équilibre global des moments autour du centre d'un cercle. Les inconnues et les équations de la méthode simplifiée de Bishop sont résumées dans le tableau.

Comme la valeur du terme  $m\alpha$  dépend du facteur de sécurité, ce dernier apparaît des deux côtés de l'équation. L'équation ne peut pas être manipulée de manière à obtenir une expression explicite pour le facteur de sécurité. Ainsi, une procédure itérative d'essais et d'erreurs est utilisée pour résoudre le facteur de sécurité. [22]



**Figure 2.7** Forces agissant sur une tranche pour la méthode de Bishop simplifiée

**Tableau 2.2** Inconnues et équations pour la méthode simplifiée de Bishop

Inconnues	Number of Unknowns for n Slices
Facteur de sécurité (F)	1
Forces normales à la base des tranches (N)	n
Nombre total des inconnues	n + 1
Equations	Nombre d'équations pour n coupes
Équilibre des forces dans la direction verticale, $\sum F_v = 0$	n
Équilibre des moments de l'ensemble de la masse de sol	1
Total des equations d'équilibre	n + 1

#### 2.4.2.1 Limitations de la méthode simplifiée de Bishop

La méthode simplifiée de Bishop ne parvient pas à équilibrer les forces horizontalement. Puisque les forces horizontales ne sont pas pleinement satisfaites, la méthode simplifiée de Bishop est pertinente.

Il est difficile de discuter de la méthode d'analyse des tremblements de terre pseudo-statiques, qui implique l'application d'une force horizontale supplémentaire. Les analyses avec des surfaces de cisaillement circulaires sont également limitées à cette méthode.

[25]

### **2.4.2.2 Recommandation d'utilisation**

De nombreux chercheurs (Whitman et Bailey 1967 ; Fredlund et Krahn 1977) ont montré que les facteurs de sécurité calculés par la méthode Bishop simplifiée se comparent bien aux facteurs de sécurité calculés à l'aide de méthodes rigoureuses, généralement à 5 % près.

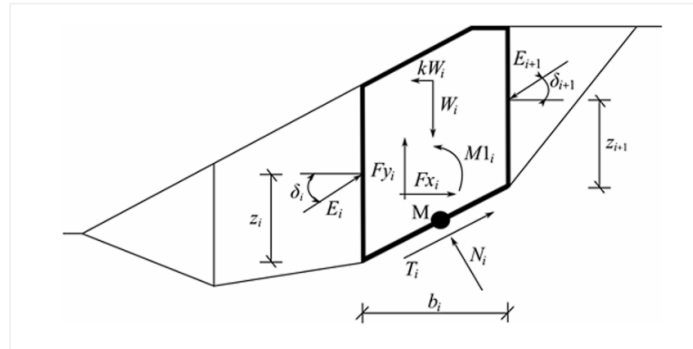
De plus, la démarche est assez simple par rapport à des solutions plus strictes. Les solutions informatiques fonctionnent rapidement et les calculs manuels ne prennent pas beaucoup de temps.

La méthode est largement utilisée à l'échelle mondiale, ce qui signifie qu'il y a une solide expérience dans ce domaine. Il est acceptable de calculer les facteurs de sécurité pour les surfaces de glissement circulaires en utilisant la méthode Bishop simplifiée. Il est conseillé de vérifier la conception finale des structures majeures en utilisant la méthode Bishop simplifiée.[25]

### **2.4.3 Méthode de Spencer**

La méthode Spencer est une méthode générale de tranches développée sur la base de l'équilibre limite. Elle nécessite de remplir l'équilibre des forces et des moments agissant sur des blocs individuels (figure 2.8).

Les blocs sont créés en divisant le sol au-dessus de la surface de glissement par des plans de division. Les forces agissantes sur des blocs individuels sont présentées dans la figure suivante.



**Figure 2.8** Schéma statique - Méthode Spencer

Chaque bloc est supposé contribuer en raison des forces suivantes :

$W_i$  : poids du bloc, y compris la surcharge matérielle ayant le caractère de poids, y compris l'influence du coefficient de tremblement de terre vertical  $K_v$

$K_h * W_i$  : force d'inertie horizontale représentant l'effet du tremblement de terre,  $K_h$  est le facteur d'accélération horizontale pendant le tremblement de terre

$N_i$  : force normale sur la surface de glissement

$T_i$  : force de cisaillement sur la surface de glissement

$E_i, E_{i+1}$  : forces exercées par les blocs voisins, elles sont inclinées par rapport au plan horizontal d'un angle  $\delta$

$F_{xi}, F_{yi}$  : autres forces horizontales et verticales agissant sur le bloc

$M_{1i}$  : moment des forces  $F_{xi}, F_{yi}$  tournant autour du point M, qui est le centre du 1<sup>er</sup> segment de surface de glissement

$U_i$  : résultante de la pression interstitielle sur le 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement

Les hypothèses suivantes sont introduites dans la méthode Spencer pour calculer l'équilibre limite des forces et du moment sur des blocs individuels :

- Les plans de division entre les blocs sont toujours verticaux.
- La ligne de l'action du poids du bloc  $W_i$  passe par le centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement représenté par le point M.
- La force normale  $N_i$  agit au centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement, au point M.
- L'inclinaison des forces  $E_i$  agissant entre les blocs est constante pour tous les blocs et égale à  $\delta$ , uniquement aux extrémités de la surface de glissement est  $\delta = 0$ .

#### 2.4.4 Méthode de Janbu

La méthode de Janbu est une méthode développée sur la base de l'équilibre limite. Elle nécessite de satisfaire l'équilibre des forces et des moments agissant sur les blocs individuels (seul l'équilibre des moments du dernier bloc supérieur n'est pas satisfait) (figure 2.9).

Les blocs sont créés en divisant le sol au-dessus de la surface de glissement en divisant les plans. Les forces agissant sur les blocs individuels sont représentées dans la figure suivante :

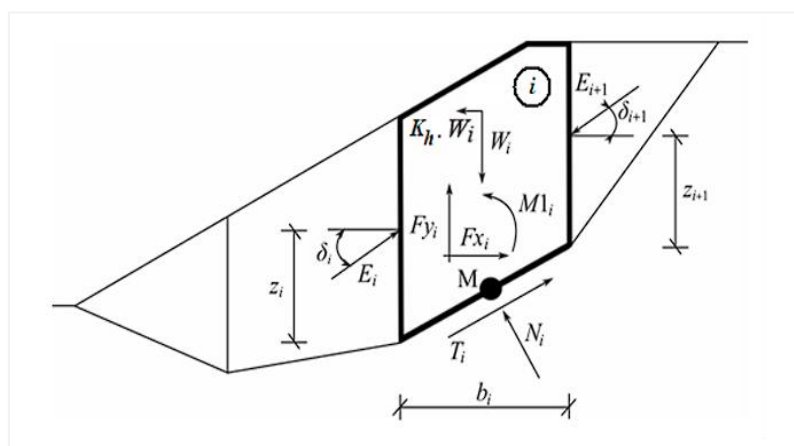


Figure 2.9 Schéma statique – Méthode Janbu

Chaque bloc est supposé contribuer en raison des forces suivantes :

$W_i$  : poids du bloc, y compris la surcharge matérielle ayant le caractère de poids, y compris l'influence du coefficient de tremblement de terre vertical  $K_v$ .

$K_h * W_i$  : force d'inertie horizontale représentant l'effet du tremblement de terre,  $K_h$  est le facteur d'accélération horizontale pendant le tremblement de terre

$N_i$  : force normale sur la surface de glissement

$T_i$  : force de cisaillement sur la surface de glissement

$E_i, E_{i+1}$  : forces exercées par les blocs voisins, ils sont inclinés par rapport au plan horizontal d'un angle  $\delta_i$ .

$F_{xi}, F_{yi}$  : autres forces horizontales et verticales agissant sur le bloc

$M_{1i}$  : moment des forces  $F_{xi}, F_{yi}$  tournant autour du point M, qui est le centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement

$U_i$  - résultante de la pression interstitielle sur le 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement

Les hypothèses suivantes sont introduites dans la méthode Janbu pour calculer l'équilibre limite des forces et du moment sur des blocs individuels :[26]

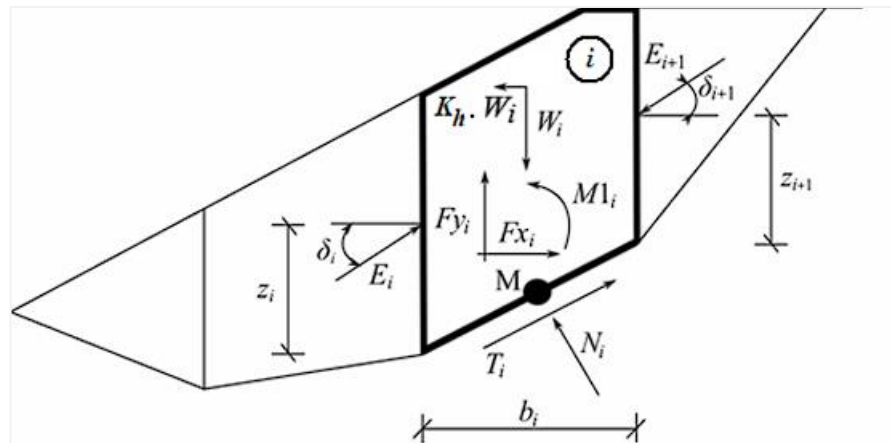
- Les plans de division entre les blocs sont toujours verticaux
- La ligne d'action du poids du bloc  $W_i$  passe par le centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement représentée par le point M
- La force normale  $N_i$  agit au centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement, au point M

- La position  $z_i$  des forces  $E_i$  agissant entre les blocs est supposée, aux extrémités de la surface de glissement est  $z = 0$

#### 2.4.5 Méthode de Morgenstern-Price

Morgenstern-Price est une méthode générale de tranches développée sur la base de l'équilibre limite. Elle nécessite de satisfaire l'équilibre des forces et des moments agissant sur des blocs individuels (figure 2.10).

Les blocs sont créés en divisant le sol au-dessus de la surface de glissement par des plans de division. Les forces agissant sur les blocs individuels sont représentées dans la figure suivante :



**Figure 2.10** Schéma statique – Méthode Morgenstern-Price

Chaque bloc est supposé contribuer en raison des mêmes forces que dans la méthode Spencer.[26]

Les hypothèses suivantes sont introduites dans la méthode Morgenstern-Price pour calculer l'équilibre limite des forces et du moment sur des blocs individuels :

- Les plans de division entre les blocs sont toujours verticaux.

- La ligne d'action du poids du bloc  $W_i$  passe par le centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement représenté par le point M.
- La force normale  $N_i$  agit au centre du 1<sup>er</sup> segment de la surface de glissement, au point M.
- L'inclinaison des forces  $E_i$  agissant entre les blocs est différente sur chaque bloc ( $\delta_i$ ) aux extrémités de la surface de glissement est  $\delta = 0$ .

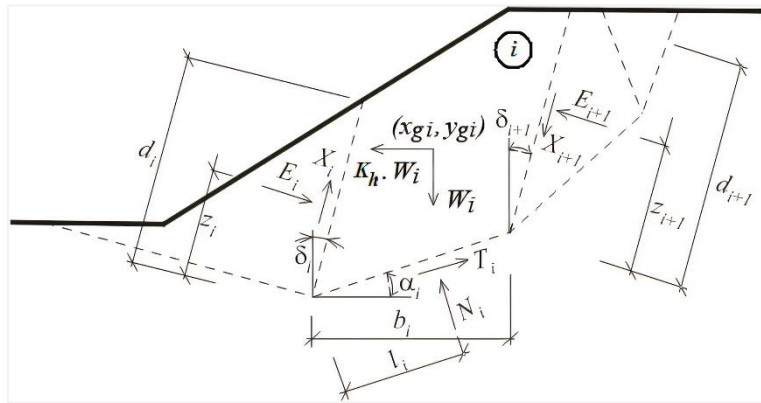
#### **2.4.6 Méthode de Sarma**

La méthode de Sarma s'inscrit dans une catégorie de méthodes des tranches générales des états limites (figure 2.11).[27]

La méthode développée comme un moyen de calculer l'accélération horizontale critique qui est nécessaire pour amener la masse de sol délimitée par la surface de glissement et la surface libre à un état d'équilibre limitant. Cette accélération critique est donc une mesure du facteur statique de sécurité.

Pour déterminer l'accélération critique, aucune itération n'est nécessaire. Le facteur habituel de sécurité est obtenu sur une base itérative simple, ce qui nécessite seulement environ trois itérations et ne contient aucun problème de convergence.

Si, toutefois, l'accélération critique doit être déterminée par les autres méthodes déjà mentionnées, le montant du travail de calcul impliqué devient trop grand. La simplicité de la méthode d'analyse de stabilité apparaîtra dès la formulation du problème. [28]



**Figure 2.11** Schéma statique - méthode de Sarma

$E_i$  et  $X_i$  : les forces normales et de cisaillement entre les blocs.

$N_i$  et  $T_i$  : les forces appliquées sur les segments de la surface de glissement.

$W_i$  : le poids du bloc

$K_h \cdot W_i$  : la force horizontale utilisée par la méthode de Sarma pour évaluer l'état limite.

Une surcharge inclinée peut être appliquée à chaque bloc. Elle est prise en compte dans le calcul, tout comme la surcharge due à l'eau (nappe phréatique au-dessus du terrain) et les forces dans les ancrages. Toutes ces forces sont projetées sur l'axe horizontal et vertical, puis additionnées en composantes  $F_{xi}$  et  $F_{yi}$ .

$K_h$  : le coefficient d'accélération horizontale.

Il est intégré au calcul pour assurer l'équilibre des blocs individuel, Il existe une relation entre  $K_h$  et le facteur de stabilité de la pente  $F_s$ , permettant de déterminer le coefficient de sécurité.

En général, on utilise une valeur de  $K_h$  égale à zéro. Une valeur non nulle sert à simuler une surcharge horizontale, comme celle induite par un séisme.

L'avantage de cette méthode est que l'aide d'un ordinateur n'est pas indispensable et que le problème de non-convergence n'existe pas. La précision associée à la méthode Morgenstern-Price n'est pas perdue dans la simplicité de la méthode actuelle.

Cependant, dans la présente solution, comme dans toute solution d'analyse de stabilité, l'acceptabilité physique de la solution doit être vérifiée avant que le résultat lui-même ne soit accepté, par exemple, les forces internes obtenues à partir de la solution ne doivent pas violer les critères de rupture et aucune tension ne doit être impliquée dans la masse du sol.[28]

## **2.5 Méthode des éléments finis (MEF)**

La méthode des éléments finis (MEF) constitue aujourd'hui l'un des outils numériques les plus performants et les plus répandus pour l'analyse des problèmes géotechniques complexes.

Elle est particulièrement adaptée à l'étude de la stabilité des falaises, grâce à sa capacité à modéliser des géométries irrégulières, des matériaux hétérogènes, des comportements non linéaires et des conditions aux limites variées.

Cette flexibilité en fait un choix pertinent pour simuler les mécanismes de rupture dans des environnements côtiers soumis à l'érosion marine, aux infiltrations d'eau ou à d'autres sollicitations naturelles.

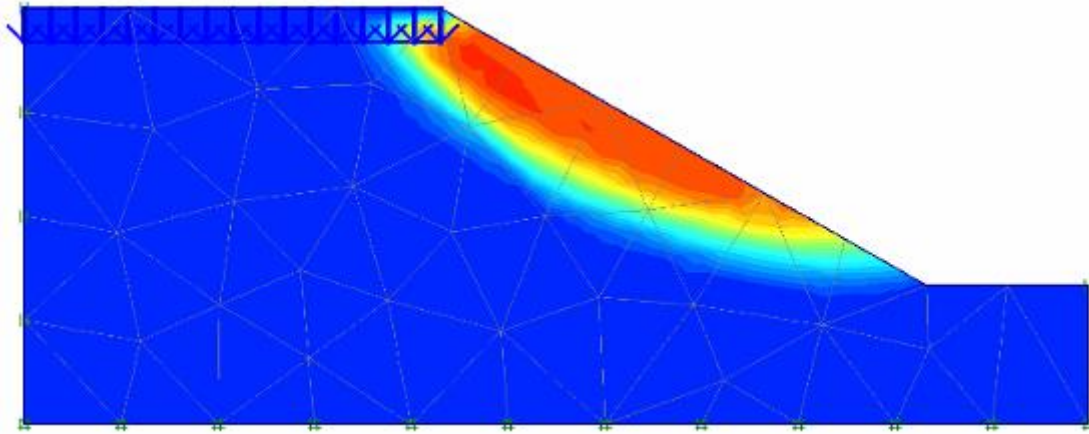
Largement utilisée dans la recherche comme dans la pratique professionnelle, la MEF bénéficie d'une vaste expérience documentée dans la littérature scientifique (Zienkiewicz et al., 2005 ; Smith & Griffiths, 2004).

Elle permet une représentation plus réaliste du comportement des sols et des formations rocheuses que les approches traditionnelles, notamment dans les cas où les méthodes d'équilibre limite montrent leurs limites.

L'analyse élasto-plastique des ouvrages géotechniques par la MEF est bien établie dans le domaine académique depuis plusieurs décennies. Cependant, son adoption en ingénierie de terrain, en particulier pour l'évaluation de la stabilité des pentes, demeure encore limitée. Cette réticence peut s'expliquer par une perception de complexité excessive et par la qualité parfois insuffisante des données géotechniques disponibles à partir des reconnaissances de terrain classiques.

De nombreux praticiens restent sceptiques quant à la pertinence de modélisations complexes dans un contexte où les incertitudes sur les paramètres du sol sont importantes.

Néanmoins, dans des situations spécifiques (telles que des géométries irrégulières, des conditions hydrogéologiques complexes ou des hétérogénéités marquées du sol) la MEF offre des avantages considérables (figure 2.12). Elle permet d'analyser les effets couplés (mécaniques et hydrauliques), d'identifier les zones critiques de concentration des contraintes et de simuler des conditions de chargement réalistes.



**Figure 2.12** Etude de la stabilité d'un talus (Plaxis 2D)

Les problèmes linéaires, tels que la prédiction des tassements, le calcul des déformations ou encore les écoulements en régime permanent ou transitoire, se prêtent particulièrement bien à cette méthode.

Par ailleurs, l'utilisation de l'analyse non linéaire est aujourd'hui facilitée par les progrès en puissance de calcul et la démocratisation des logiciels spécialisés. Les modèles non linéaires, nécessaires dans les cas où les propriétés du sol évoluent en fonction du chargement ou du temps, sont désormais accessibles sur des ordinateurs de bureau et réalisables en quelques minutes, là où ils nécessitaient autrefois des ressources importantes.

Dans le contexte spécifique de la stabilité des pentes, la MEF élasto-plastique présente des avantages significatifs sur les approches traditionnelles d'équilibre limite. Contrairement aux méthodes comme celles de Bishop ou Janbu, qui imposent une géométrie a priori de la surface de rupture, la MEF permet une identification naturelle de cette dernière à partir de la distribution des contraintes et des déformations. Elle offre

ainsi une modélisation plus fidèle du comportement du sol et des mécanismes de rupture, réduisant les incertitudes liées aux hypothèses initiales.

Enfin, les interfaces graphiques modernes des logiciels MEF améliorent considérablement la visualisation et l'interprétation des résultats, qu'il s'agisse de la cartographie des déplacements, de l'évolution des contraintes ou de l'identification des zones plastiques. Cela constitue un outil d'aide à la décision précieux pour l'ingénieur, notamment dans des contextes à forts enjeux sécuritaires comme celui des falaises côtières. [30], [31]

### **2.5.1 Méthode des éléments finis pour l'analyse de la stabilité des pentes**

Bien que la MEF soit couramment utilisée en recherche depuis plusieurs décennies, son adoption dans la pratique professionnelle reste parfois limitée, en particulier dans les études de stabilité de pentes.

Cette retenue s'explique souvent par la perception d'une certaine complexité de la méthode, mais aussi par la qualité souvent incertaine des données géotechniques issues des reconnaissances de terrain.

Néanmoins, avec les progrès technologiques et la généralisation des logiciels spécialisés tels que Plaxis 2D/3D ou RS2, ces analyses sont aujourd'hui accessibles même sur des stations de travail standards.

Contrairement aux méthodes classiques d'équilibre limite (Bishop, Janbu, Spencer...), la MEF ne nécessite pas de supposer a priori une forme de surface de glissement. Elle permet au contraire une visualisation réaliste et continue de l'évolution des contraintes, des déformations et des déplacements au sein du massif, offrant ainsi une meilleure compréhension du mécanisme de rupture.

Dans le cadre de ce travail, des exemples concrets de modélisations ont été réalisés à l'aide de Plaxis et RS2. Les figures ci-dessous illustrent :

- Le maillage du profil de falaise avec stratification hétérogène,
- La distribution des déplacements verticaux et horizontaux,
- La localisation de la surface de rupture,
- Et l'évolution des pressions interstitielles dans les sols saturés.

Ces résultats confirment l'utilité de la MEF pour anticiper les instabilités potentielles, notamment dans le cas de falaises côtières affectées par l'érosion marine, les infiltrations ou les surcharges en crête. Grâce à ses interfaces graphiques conviviales, la MEF facilite également l'interprétation des résultats par les ingénieurs et constitue aujourd'hui un outil d'aide à la décision incontournable dans la gestion des risques naturels en milieu littoral. [30]

### **2.5.2 Avantages de la méthode des éléments finis**

Dans cette méthode, les propriétés de chaque élément sont évaluées individuellement, donc un avantage évident est que nous pouvons combiner les propriétés de différents matériaux pour chaque élément. Il n'y a donc aucune limite à l'hétérogénéité.

Il n'y a aucune restriction sur la forme, donc les formes irrégulières et optionnelles ne posent pas de difficulté et, comme toutes les approximations numériques, sont mises en œuvre sur le schéma décrit.

Cependant, cette méthode est une méthode continue et nécessite une continuité pour continuer la solution approximative pour de nombreux endroits. L'un des avantages importants de la méthode des éléments finis est qu'elle utilise des conditions aux limites dans la formation d'équations de bricolage.

C'est relativement simple et ne nécessite aucune technologie spéciale et avec beaucoup de tests pour satisfaire les conditions aux limites, elle prescrit les conditions pour chaque élément fini une fois les équations algébriques réalisées.[29]

### **2.5.3 Limites de la méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis a atteint un niveau de progrès élevé pour résoudre les problèmes, cependant, cette méthode ne conduira à des résultats réalistes que si les multiples propriétés des matériaux modélisés sont correctement définies.

L'un des aspects frustrants de l'utilisation de la méthode des éléments finis est l'erreur causée par une précision insuffisante des informations d'entrée dans l'ordinateur, ce qui conduit finalement à des erreurs résultant de toutes les étapes et du résultat final[29]

La méthode d'analyse limite a opté pour l'idée d'une relation contrainte-déformation supposée.

Elle peut être expliquée comme suit : le sol est supposé être un matériau plastique entièrement rigide auquel est associée une règle d'écoulement. Ici, la méthode d'analyse limite apporte une solution à de nombreux problèmes différents alors qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer l'analyse élasto-plastique par étapes.

Comme indiqué précédemment, cette méthode simule le sol comme un matériau plastique entièrement plastique, lorsque la règle d'écoulement associée est respectée. Selon cette hypothèse du comportement du sol, elle peut fonctionner avec deux théorèmes de limitation plastique et peut également être prouvée (limites supérieure et inférieure).

Ainsi, nous pouvons encadrer la charge d'effondrement réelle à la fois au-dessus et au-dessous si les solutions limitées supérieure et inférieure peuvent être calculées par les théorèmes de limitation de l'analyse limite, ce qui est particulièrement utile.

Cette hypothèse est insignifiante en raison du contrôle d'erreur intégré sur la précision de la charge d'effondrement approximative. Elle est également utile dans les cas où la solution exacte ne peut pas être déterminée, par exemple l'analyse de la stabilité des pentes.

La méthode d'analyse limite dépend de deux théorèmes. Le théorème de la limite inférieure définit l'estimation de la limite inférieure pour une charge d'effondrement précise comme tout champ de contrainte statiquement admissible.

Le théorème de la limite supérieure définit que les charges externes sont des limites supérieures de la charge d'effondrement réelle lorsque la puissance dissipée

Par tout champ de vitesse cinématiquement admissible est égalisée à la puissance dissipée par les charges externes.[21]

Dans le domaine d'utilisation des méthodes des éléments finis, plusieurs chercheurs réalisent leurs études et modélisations en comparant la méthode de l'équilibre limite et la méthode des éléments finis. L'étude comparative montre des résultats presque identiques, avec une différence négligeable.

Cependant, dans le cadre des MEF, le raffinement du maillage influence les résultats. Un maillage très fin améliore la précision des calculs (Tableau 2.3).

Cette idée est développée montre le nombre des éléments dans le même modèle pour déférente maillage et le facteur de sécurité trouvé dans chaque maillage.

**Tableau 2.3** Distribution du nombre d'éléments pour différents grosseurs de maillage pour FEM 2D et 3D [31]

Méthode	2D	3D
<b>Distribution des éléments</b>	<b>Nombre des éléments</b>	
<b>Très grossière</b>	800	75233
<b>Grossière</b>	859	75291
<b>Moyenne</b>	897	76124
<b>Fine</b>	1037	78951
<b>Très fine</b>	<b>1251</b>	<b>87897</b>

Le tableau 2.4 illustre Il présente également les valeurs du facteur de sécurité (FS) obtenues à partir des calculs numériques réalisés avec le logiciel PLAXIS 2D, pour chaque configuration de maillage.

**Tableau 2.4** Valeur FS générée à partir de calculs numériques par PLAXIS 2D et PLAXIS 3D.[31]

Méthode	2D	3D	Erreur avec 2D
	FS	FS	MEF
<b>Très grossière</b>	1.18	1.21	2.54
<b>Grossière</b>	1.18	1.20	1.69
<b>Moyenne</b>	1.17	1.20	2.56
<b>Fine</b>	1.15	1.17	1.74
<b>Très fine</b>	<b>1.14</b>	<b>1.16</b>	<b>1.75</b>

## 2.6 Conclusion

L'analyse de la stabilité des pentes, notamment dans le contexte des falaises soumises à l'érosion marine, constitue une composante essentielle des études géotechniques. Ce chapitre a présenté les principales méthodes d'évaluation du facteur de sécurité, qu'il s'agisse des approches classiques d'équilibre limite ou des méthodes numériques plus avancées.

Les méthodes d'équilibre limite, comme celles de Fellenius, Bishop, Janbu ou Spencer, restent des références largement utilisées, notamment via des logiciels comme Slope Stability du progiciel GEO5, qui permet une mise en œuvre fiable et intuitive de ces approches. Ces méthodes, bien que basées sur des hypothèses simplificatrices, restent pertinentes pour une première évaluation de la stabilité.

Cependant, dans le cas des falaises rocheuses ou meubles, présentant souvent des géométries irrégulières, des conditions hydrauliques complexes ou une stratification hétérogène, le recours à des outils numériques avancés comme la méthode des éléments finis (MEF) devient indispensable. Des logiciels performant tels que PLAXIS 2D/3D, permettent d'intégrer des comportements non linéaires, des couplages hydromécaniques et d'obtenir des résultats plus réalistes, en particulier en ce qui concerne les distributions de contraintes, de déplacements et l'identification de la surface critique sans hypothèse préalable.

Ainsi, le choix de la méthode dépend du niveau de complexité du problème, de la précision attendue et de la qualité des données géotechniques disponibles. Ce chapitre a fourni les fondements nécessaires pour l'application de ces méthodes dans l'étude de cas réelle abordée dans le chapitre suivant, dédiée à la modélisation numérique de la stabilité d'une falaise côtière.

## Chapitre 3

## Analyse de la stabilité d'une falaise- Cas d'étude Oran

### 3.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une revue bibliographique détaillée sur les falaises, en mettant en évidence les principaux facteurs influençant leur stabilité ainsi que les méthodes couramment utilisées pour leur stabilisation.

Afin de garantir la sécurité et la durabilité de ces structures naturelles, il est indispensable de procéder à une analyse rigoureuse de leur stabilité. Pour ce faire, différentes approches peuvent être mobilisées, notamment les méthodes analytiques et les méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis (MEF).

Ce dernier chapitre s'inscrit dans cette démarche et propose une étude comparative entre les deux approches. Pour la partie analytique, nous avons utilisé le logiciel GEO5, qui met en œuvre plusieurs méthodes classiques de calcul de stabilité des pentes (telles que celles de Bishop, Fellenius, Janbu, etc.). Pour la modélisation numérique, nous avons eu recours au logiciel Plaxis 2D, un outil numérique robuste fondé sur la méthode des éléments finis (MEF), permettant une représentation plus détaillée du comportement mécanique du sol et de la propagation des contraintes.

Cette comparaison porte principalement sur deux critères : la géométrie du cercle de glissement critique et le coefficient de sécurité obtenu pour chaque méthode. Cette étude est appliquée au cas concret de la falaise d'Oran, ce qui permet de confronter les

résultats des deux approches à un contexte géotechnique réel. L'objectif est de déterminer quelle méthode fournit les résultats les plus fiables et représentatifs en vue d'assurer une stabilisation optimale.

Le site d'étude se situe à la Cité Ibn Rochd – Lieu-dit Les Falaises, dans la ville d'Oran. Il est concerné par la construction d'un projet multifonctionnel de grande envergure, comprenant un immeuble de type R+35, avec deux niveaux d'entresol et quatre niveaux de sous-sol. Ce projet implique des sollicitations importantes sur le terrain naturel, rendant cruciale l'évaluation précise de la stabilité de la falaise avant toute intervention.

### 3.2 Présentation du site du projet d'étude

Le terrain est situé au niveau de la Cité ibn Rochd – lieu-dit les falaises, dans la ville d'Oran. Le terrain est relativement plats, il surplombe, une falaise d'en moins 80 m de hauteur (figure 3.1).

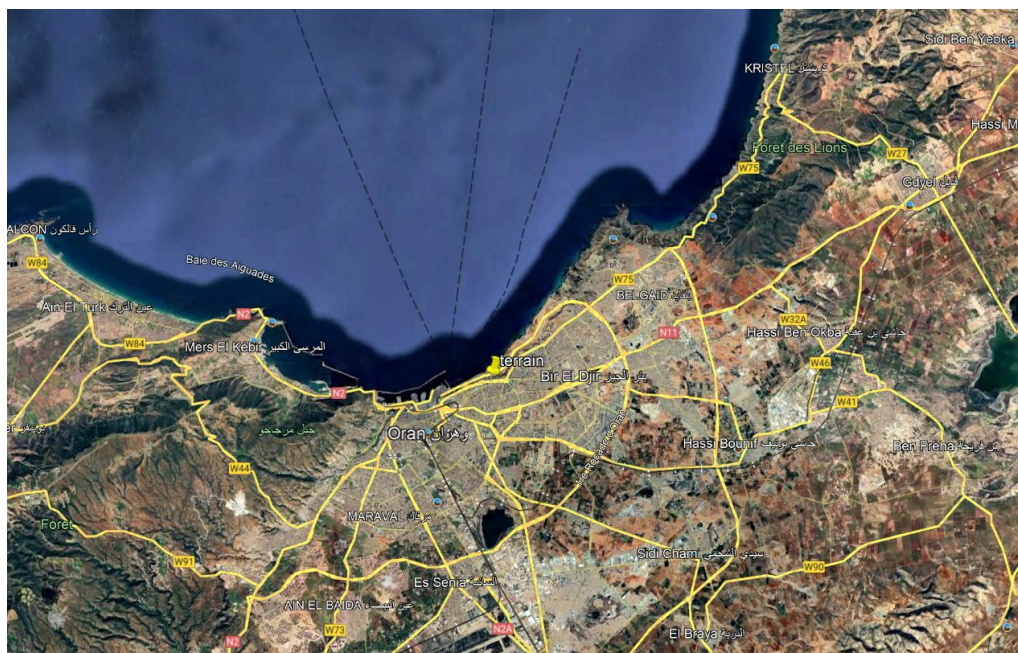
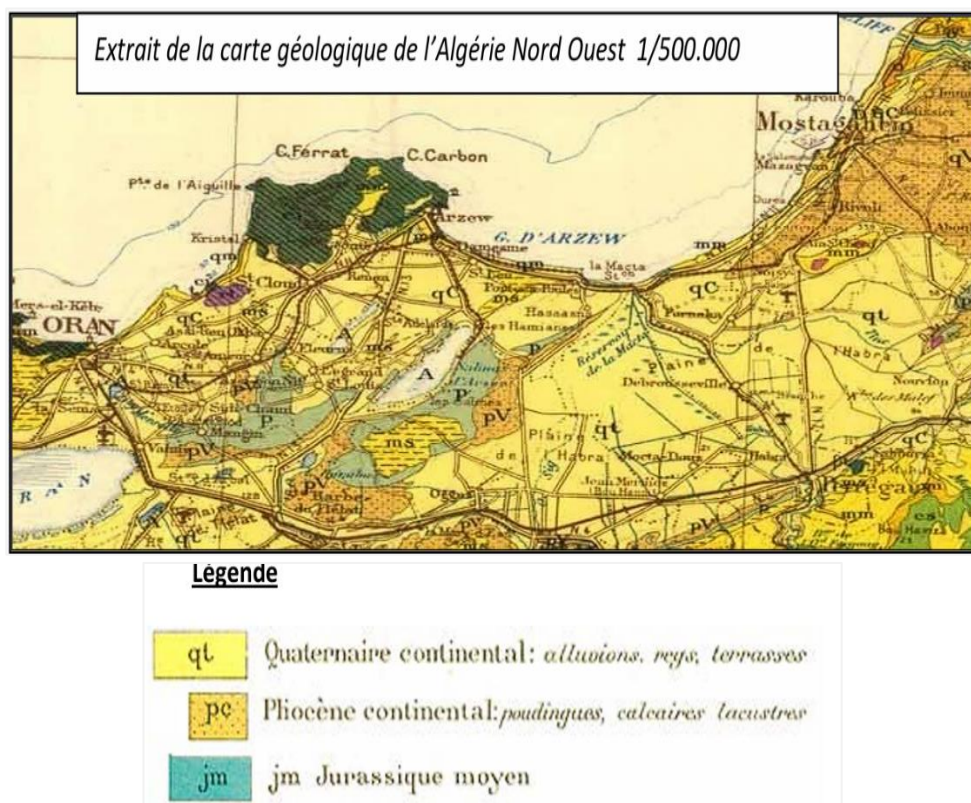


Figure 3.1 Plane de situation de la falaise

#### 3.2.1 Contexte géologique du site

D'après la carte géologique de l'Algérie Nord-Ouest à l'échelle 1/500 000, la région d'ORAN est caractérisée par l'affleurement des formations suivantes (Figure 3.2) :

1. Le Quaternaire : Il est constitué de dépôts non consolidés, incluant des encroûtements calcaires, des travertins à débris végétaux, ainsi que des sols rouges. L'épaisseur de ces formations est généralement métrique.
2. Le Pliocène : Cet ensemble présente des faciès discontinus. On y observe des conglomérats polygéniques, dont les éléments proviennent de roches d'âge triasique à cénomanien, ainsi que des calcaires lacustres à Gastéropodes et des marnes vertes à grises.
3. Le Jurassique : Les formations jurassiques constituent la majeure partie des affleurements observés dans la région d'Oran. On y rencontre le Groupe Carbonaté Inférieur (Jurassique inférieur et moyen), composé de trois formations à dominante calcaire, classées de bas en haut :
  - La Formation carbonatée du Lias inférieur à moyen,
  - La Formation des marnes du Lias supérieur,
  - La Formation des calcaires de l'Aalénien-Bajocien.

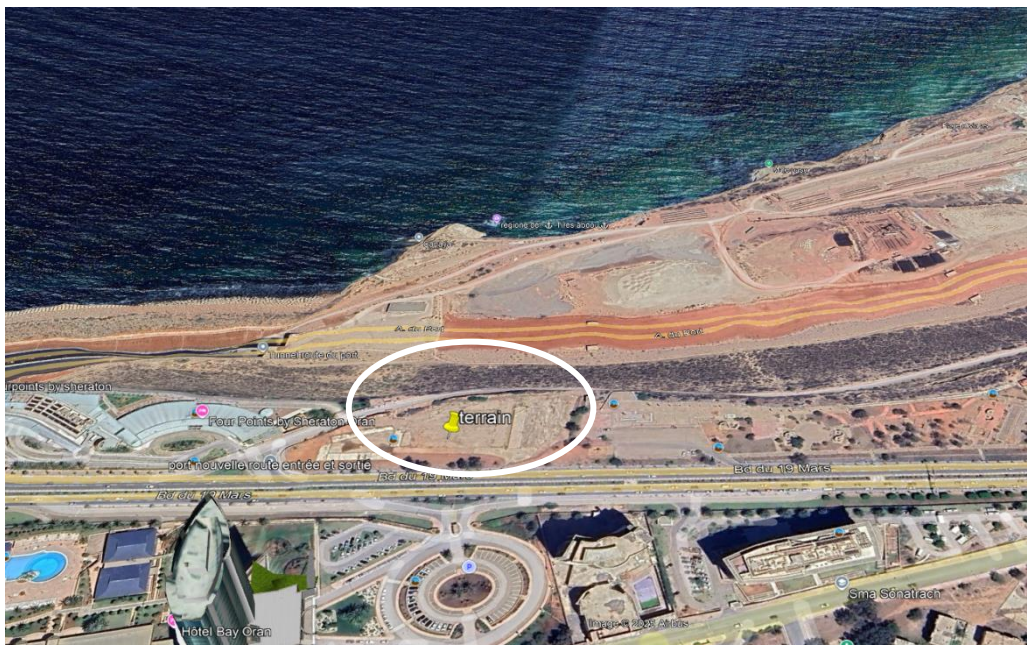


**Figure 3.2** Extrait de la carte géologique de l'Algérie Nord-Ouest 1/500.000

Les photos prises sur le site, ainsi que des images extraites de Google Earth, sont regroupées respectivement aux figures (3.3) et (3.4).



**Figure 3.3** Photos de terrain



**Figure 3.4** Emplacement du site du projet (Google Earth)

### 3.2.2 Description géotechnique et conditions du site

Dans le rapport géotechnique, il a été mis en évidence que quatre sondages carottés, d'une profondeur de 40 à 60 m, ont été réalisés afin de permettre une reconnaissance détaillée des conditions géologiques du site.

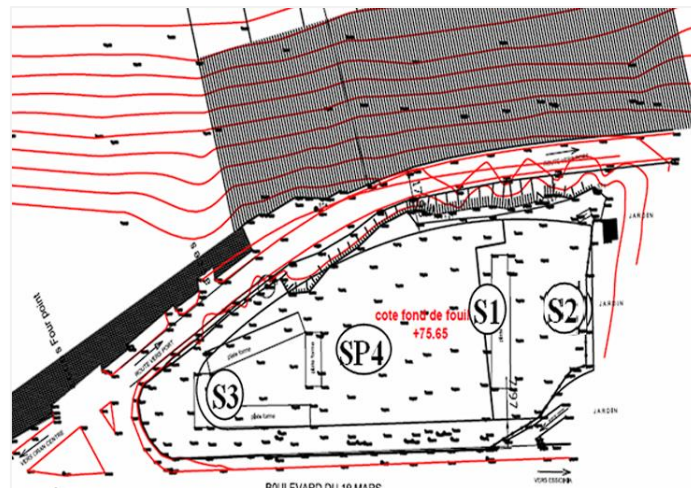
Les analyses des carottes issues des sondages réalisés ont permis d'établir la géologie du site, en mettant en évidence la lithologie des terrains traversés en profondeur ainsi que leurs épaisseurs. Les logs géologiques des sondages ont révélé, depuis la surface, la succession lithologique suivante (Figure 3.5):

1. Un remblai d'une épaisseur d'environ 40 cm.
2. Sable siliceux compact : cette couche, observée dans les sondages, est constituée d'un sable siliceux dense, de couleur beige à jaunâtre, contenant un peu de limon et quelques traces de gravier. Elle apparaît en intercalation avec des grès calcaires. Ce sable présente les caractéristiques suivantes :
3. Roche de grès calcaire, friable à fracturée, de couleur beige à jaunâtre. Rencontrée à différentes profondeurs jusqu'à la fin des sondages.



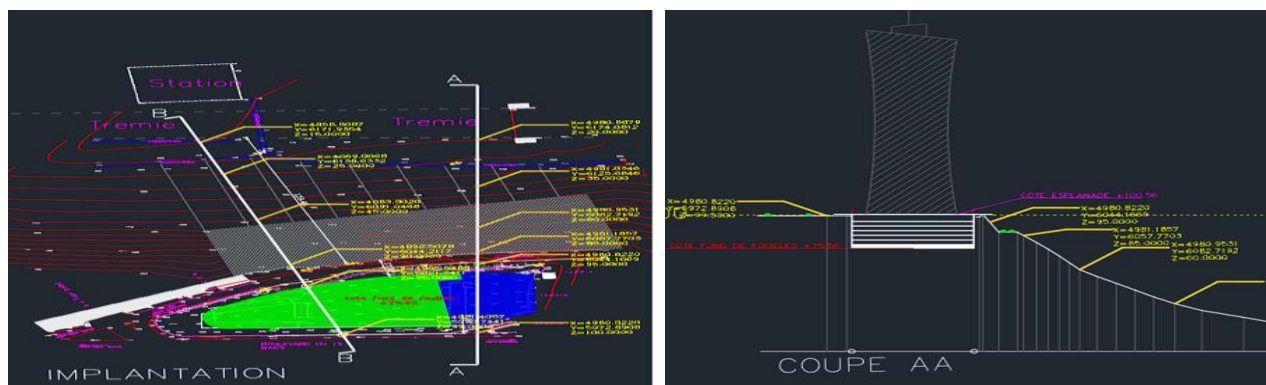
**Figure 3.5** Principales terrains trouvés sur le site (E.U.R.L- L.E.G)

Les quatre sondages sont numérotés S1, S2, S3 et SP4 et ont été réalisés durant le mois d'Octobre 2024 au sommet de la falaise dans le cadre de l'étude de terrain, comme l'illustre la figure 3.6.



**Figure 3.6** Positionnement des sondages (E.U.R.L- L.E.G)

Toutefois, en raison de contraintes temporelles, seul le sondage S1 a été retenu pour notre étude. Les données recueillies ont permis d'établir la coupe AA (figure 3.7), qui a ensuite servi comme référence pour l'ensemble des analyses menées dans ce mémoire. Les autres sondages, bien que pertinents, n'ont pas été exploités dans le présent travail.

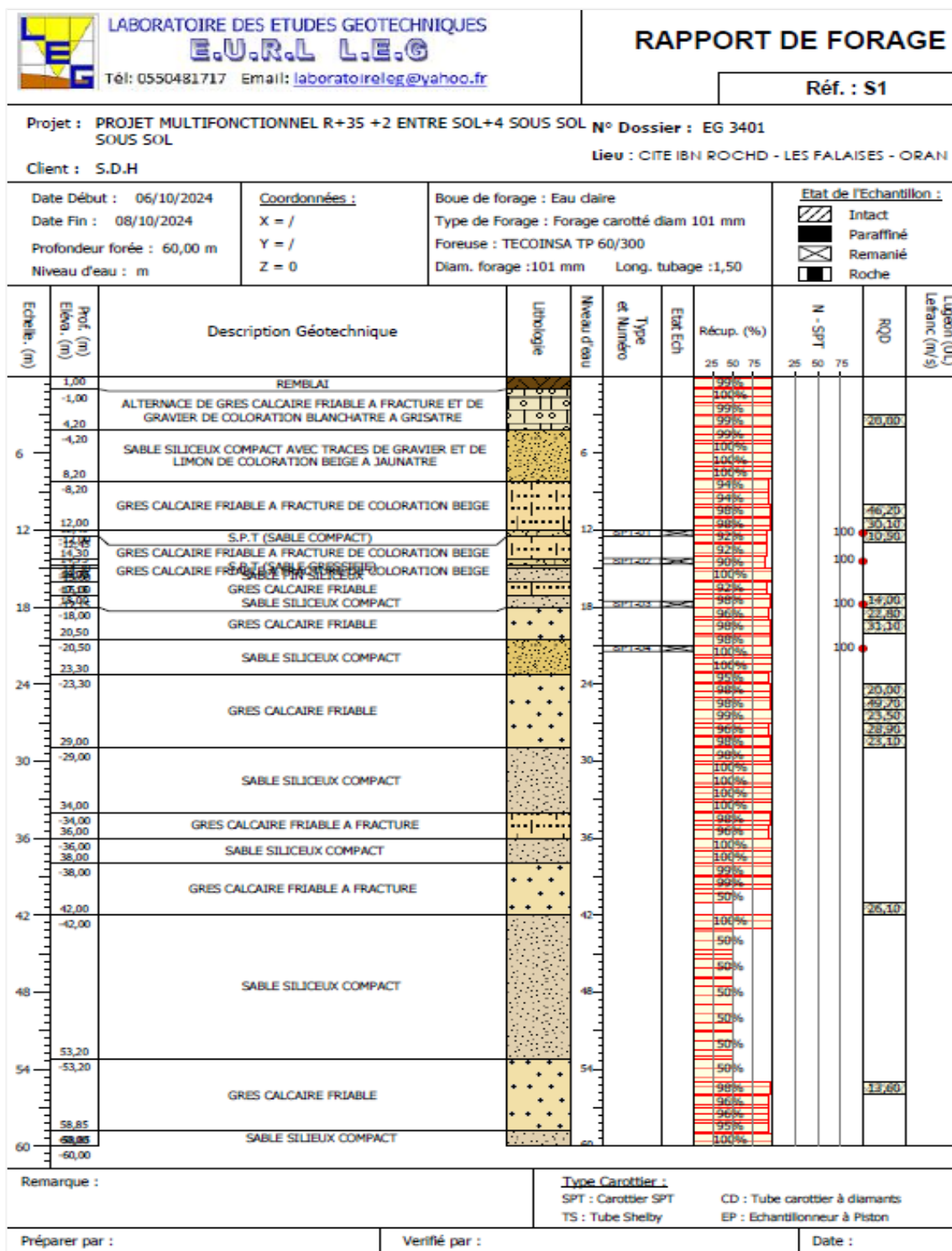


**Figure 3.7** Coupe AA  
(Rapport du Laboratoire des Études Géotechniques (E.U.R.L- L.E.G))

L'échantillonnage des sols a été effectué en continu tous les 1.5 m à l'aide d'un carottier de type T6 de 101 mm de diamètre.

Les échantillons remaniés et intacts ont été prélevés à différentes profondeurs avec un taux de récupération acceptable, pour l'exécution des essais géotechniques en laboratoire de type mécanique et physique.

La lithologie du site est illustrée sur a figure (3.8).



**Figure 3.8** Rapport du sondage (S1)  
 (Laboratoire des Études Géotechniques (E.U.R.L- L.E.G))

### 3.3 Méthodologie d'analyse- Approche numérique et analytique

Dans cette étude, la stabilité de la falaise est analysée par une démarche comparative combinant modélisation numérique et approche analytique. La modélisation numérique, réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, permet de simuler avec une grande précision les interactions complexes entre les différentes couches de sol, les conditions spécifiques au site, ainsi que la géométrie réelle de la falaise.

Grâce à la méthode des éléments finis, Plaxis 2D prend en compte les propriétés non linéaires des matériaux, la variation des pressions interstitielles, ainsi que les séquences de chargement, offrant ainsi une représentation fidèle du comportement mécanique du massif sous contrainte.

Cette approche permet de visualiser la distribution des déformations et des contraintes, ainsi que d'identifier les mécanismes potentiels de rupture dans le massif.

À l'opposé, l'approche analytique, mise en œuvre dans le logiciel GEO5, repose sur des méthodes d'équilibre limite classiques, telles que celles de Bishop, Fellenius ou Janbu entre autres.

Ces méthodes, bien que basées sur des hypothèses simplificatrices (notamment l'hypothèse de surfaces de rupture circulaires ou non, et de contraintes homogènes) constituent des outils rapides et vérifiés pour l'évaluation initiale de la stabilité des pentes. GEO5 permet ainsi de calculer les facteurs de sécurité associés à différentes surfaces de glissement, facilitant une première estimation fiable dans un délai court.

L'utilisation conjointe de ces deux logiciels permet de combiner la rigueur et la précision d'une modélisation numérique avancée avec la rapidité et la simplicité d'une analyse analytique. Cette complémentarité facilite la validation croisée des résultats, renforçant la puissance de l'évaluation de la stabilité de la falaise.

Ainsi, cette double approche assure une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et permet d'orienter efficacement les décisions relatives à la conception des mesures de stabilisation.

### 3.2.1 Conditions aux limites

Pour garantir une modélisation réaliste tout en limitant les effets de bord, nous avons choisi des limites latérales du domaine modélisé bloquées horizontalement ( $U_x = 0$ ), et laissées libres verticalement ( $U_y \neq 0$ ), afin de reproduire les conditions naturelles d'extension latérale. La base du domaine est bloquée dans les deux directions ( $U_x = U_y = 0$ ), représentant le substratum.

### 3.2.2 Conditions de chargement

La charge principale prise en compte est le poids propre du sol, calculé automatiquement à partir des propriétés géotechniques définies.

Une surcharge surfacique a été appliquée au niveau de la crête de la falaise (avec une pression de  $225 \text{ kN/m}^2$ ), simulant un projet multifonctionnel d'envergure, comprenant un immeuble de type R+35, avec deux niveaux d'entresol et quatre niveaux de sous-sol.

### 3.2.3 Modèle de comportement du sol

Le modèle Mohr-Coulomb a été retenu pour décrire le comportement mécanique des sols. Il s'agit d'un modèle élasto-plastique largement utilisé en géotechnique, qui repose sur les paramètres suivants :

Module d'Young ( $E$ ) : traduit la rigidité du matériau.

Coefficient de Poisson ( $\nu$ ) : reflète la compressibilité transversale.

Cohésion ( $c$ ) : désigne la cohésion du terrain.

Angle de frottement interne ( $\phi$ ) : paramètre essentiel dans la résistance au glissement.

Poids volumique ( $\gamma$ ) : influence les charges internes dans le massif.

Ce modèle permet de simuler de façon satisfaisante les conditions de rupture et le comportement global du sol dans le cas de falaises, tout en restant simple à paramétrer à partir des données de laboratoire ou de terrain.

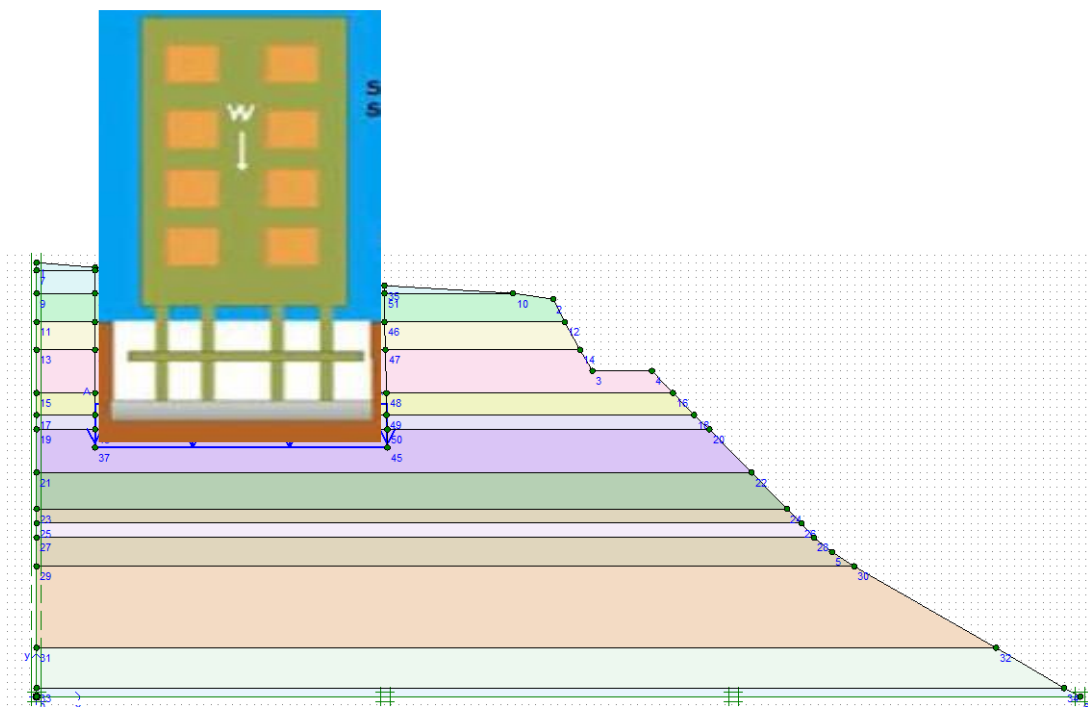
### 3.4 Présentation du modèle retenu pour les analyses

La géométrie de la falaise a été reconstituée à partir de données topographiques locales (figure 3.9).

Une coupe représentative (coupe AA, figure 3.7) a été sélectionnée pour les modélisations bidimensionnelles, en tenant compte de la hauteur de la falaise, de l'inclinaison des pentes et de la stratification des différentes couches géologiques. Ces éléments ont été intégrés dans le modèle numérique (figure 3.9).

La falaise est de hauteur totale estimée à 100 m. Toutefois, seule la partie supérieure sur 60 mètres a été prise en compte dans la modélisation, en raison des données disponibles limitées aux sondages. La pente moyenne observée est de 45°. L'immeuble de type R+35, avec deux niveaux d'entresol et quatre niveaux de sous-sol est supposé être réalisé en haut de la falaise.

Par ailleurs, les dimensions latérales et en profondeur du modèle ont été étendues de manière à limiter les effets de bord et à garantir la fiabilité des simulations.



**Figure 3.9** Modèle numérique retenu pour les simulations

---

Les caractéristiques physiques et mécaniques des sols extraites du rapport du Laboratoire des Études Géotechniques (E.U.R.L- L.E.G), ont servi de base à notre étude (tableau 3.1).

<b>Couches de terrain</b>	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	C (kN/m <sup>2</sup> )
Alternance de grès calcaire friable a fracture et de gravier de coloration blanchâtre a grisâtre	23.4	30	1060625	0,35	60
Sable siliceux compact avec traces de gravier et de limon de coloration beige a jaunâtre	19.9	32,96	200000	0,3	3
Grès calcaire friable à fracture de coloration beige	23	30	1275750	0,35	69
S.p.t (sable compact)	19.7	23,61	200000	0,3	5
Grès calcaire friable	24	30	2065000	0,35	80
Sable siliceux compact	19.5	30,94	200000	0,35	7
Grès calcaire friable	23.8	35	1781625	0,35	75
Sable siliceux compact	19.9	26,03	200000	0,3	4
Grès calcaire friable	23.6	35	1121000	0,35	62
Sable siliceux compact	19.3	24,54	200000	0,3	2
Grès calcaire friable à fracture	23,5	30	1238500	0,35	64
Sable siliceux compact	19,4	22,34	200000	0,3	9
Grès calcaire friable	21,9	35	1418875	0,35	68
Sable siliceux compact	19,4	26,56	200000	0,3	5

## 3.5 Implémentation numérique dans Plaxis 2D pour l'analyse du site

### 3.5.1 Discrétisation et maillage

Le domaine de calcul a été discrétisé à l'aide d'un maillage triangulaire à 15 nœuds, généré automatiquement par le logiciel Plaxis 2D. La taille des éléments a été optimisée de manière à garantir un bon compromis entre la précision des résultats et un temps de calcul raisonnable. Le maillage est représenté sur la figure (3.10) avec 460 éléments et 3817 nœuds.

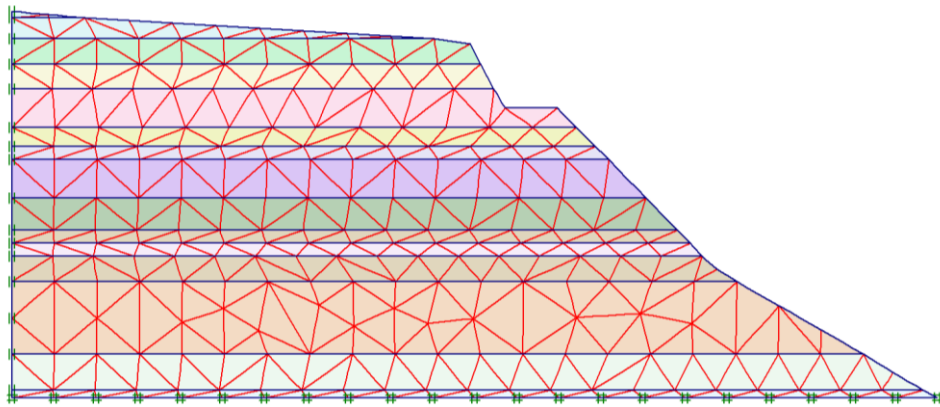


Figure 3.10 Maillage de modèle - Plaxis 2D

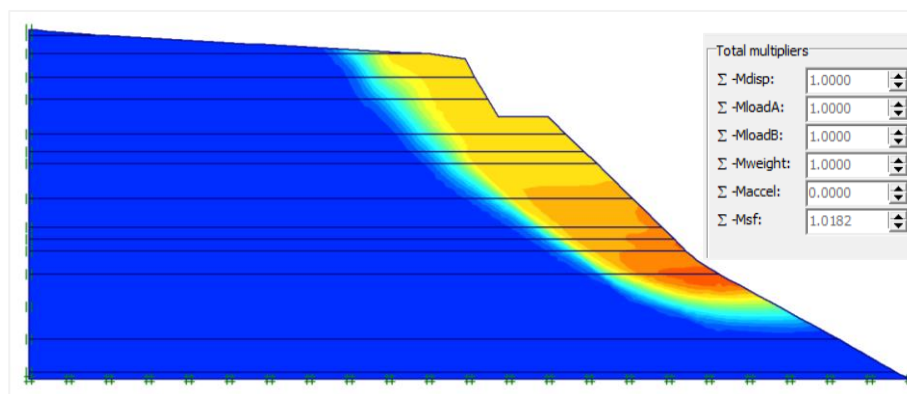
### 3.5.2 Analyse de la stabilité de la falaise sous son propre poids

Dans cette première étape, la stabilité de la falaise a été analysée en considérant uniquement le poids propre des matériaux en place, sans ajout de surcharge externe et a été réalisée à l'aide de Plaxis 2D en premier temps. Cette configuration représente l'état naturel du versant, permettant de dresser un diagnostic initial des risques de glissement liés aux caractéristiques géotechniques du site.

La simulation a mis en évidence une zone de faiblesse localisée dans la partie médiane de la falaise, coïncidant avec une interface entre deux couches de propriétés mécaniques

contrastées. Le mécanisme de rupture identifié est caractérisé par un glissement circulaire (Figure 3.11).

En parallèle, l'analyse de stabilité a conduit à un coefficient de sécurité d'environ 1,018, ce qui indique une situation proche de la limite d'équilibre. Une faible variation des conditions hydromécaniques ou une sollicitation supplémentaire telle que la construction de l'immeuble projeté pourrait suffire à compromettre la stabilité de l'ensemble.



**Figure 3.11** Stabilité de la falaise sous son propre poids- Plaxis 2D  
Cercle de glissement- Coefficient de sécurité

Ce résultat souligne la nécessité de prévoir des mesures de renforcement avant l'implantation de l'immeuble. C'est dans ce but que nous avons étudié l'effet d'appliquer des solutions de stabilisation telles que la mise en place de tirants d'ancrage et l'application de béton projeté sur la face de la falaise, en vue de stabiliser la falaise avant d'entamer la construction du bâtiment.

### 3.6 Technique de stabilisation de la falaise-Plaxis 2D

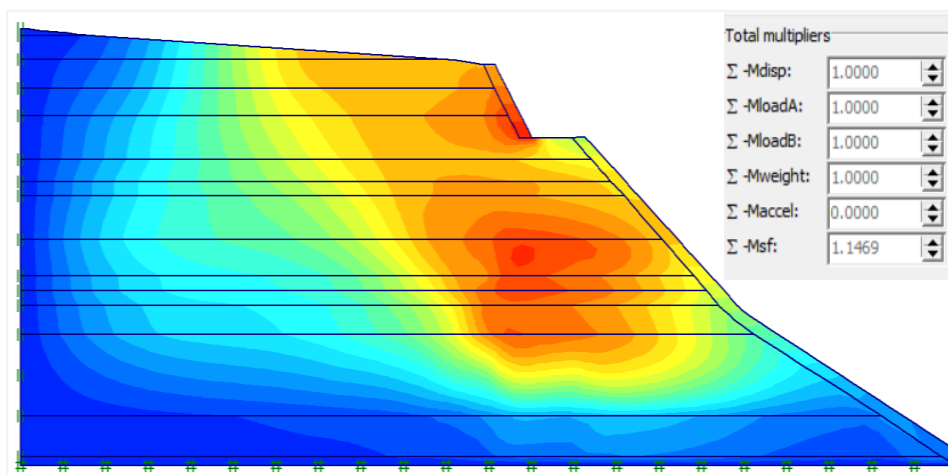
#### 3.6.1 Béton projeté seule

La première solution proposée pour stabiliser la falaise rocheuse est l'utilisation du béton projeté. Cette technique consiste à projeter du béton sous pression directement sur la surface rocheuse, ce qui permet de renforcer la paroi sans avoir besoin de coffrage. Elle

est particulièrement adaptée aux terrains irréguliers et difficiles d'accès comme les falaises.

La falaise présente un facteur de sécurité de  $F_s = 1,15$  (Figure 3.12), ce qui traduit une situation encore instable, bien que ce niveau soit supérieur à celui obtenu sous le seul poids propre.

Le béton projeté, bien qu'efficace pour le traitement des parois rocheuses en surface, reste insuffisant à lui seul pour garantir la stabilité globale de la structure. Il contribue à améliorer la cohésion superficielle, à limiter l'érosion et à réduire les infiltrations d'eau, mais n'agit pas sur les efforts profonds responsables des mécanismes de glissement internes



**Figure 3.12** Stabilité de la falaise : Béton Projeté -Plaxis 2D  
Cercle de glissement- Coefficient de sécurité

Pour cette raison, des tirants d'ancrage ont été ajoutés le long de la falaise. Ces tirants permettent de renforcer la masse rocheuse en profondeur, en la reliant aux zones stables du sous-sol. Combinés au béton projeté, ils assurent une stabilisation efficace en agissant à la fois en surface et en profondeur.

### 3.6.2 Tirants d'ancrages avec béton projeté

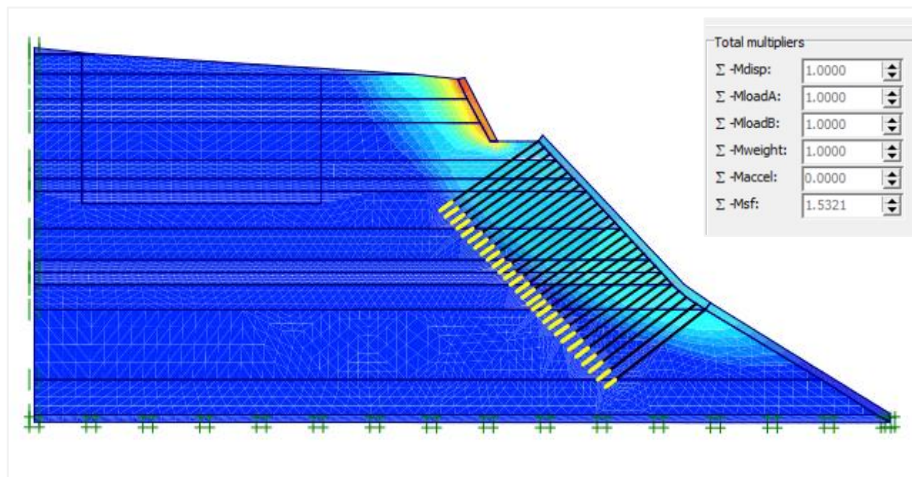
La solution retenue, adaptée aux contraintes géotechniques du site, associe la mise en place de tirants d'ancrage à l'application de béton projeté pour stabiliser efficacement la falaise (voir figure 3.13). Vingt-huit tirants de 20 m de long, espacés régulièrement de 1m, ont été installés, chacun soumis à une traction de 500 kN ( $EA=1055 \text{ MN}=1.055 \cdot 10^6 \text{ KN}$ ) sous une inclinaison de 33°. Cette configuration assure un renforcement en profondeur de la masse rocheuse, tandis que le béton projeté protège la surface.

Le système agit simultanément sur la cohésion interne de la falaise et sur sa résistance aux sollicitations externes. Il renforce les couches superficielles et garantit une stabilité suffisante pour le lancement du projet. Les analyses ont révélé une instabilité marquée dans les zones supérieures, en raison de leur hétérogénéité et de leur vulnérabilité à la saturation.

Les tirants notamment permettent de transférer les efforts vers des couches plus profondes et plus résistantes. Le béton projeté, d'une épaisseur de 30 cm, améliore la cohésion en surface, limite la dégradation des matériaux et réduit l'infiltration d'eau. Cette solution technique ciblée a été validée par des simulations numériques menées avec Plaxis 2D.

Bien que les recommandations classiques préconisent des longueurs de tirants représentant 60 % à 80 % de la hauteur du talus, les calculs ont montré qu'une longueur de 20 m suffisait à assurer la stabilité globale, avec un coefficient de sécurité satisfaisant ( $FS = 1,53$ ).

Les tirants, positionnés au-delà de la surface de glissement et ancrés dans un horizon géotechniquement sain, garantissent une bonne reprise des efforts. Ces résultats confirment l'efficacité d'un dimensionnement optimisé, combinant ancrages et béton projeté, même avec des longueurs inférieures aux ratios empiriques. Ce résultat met en évidence l'efficacité d'un ancrage bien dimensionné combiné à du béton projeté, même à une longueur inférieure aux ratios empiriques classiques, dans un contexte géologique particulier.



**Figure 3.13** Solutions de stabilisation : Béton Projeté et Tirants d'ancrage- Plaxis 2D  
Cercle de glissement- Coefficient de sécurité

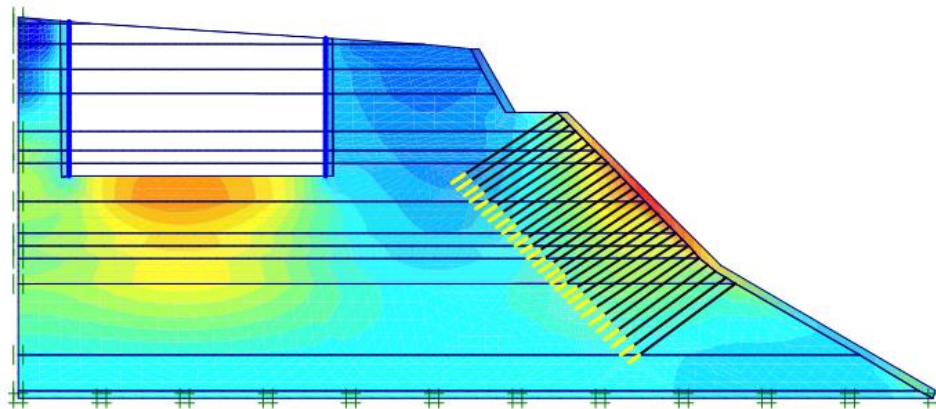
### 3.6.3 Réalisation de l'immeuble de R+35- Plaxis 2D

Enfin, dans un troisième temps, l'impact de la construction d'un immeuble de type R+35, incluant plusieurs niveaux de sous-sol, sera intégré aux simulations. Cette phase vise à évaluer l'influence globale du projet sur la stabilité de la falaise.

L'analyse se déroulera en deux étapes : d'abord, l'excavation des sous-sols sera simulée afin d'observer la réponse de la falaise à ces fouilles ; ensuite, l'effet de la surcharge induite par l'immeuble sera pris en compte pour apprécier son influence sur l'équilibre du versant.

Pour la première étape, les résultats sont présentés à la figure (3.14). Des déplacements significatifs ont été observés, ce qui est cohérent compte tenu de l'ampleur des fouilles réalisées.

Afin de limiter ces déformations et de stabiliser les parois excavées, un revêtement en béton projeté d'épaisseur de 30cm a été appliqué, complété par la mise en place d'un mur de soutènement avec une épaisseur 1m avec un module de rigidité égale à 30 GPa .

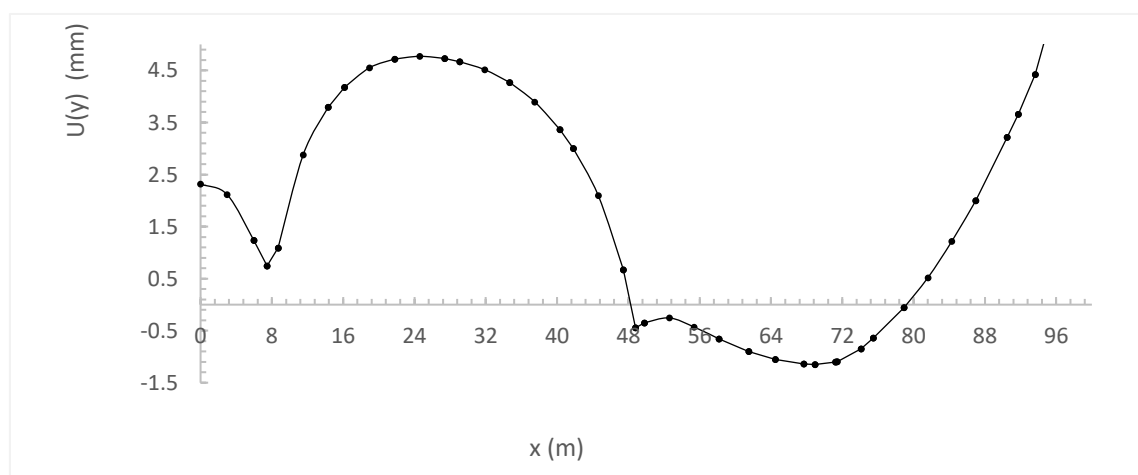


**Figure 3.14** Tassement au niveau de fouille- Plaxis 2D

Pour la deuxième étape, la construction de l'immeuble a donné les résultats montrés sur la figure (3.15). Cette dernière met en évidence deux comportements distincts du sol autour de la fouille.

Entre 8 m et 48 m, on observe un soulèvement du sol. Cette zone correspond à l'excavation profonde de 25 m, où un mur de soutènement avec béton projeté a été mis en place. Le creusement provoque un relâchement des contraintes, ce qui entraîne une remontée du sol en surface par décompression.

En dehors de cette zone, avant 8 m et après 48 m, le sol subit un tassement. Ce tassement résulte du déplacement latéral du sol vers la fouille ou de la redistribution des charges autour du mur. Il s'agit comportement typique des excavations profondes avec soutènement rigide.



**Figure 3.15** Tassement causé par la réalisation de l'immeuble

### 3.7 Analyse numérique de la falaise à l'aide du logiciel Geo5- Slope Stability

#### 3.7.1 Analyse de la stabilité de la falaise sous son propre poids

Une analyse complémentaire de la stabilité du site a été réalisée à l'aide du logiciel GEO5-Slope Stability (figure 3.16), qui permet d'évaluer le facteur de sécurité global d'un versant à partir de différentes méthodes analytiques de type limite.

Cette approche permet notamment de détecter les surfaces de glissement les plus critiques et d'examiner les zones à risque sur la base des propriétés géotechniques des différentes couches du sol.

L'étude a été conduite sur le profil topographique réel de la falaise, intégrant les variations lithologiques et les couches géotechniquement défavorables. GEO5 a été utilisé pour modéliser plusieurs scénarios de glissement, en appliquant les méthodes classiques suivantes : Bishop, Fellenius/Petterson, Spencer, Janbu, et Morgenstern-Price.

Ces méthodes permettent de vérifier la cohérence des résultats, en tenant compte à la fois de l'équilibre global des forces et des moments.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 3.2 :

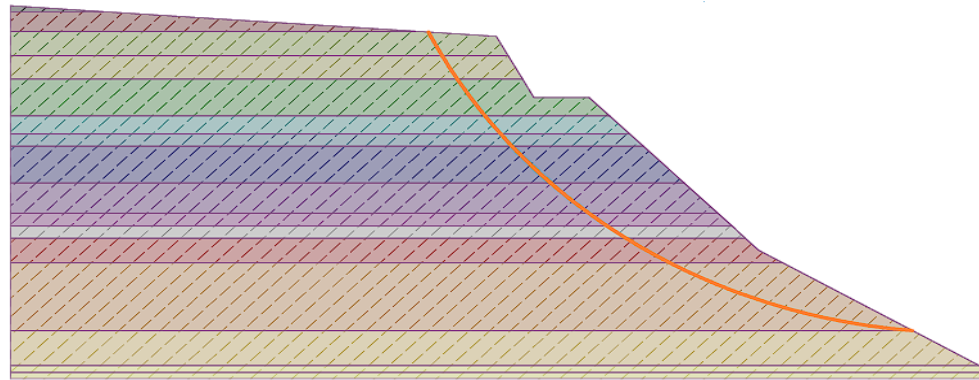
**Tableau 3.2** Vérification de la stabilité (selon plusieurs méthodes)

Méthodes	Facteur de sécurité (FS)	Acceptabilité
<b>Bishop</b>	$F_S = 1,01 < 1,50$	Non acceptable
<b>Fellenius / Petterson</b>	$F_S = 0,98 < 1,50$	Non acceptable
<b>Spencer</b>	$F_S = 1,01 < 1,50$	Non acceptable
<b>Janbu</b>	$F_S = 1,01 < 1,50$	Non acceptable
<b>Morgenstern-Price</b>	$F_S = 1,01 < 1,50$	Non acceptable

Ces résultats confirment la nécessité impérieuse de mettre en place des mesures de stabilisation.

Cette figure met en évidence la zone instable simulée, avec le cercle de rupture passant par les interfaces géotechniquement faibles. Elle confirme les résultats numériques

obtenus dans le tableau 3.3, en illustrant la configuration géométrique défavorable du versant.



**Figure 3.16** Stabilité de la falaise sous son propre poids- Geo5  
Cercle de glissement

Comme pour les simulations réalisées avec Plaxis 2D, les résultats obtenus via GEO5, issus de différentes méthodes analytiques, confirment une situation d'instabilité du versant dans son état initial.

Le facteur de sécurité demeure inférieur au seuil minimal requis de 1,50, quelle que soit la méthode utilisée. Les zones les plus critiques se situent principalement dans les secteurs à forte pente, proches de discontinuités géologiques ou de transitions lithologiques marquées.

Ces constats soulignent l'urgence de mettre en œuvre des mesures de stabilisation, comme celles déjà étudiées avec Plaxis 2D. Ainsi, les résultats fournis par GEO5 viennent compléter et renforcer le diagnostic global d'instabilité établi grâce à Plaxis 2D.

### 3.7.2 Technique de stabilisation de la falaise- Geo5

Dans cette partie, les mêmes techniques de stabilisation que celles adoptées dans les simulations Plaxis 2D ont été partiellement reprises dans le logiciel GEO5. L'objectif est d'évaluer l'efficacité des dispositifs de renforcement à l'aide d'une approche analytique complémentaire.

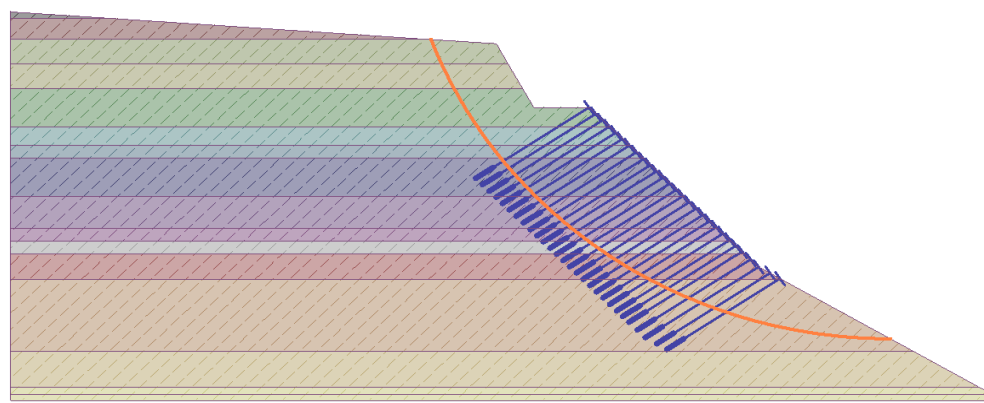
Les mesures mises en œuvre incluent uniquement la mise en place de tirants d'ancrage de 20 m de longueur, inclinés à 33°, espacés de 1 mètre, et sollicités à un effort de 500 kN chacun. Ces tirants ont pour fonction de transférer les charges vers des couches plus profondes et plus résistantes.

Le logiciel a permis évaluer l'effet des tirants sur diverses surfaces de glissement potentielles à l'aide de plusieurs méthodes de calcul (Bishop, Janbu, Spencer, etc.).

GEO5 ne permet pas de modéliser explicitement le béton projeté en tant qu'élément structural de surface. Par conséquent, seule la contribution des tirants a été simulée dans cette analyse. L'effet du béton projeté, bien que crucial pour le renforcement superficiel, n'a pu être évalué que dans les modélisations menées avec Plaxis 2D, qui permet une représentation plus détaillée des revêtements structuraux et de leur interaction avec le sol.

Les résultats (figure 3.16) obtenus montrent une amélioration significative du facteur de sécurité par rapport à l'état initial. Les valeurs calculées dépassent largement le seuil critique requis (voir tableau 3.3), ce qui confirme l'efficacité des tirants d'ancrage implémentés.

Ces résultats soulignent la pertinence des choix de stabilisation adoptés et démontrent que, malgré les limites du logiciel (notamment l'impossibilité de modéliser le béton projeté), la configuration retenue permet d'assurer la stabilité globale de la falaise.



**Figure 3.17** Solutions de stabilisation : Tirants d'ancrage- Geo5  
Cercle de glissement

On observe une variation notable entre les valeurs des facteurs de sécurité obtenus selon les différentes méthodes analytiques implémentées dans GEO5. Cette disparité s'explique par les niveaux de simplification et les hypothèses propres à chaque méthode.

Par exemple, les approches de Fellenius ou de Janbu supposent une distribution simplifiée des forces internes et des interactions entre les tranches de sol, ce qui peut conduire à une sous-estimation ou, dans certains cas, à une surestimation du facteur de sécurité.

En revanche, des méthodes plus rigoureuses comme celles de Spencer ou de Morgenstern-Price prennent en compte l'équilibre simultané des forces et des moments, offrant ainsi des résultats généralement plus cohérents et fiables. Cette diversité de résultats justifie l'intérêt de comparer plusieurs approches pour établir un diagnostic de stabilité robuste et représentatif.

**Tableau 3.3** Vérification de la stabilité de la pente

Méthodes analytiques	Facteur de sécurité ( $F_s$ )	Évaluation
<b>Bishop</b>	$F_s = 1,73 > 1,50$	Acceptable
<b>Fellenius / Petterson</b>	$F_s = 1,59 > 1,50$	Acceptable
<b>Spencer</b>	$F_s = 2,34 > 1,50$	Acceptable
<b>Janbu</b>	$F_s = 2,34 > 1,50$	Acceptable
<b>Morgenstern-Price</b>	$F_s = 2,34 > 1,50$	Acceptable

### 3.7.3 Réalisation de l'immeuble de R+35- Geo5

La falaise a été jugée stable dans les phases précédentes. Nous avons donc poursuivi l'étude en vérifiant sa stabilité dans des conditions plus contraignantes.

Deux cas ont été analysés : l'excavation de la fouille, puis l'application d'un chargement dû à la construction d'un bâtiment avec une pression de 225 kN/m<sup>2</sup>. Cette démarche permet de s'assurer que la pente conserve un facteur de sécurité suffisant même en présence de sollicitations supplémentaires liées aux travaux.

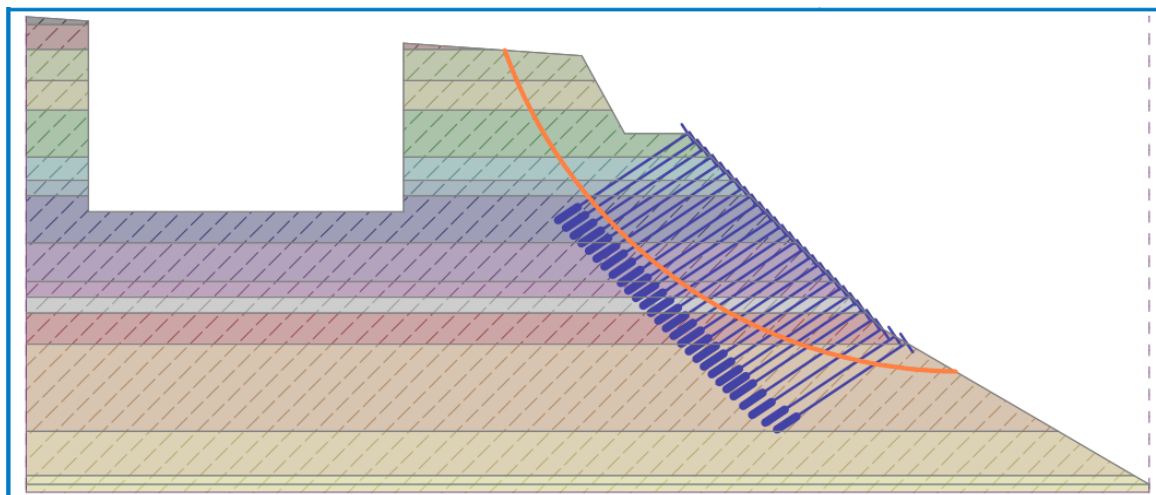


Figure 3.18 Cercle de glissement dans la phase d'excavation

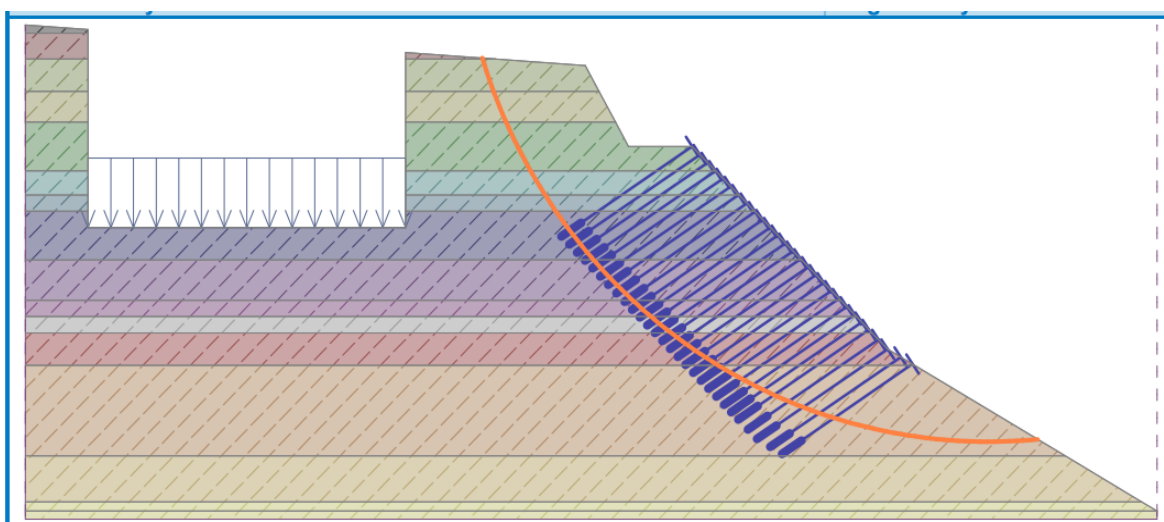


Figure 3.19 Cercle de glissement dans la phase de surcharge de bâtiment

Tableau (3.4) étude comparative entre FS après et avant surcharge

Méthode	FS Phase excavation	FS Phase de surcharge	Variation
Bishop	2.35	1.67	-0.68
Fellenius / Petterson	2.27	1.59	-0.68

### 3.8 Etude comparative entre les deux logiciels-Plaxis 2D vs Geo5

L'analyse de la stabilité de la falaise a été réalisée à l'aide de deux outils numériques complémentaires : Plaxis 2D, basé sur la méthode des éléments finis (FEM), et Geo5, fondé sur les méthodes classiques de l'équilibre limite. Chacun de ces logiciels apporte

une vision différente et utile du comportement de la pente dans son état initial puis après renforcement.

Plaxis 2D permet une modélisation géomécanique avancée, intégrant le comportement non linéaire des matériaux, Les interactions sol-structure, la possibilité de visualiser les déformations progressives, les mécanismes de rupture, ainsi que la performance des dispositifs de renforcement (tirants, béton projeté).

À l'inverse, Geo5 repose sur des méthodes analytiques classiques (Bishop, Fellenius, Spencer, Janbu, Morgenstern-Price), plus rapides à mettre en œuvre, mais moins précises car basées sur des hypothèses simplifiées. Ce logiciel est particulièrement utile pour une vérification rapide de la stabilité, l'identification des surfaces de glissement critiques, la comparaison de plusieurs scénarios sans passer par un maillage complexe ou un couplage hydromécanique.

Avant stabilisation, les deux logiciels indiquent une situation critique (tableau 3.5 )

**Tableau (3.5)** Etude comparative avant stabilisation : Plaxis 2D vs Geo5

Logiciel utilisé	Méthode d'analyse	Facteur de sécurité (FS)
<b>Plaxis 2D</b>	Éléments finis	1,018
<b>Geo5</b>	Bishop	≈ 1,01
	Fellenius / Petterson	≈ 1,01
	Spencer	≈ 1,01
	Janbu	≈ 1,01
	Morgenstern-Price	≈ 1,01

Ces valeurs, toutes inférieures au seuil requis de 1,50, soulignent l'instabilité du site.

Après stabilisation (mise en place des tirants d'ancrage et, dans Plaxis seulement, application du béton projeté), les facteurs de sécurité montrent une amélioration significative :

**Tableau 3.6** Etude comparative après stabilisation

Méthodes de calcul	Facteur de sécurité (FS)	Évaluation
Plaxis 2D	FS = 1,53	Acceptable
Geo5 - Fellenius	FS = 1,59	Acceptable
Geo5 - Bishop	FS = 1,73	Acceptable
Geo5 - Spencer	FS = 2,34	Acceptable
Geo5 - Janbu	FS = 2,34	Acceptable
Geo5 - Morgenstern-Price	FS = 2,34	Acceptable

La concordance entre Plaxis et Fellenius est particulièrement notable : malgré ses hypothèses simplifiées, la méthode de Fellenius donne un résultat identique à celui obtenu avec un modèle numérique avancé. Cela suggère qu'une approche simplifiée peut parfois suffire, à condition que les hypothèses soient bien adaptées au contexte géologique.

Les écarts entre méthodes analytiques s'expliquent par les différences d'hypothèses (équilibre moment/force, linéarité des surfaces de glissement, interactions internes).

Plaxis 2D capte les effets hydrauliques, les déformations différentielles et les contraintes locales, non pris en compte dans Geo5.

Geo5 reste cependant un outil précieux pour une approche préliminaire, rapide et robuste.

La confrontation des deux approches montre que :

- Plaxis 2D est plus précis, mais exige un calibrage rigoureux, un temps de calcul élevé et une expertise en modélisation.
- Geo5 est plus accessible, rapide et utile en phase de diagnostic ou de vérification multi-méthodes.

L'utilisation conjointe des deux outils permet d'obtenir une évaluation fiable et complète de la stabilité de la pente, en croisant modélisation détaillée et validation par méthodes

classiques. Cette double approche augmente la confiance dans les résultats et optimise la conception des mesures de renforcement.

### **3.9 CONCLUSION**

En conclusion, cette étude comparative entre l'approche analytique (via GEO5) et la modélisation numérique (via Plaxis 2D) appliquée à la falaise d'Oran met en évidence l'intérêt de combiner ces deux outils : GEO5 permet une évaluation rapide selon des méthodes classiques, tandis que Plaxis 2D offre une compréhension plus fine du comportement mécanique du sol.

Les résultats convergent vers un même diagnostic : la pente, initialement instable, retrouve une stabilité satisfaisante après mise en place des mesures de renforcement, notamment par l'utilisation de tirants d'ancrage. Cette convergence valide la fiabilité des méthodes employées et renforce la crédibilité des recommandations techniques.

A travers cette étude, nous avons mis en évidence que l'intégration conjointe d'approches analytiques et numériques constitue ainsi une démarche pertinente pour l'analyse de la stabilité des pentes en contexte géotechnique complexe, garantissant une meilleure sécurité des ouvrages à venir.

## CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire de fin d'étude a été réalisé dans le but d'analyser la stabilité des falaises dans la région d'Oran à l'aide d'approches numériques avancées, et de comparer les résultats issus de différentes méthodes afin de proposer des solutions de stabilisation efficaces et adaptées aux conditions locales. Il constitue une base solide pour une meilleure compréhension des phénomènes d'instabilité des falaises et offre des orientations concrètes pour des actions de stabilisation durables et préventives, en accord avec les réalités géotechniques du site.

Pour répondre à cet objectif, le travail a été structuré en deux volets complémentaires :

Une partie bibliographique, qui établit les bases théoriques et contextuelles, en abordant les caractéristiques des falaises, les mécanismes d'instabilité, les outils de surveillance, ainsi que les méthodes courantes de stabilisation ;

Une partie numérique, qui mobilise des outils de modélisation pour une évaluation détaillée de la stabilité des versants.

Trois chapitres ont marqué cette étude. Le premier chapitre définit les types de falaises, les mouvements de terrain, les risques associés, ainsi que les techniques de suivi et de stabilisation. Le deuxième chapitre expose les approches analytiques et numériques utilisées dans l'analyse de stabilité, en mettant en évidence leurs principes et limites. Le troisième chapitre applique la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel PLAXIS 2D et confronte les résultats obtenus avec ceux du logiciel GEO5. Cette démarche s'appuie sur des données géotechniques réelles et propose des solutions concrètes de renforcement.

Les résultats ont révélé une instabilité marquée de la falaise à l'état initial. Une solution combinant tirants d'ancrage et béton projeté a été proposée, permettant d'atteindre un facteur de sécurité supérieur à 1,5, seuil couramment admis pour garantir la stabilité.

Cette intervention a pris tout son sens dans le contexte du projet de construction d'un immeuble R+35, comprenant quatre niveaux de sous-sol en tête de falaise, impliquant une excavation profonde jusqu'à 25 m et la mise en place du radier. La surcharge importante générée par cette structure a induit une nouvelle instabilité de la fouille,

nécessitant la mise en œuvre de mesures de stabilisation supplémentaires. Celles-ci ont inclus la réalisation d'un mur de soutènement et l'application de béton projeté afin de sécuriser à la fois la fouille et la paroi de la falaise.

Bien que l'analyse comparative entre les deux logiciels ait permis de mieux cerner le comportement de la falaise et d'évaluer la fiabilité des solutions proposées selon différentes hypothèses de calcul, certaines limites doivent être prises en compte pour bien situer la portée des résultats. Les données géotechniques utilisées, issues d'essais ponctuels, offrent une représentativité limitée à l'échelle du site. Par ailleurs, les effets sismiques, pourtant importants dans une région à sismicité modérée comme Oran, n'ont pas été intégrés de manière systématique. Enfin, la modélisation n'a pas pris en compte l'évolution à long terme des dispositifs de renforcement, ni les effets climatiques tels que l'érosion ou l'infiltration, susceptibles d'affaiblir la stabilité du massif rocheux au fil du temps.

Ces limites, loin de remettre en cause les tendances obtenues, ouvrent la voie à plusieurs perspectives intéressantes :

1. Utiliser des modélisations tridimensionnelles plus détaillées pour représenter fidèlement les interactions sol-structure.
2. Élaborer un plan de gestion des risques intégrant des protocoles d'intervention d'urgence.
3. Mettre en place un suivi géotechnique permanent (inclinomètres, piézomètres) pour une détection précoce des mouvements.
4. Actualiser régulièrement les données géotechniques selon l'évolution du site ;
5. Intégrer systématiquement les effets sismiques dans les futures simulations conformément aux normes parasismiques.
6. Renforcer la durabilité des ouvrages par un entretien structuré.

Ce travail constitue ainsi une contribution pertinente à l'analyse de la stabilité des falaises dans le contexte oranais et un socle pour des recherches futures plus approfondies, intégrant des approches pluridisciplinaires et des outils de surveillance en temps réel.

## Bibliographie

- [1] R. Paskoff, « 9. Les falaises », *Collection U*, vol. 3, p. 209-230, 2010.
- [2] E. Universalis, « FALAISE », Encyclopædia Universalis. Consulté le: 7 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/falaise/>
- [3] « Landslide | Definition, Facts & Causes - Lesson », study.com. Consulté le: 19 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://study.com/learn/lesson/landslide-concept-causes-facts.html>
- [4] la rédaction, « Définition | Affaissement | Futura Planète », Futura. Consulté le: 15 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-affaissement-7649/>
- [5] N. O. and A. A. US Department of Commerce, « What is subsidence? » Consulté le: 20 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://oceanservice.noaa.gov/facts/subsidence.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://oceanservice.noaa.gov/facts/subsidence.html?utm_source=chatgpt.com)
- [6] « Tassement du sol », *Wikipédia*. 8 mai 2024. Consulté le: 15 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tassement\\_du\\_sol&oldid=214921125](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tassement_du_sol&oldid=214921125)
- [7] ICSD, « The Effects of Soil Creep And Its Prevention | The Interfaith Center for Sustainable Development ». Consulté le: 20 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://interfaithsustain.com/soil-creep/>
- [8] « Mindat.org ». Consulté le: 15 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mindat.org/glossary/solifluction>
- [9] « Glissement de terrain », BeSafeNet. Consulté le: 7 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://besafenet.net/hazards/landslides/>
- [10] F. Etienne, « Les glissements de terrain », Encyclopédie de l'environnement. Consulté le: 7 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/glissements-de-terrain/>
- [11] D. Occitanie, « Les affaissements et les effondrements de cavités souterraines », DREAL Occitanie. Consulté le: 23 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.occitanie.developpement-durable.gouv.fr/les-affaissements-et-les-effondrements-de-cavites-a26506.html>

- [12] « Les risques de chutes de roches et de pierres - ETI Construction ». Consulté le: 9 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://publications.eti-construction.fr/publications/mani-ti219/preparation-du-site-sl8613138en/les-risques-de-chutes-de-roches-et-de-pierres-sl10815137.html>
- [13] la rédaction, « Définition | Éboulement - Écroulement - Effondrement | Futura Planète », Futura. Consulté le: 15 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-eboulement-6515/>
- [14] « What Causes Mudslides? » Consulté le: 18 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wonderopolis.org/wonder/what-causes-mudslides>
- [15] S. Kone, Y. Berthé, D. Y. Traoré, et R. E. Ghastalany, « Analysis by Numerical Simulation of the Geotechnical Behavior of Mining Slopes under the Influence of the Variations of the Geometric and Mechanical Parameters of the Bench Using RocScience (Slide Module Version 6.020): Case of an Open-Pit Mine », *GEP*, vol. 13, n° 02, p. 275-298, 2025, doi: 10.4236/gep.2025.132017.
- [16] S. Suman, « BACHELOR OF TECHNOLOGY IN MINING ENGINEERING ».
- [17] W. F. Kane et T. J. Beck, « INSTRUMENTATION PRACTICE FOR SLOPE MONITORING ».
- [18] « Cliff strengthening and stabilisation ». Consulté le: 9 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/cliff-stabilisation>
- [19] N. Marçot et L. Azibi, « Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2008 06LITA12 ».
- [20] « Chapitre 3- Stabilité des versants ».
- [21] S. Ullah, M. U. Khan, et G. Rehman, « A BRIEF REVIEW OF THE SLOPE STABILITY ANALYSIS METHODS », *Geol. behav.*, vol. 4, n° 2, p. 73-77, mai 2020, doi: 10.26480/gbr.02.2020.73.77.
- [22] « G04-001 - Slope Stability ».
- [23] « Stability Analysis and Foundation Design using Geo5 Software ».
- [24] « Stabilité des terrains en pente Chapter · October 2019 ».
- [25] « G04-001 - Slope Stability.pdf ». Consulté le: 2 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cedengineering.ca/userfiles/G04-001%20-%20Slope%20Stability.pdf>
- [26] « Stability Analysis and Foundation Design using Geo5 Software ».

- [27] « Sarma | Surface de glissement polygonale | Aide contextuelle | GEO5 ». Consulté le: 3 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.finesoftware.fr/aide-contextuelle/geo5/fr/sarma-01/>
- [28] S. K. Sarma, « Stability Analysis of Embankments and Slopes », *J. Geotech. Engrg. Div.*, vol. 105, n° 12, p. 1511-1524, déc. 1979, doi: 10.1061/AJGEB6.0000903.
- [29] M.Sc. Graduated from Birjand University, Iran et J. Vaze Mobaraki, « Slope Stability Analysis Methods », *sjis*, oct. 2020, doi: 10.47176/sjis.3.1.9.
- [30] F. Cai et K. Ugai, « Discussion: Slope stability analysis by finite elements », *Géotechnique*, vol. 51, n° 7, p. 653-654, sept. 2001, doi: 10.1680/geot.2001.51.7.653.
- [31] School of Civil Engineering, College of Engineering, Universiti Teknologi Mara, Shah Alam Selangor, 40450 Malaysia, N. Mohd Saim, A. Kasa, et Jabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia, « Effect of Mesh Coarseness on Slope Stability Analysis Using 2D and 3D Finite Element Method », *jkukm*, vol. 36, n° 2, p. 497-507, mars 2024, doi: 10.17576/jkukm-2024-36(2)-11.
- [32] Addoun O. & Amirat Y. (2020). Stabilité des excavations souterraines sous les terrains en pentes. Master en Génie Civil. Département de génie civil, université de Tlemcen ; Algérie.
- [33] Etude de l'effet de la construction de tunnels jumeaux dans un terrain en pente. (2023). Stabilité des excavations souterraines sous les terrains en pentes. Master en Génie Civil. Département de génie civil, université de Tlemcen ; Algérie.
- [34] C. Carranza-Torres, « 114 PUBLICATIONS 28,582 CITATIONS SEE PROFILE ».
- [35] R. Selwa et T. Sara, « Thème : Mouvements et stabilisation des sols ».
- [36] « MelodyPremaillon\_phd\_finalversion ».
- [37] « Application-of-the-Finite-Element-Method-to-Slope-Stability ».
- [38] M. Cała et J. Flisiak, « Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods ».
- [39] M. M. Mohammed, « A Review On Slope Monitoring And Application Methods In Open Pit Mining Activities », n° 02, 2021.
- [40] « Guide Technique-LCPC-PROTINSTAB ».