

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 : GENIE CIVIL**

**Spécialité : GEOTECHNIQUE**

**Par : BENAZZA Nassima**

### **Sujet**

**ANALYSE DES GLISSEMENTS DES TERRAINS EN TENANT  
COMPTE DE LA COMPOSANTE CLIMATIQUE**

Soutenu publiquement, le :23/ 06 / 2025 , devant le jury composé de :

Mlle SAIL Latéfa	PR	Université de Tlemcen	Président
M BENYELLES Zoheir	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
M. ZADJAOUI Abdeldjalil	PR	Université de Tlemcen	Encadrant
M. TROUZINE Habib	PR	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024 /2025

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu le Tout-Puissant, Pour la force, la persévérance et la guidance qu'Il m'a accordé tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.

Ce projet de fin d'études n'aurait jamais pu être abouti, sans l'aide de certaines personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements en premier lieu aux personnes qui ont joué un rôle déterminant dans ma formation, à mes valeureux parents et mes sœurs qui m'ont toujours encouragé, soutenus et m'ont appris à donner le meilleur de moi-même.

Je remercie également mes encadrants, Monsieur ZADJAOUI A. et TROUZINE H., enseignants en génie civil, spécialité géotechnique, à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Je les suis reconnaissante pour leur disponibilité, leur patience, leurs conseils avisés, ainsi que pour l'accompagnement tout au long de ce mémoire, qui m'a permis d'enrichir mes connaissances et d'approfondir ma réflexion. Un grand remerciement à Monsieur CHAKROUN Lokman El-Hakim pour son aide dans la modélisation, sa présence et ses précieux conseils sans lui, je n'aurais pas postulé à ce stade.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma modeste contribution en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Ainsi, Je tiens à remercier vivement et sincèrement nos professeurs du département de génie civil qui m'ont aidé et appris l'âme de la science durant ces années d'études.

Mes chaleureux remerciements vont également à toutes les personnes qui ont contribué à l'enrichissement de ce travail en partageant leurs connaissances ainsi qu'aux professionnels, consultants et internautes rencontrés au cours de mes recherches, pour leur disponibilité et la bienveillance avec laquelle ils ont répondu à mes interrogations avec gentillesse.

# Dédicaces

**A** mon pilier invisible, qui m'ont porté quand mes propres forces défailaient, à un guerrier qui ne s'est jamais rendu pour moi, À celui qui a arraché les épines de mon chemin,

**Mon chère père,**

À la Dame combattante et à la main cachée, à l'architecte silencieuse des scènes de ma vie, À celle qui a fait de ma vie un paradis, à celle qui a facilité mon chemin tout au long de son existence.

**Ma Chère maman.**

Je suis ici à cause de vous si c'est le succès, c'est votre succès.

**À mes frères,** merci d'avoir été mon ancrage dans les tempêtes.

À ceux qui ont apporté leur soutien et leur aide, aux amis fidèles, aux compagnons des années et des crises, et aux compagnons de l'adversité, Mes sœurs **Rihab, Zoubida, Wafaa** et **Nourhène**, Mon arrivée ici a été partagée avec vous.

**À ma cousine Zoubida,** Comme j'aurais aimé que tu sois avec moi aujourd'hui dont l'absence nous rappelle la fragilité de la vie, que la paix t'accompagne éternellement.

**À mes camarades de promotion et notre délégué,** artisans méticuleux de cette aventure collective votre engagement a transformé l'effort en triomphe

**Le voyage** n'a pas été de tout repos et il n'aurait pas dû l'être. Le rêve n'était pas à portée de main et la route n'a pas été facile, **mais je l'ai fait.**

# Résumé

Les glissements de terrain sont un phénomène complexe qui représente un défi important pour les ingénieurs géotechniciens dans la conception et l'exploitation des infrastructures. L'occurrence des glissements de terrain est influencée par une myriade de variables, dont la composition du sol, les variables climatiques et les charges mécaniques. L'analyse de la stabilité des pentes repose sur une série de techniques. Des calculs sont effectués pour estimer le coefficient de sécurité et déterminer les surfaces de rupture critiques. Comme l'illustre cette étude de projet de fin d'études, la simulation numérique est un moyen fondamental d'analyser le comportement d'une pente instable et de vérifier les différentes solutions de stabilisation. Dans cette étude de cas d'étude concret, PLAXIS 2D a été utilisé pour simuler un glissement de terrain réel sur le contournement côtier de Ghazaouet. L'interprétation des résultats de la simulation a permis de valider les hypothèses développées et de révéler les facteurs déterminants de l'instabilité. Les calculs du facteur de sécurité ont indiqué l'effet des conditions hydrologiques et des facteurs climatiques sur le développement des contraintes internes dans le remblai.

## **Mots clés :**

*Facteurs climatique, Instabilité, Conditions hydrologiques, Glissement, Plaxis 2D.*

# Abstract

Landslides are a sophisticated phenomenon that poses a significant challenge to geotechnical engineers in infrastructure design and operation. Landslide occurrence is affected by a myriad of variables, which include soil composition, climatic variables, and mechanical loading. Slope stability analysis is based on a range of techniques. In response to these challenges, slope stability analysis is based on a range of techniques. Calculations are performed to estimate the safety coefficient and determine critical failure surfaces. As illustrated by this research study, numerical simulation is a fundamental way of analyzing the unstable slope behavior and verifying various stabilization solutions. In this case study, PLAXIS 2D was utilized to simulate an actual landslide on the Ghazaouet coastal bypass. Interpretation of the results of the simulation validated the hypotheses developed and revealed the determinative factors of the instability. Computations of the safety factor indicated the effect of hydrological conditions and climatic factors on internal stress development within the embankment.

***Keywords:***

*Climatic factors, Instability, Hydrological conditions, Landslides, 2D Plaxis.*

## ملخص

الانهيارات الأرضية ظاهرة معقدة تشكل تحدياً كبيراً للمهندسين الجيوتقنيين في تصميم البنية التحتية وتشغيلها. ويتأثر حدوث الانهيارات الأرضية بعدد لا يحصى من المتغيرات التي تشمل تكوين التربة والمتغيرات المناخية والتحميل الميكانيكي. استجابة لهذه التحديات، يعتمد تحليل ثبات المنحدر على مجموعة من التقنيات. يتم إجراء الحسابات لتقدير معامل الأمان وتحديد أسطح الفشل الحرجة. وكما يتضح من هذه الدراسة البحثية، فإن المحاكاة العددية هي طريقة أساسية لتحليل سلوك المنحدر غير المستقر والتحقق من طول الاستقرار المختلفة. في دراسة هذه الحالة، تم استخدام برنامج بلاكسس ثنائي الأبعاد **PLAXIS 2D** لمحاكاة انهيار أرضي على ممر الغزوات الساحلي. أثبت تفسير نتائج المحاكاة صحة الفرضيات التي تم تطويرها وكشف عن العوامل المحددة لعدم الاستقرار. أشارت حسابات عامل الأمان إلى تأثير الظروف الهيدرولوجية والعوامل المناخية على تطور الإجهاد الداخلي داخل السد.

### الكلمات المفتاحية:

العوامل المناخية، الانهيارات الأرضية، عدم الاستقرار، الظروف الهيدرولوجية الانزلاقي، بلاكسس ثنائي الأبعاد،

# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>II</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>III</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>VI</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>VII</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>X</b>
<b>Notations</b> .....	<b>XII</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>I. GENERALITES SUR LES GLISSEMENT DU TERRAIN</b> .....	<b>4</b>
1. Introduction .....	4
2. Définitions d'instabilité du terrain .....	4
3. Différents type des mouvements du terrain .....	4
3.1 Mouvements naturels .....	5
3.2 Les mouvements artificiels: .....	10
4. Les causes des glissements:.....	12
4.1 Les facteurs externes: .....	13
4.2 Les facteurs internes .....	16
5. Méthodes confortatives:.....	17
5.1 Approche douce: .....	18
5.2 Approche dure: .....	23
5.2.4 Remblai sur sols mous:.....	25
6. Choix de méthode de confortement:.....	26
7. Conclusion .....	26

<b>Références.....</b>	<b>27</b>
<b>II. LES METHODES DE CALCUL DES GLISSEMENTS DE TERRAIN.....</b>	<b>29</b>
1. Introduction .....	29
2. Facteur de sécurité .....	29
3. Approche de la conception.....	30
3.1 Glissement plan .....	30
3.2 Glissement circulaire .....	31
3.3 Glissement de bloc .....	31
4. Pente infini .....	32
4.1 Sol non saturé .....	33
4.2 Sols avec écoulement .....	33
5. Force d'infiltration dans l'analyse de stabilité .....	35
6. Pression interstitielle pour la stabilité des pentes .....	37
7. Les méthodes d'équilibre limites .....	38
7.1 Les méthodes d'analyses globale .....	38
<b>les méthodes d'analyse globale .....</b>	<b>38</b>
7.2 Les méthodes d'analyse par tranche .....	39
Cette méthode est applicable a toutes les formes de pente et a tous les types de sol, elle est la seule méthode pratique pour calculer manuellement les glissements de terrain non circulaires. ....	40
Cette méthode s'applique aux pentes hétérogènes, en particulier aux glissements circulaires, et simplifie les calculs manuels. La méthode n'est pas applicable dans le cas d'un sol contenant une forte pression d'eau.....	41
8. La méthode d'analyse limites.....	41
9. Analyse par élément fini.....	41
9.1 La méthode de réduction de la force (SRM) .....	42
9.2 La méthode des éléments finis rigide.....	42
10. Les méthodes des abaques .....	43
Hypothèses .....	43
Equation .....	43
Schéma d'approche .....	43
<b>L'abaque De Taylor</b> .....	43
$\varphi' > 0, c' > 0,$ .....	43
Pas d'eau, analyse des contraintes effectives.....	43
11. Analyse des pentes sismique.....	44
12. Fondements mathématiques des méthodes d'optimisation appliquées à l'analyse de la stabilité des pentes .....	45
L'utilisation de SAR dans les glissements .....	46
13. Les méthodes de réparation et de surveillances .....	46
14. Conclusion.....	47
<b>Références.....</b>	<b>48</b>

### III. MODELISATION DES OUVRAGES GEOTECHNIQUE «ETUDE D'UN CAS DE

---

<b>GLISSEMENT DE TERRAIN».....</b>	<b>51</b>
1. Introduction .....	51
2. Présentation de cas étudié.....	51
2.1 Description globale.....	51
2.2 Contexte hydrologique et hydrogéologique .....	52
2.3 Diagnostique du glissement .....	53
2.4 Caractérisations du terrain.....	55
2.5 Modélisation numériques.....	56
Hypothèse de calcul de précipitation .....	61
3. Conclusion .....	62
<b>Références.....</b>	<b>63</b>
<b>IV. DEPOUILLEMENT ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....</b>	<b>64</b>
1. Introduction .....	64
2. Les résultats de 1 ère modèle .....	64
3. Les résultats de modèle de références (sans précipitation) .....	66
4. Conclusion .....	81
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>83</b>

---

# Table des figures

Figure I-1 Organigramme de la classification des mouvements du terrain. ....	5
Figure I-2: Phénomène de coulée boueuse (Pilot, 1973) .....	6
Figure I-3 Eroulement et éboulement rocheux (Reid, 1999). ....	6
Figure I-4: Le phénomène du fluage (Philipponnat, 1979).....	7
Figure I-5: Le cas particulier de fluage « la solifluction » (Pilot, 1973) .....	8
Figure I-6: Le glissement du terrain ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017).....	8
Figure I-7 Le glissement plan. (Sassi, 1996) .....	9
Figure I-8 Le glissement rotationnel (Philipponnat, 1979).....	10
Figure I-9 Le glissement quelconque. (Philipponnat, 1979).....	10
Figure I-10 Les différentes ruptures circulaire (Philipponnat, 1979).....	11
Figure I-11 remblais sur un sol compressible (Philipponnat, 1979).....	11
Figure I-12 La rupture circulaire sous un soutènement (Philipponnat, 1979) .....	12
Figure I-13 Organigramme de causes des glissements. ....	13
Figure I-14 Le chargement au sommet de talus ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017) .....	14
Figure I-15 La concentration d'eau vers la pente ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017) .....	15
Figure I-16 Les excavations à la base du talus ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017) .....	15
Figure I-17 Organigramme d'approches de stabilisation. ....	18
Figure I-18 La butée de pied (Durville et Séve , 1996) .....	19
Figure I-19 Allègement en tête de talus (Durville et Séve , 1996) .....	19
Figure I-20 Adoucissement (Durville et Séve , 1996) .....	20
Figure I-21 La substituions partielles (Durville et Séve , 1996).....	21
Figure I-22 Drain subhorizontale (Cloud front).....	22
Figure I-23 Masque drainant (Talfumière, 2019) .....	23
Figure I-24 Drain vertical (Keller Group, 2025) .....	23
Figure I-25 Renforcement par clouage (Durville et Séve , 1996) .....	25
Figure II-1 Le glissement plan. (Schlosser, 1988) .....	30
Figure II-2 Le glissement circulaire (Schlosser, 1988).....	31
Figure II-3 Le rupture d'un bloc (Briaud, 2013) .....	32
Figure II-4 Analyse de pente infinie (avec infiltration) (Briaud, 2013). ....	33
Figure II-5 Analyse de pente infini (sans filtration) (Sobhan, 2012) .....	34
Figure II-6 Rupture plane le long du bas d'un coin. (Briaud, 2013) .....	37
Figure II-7 La méthode suédoises. (Khochni, 2024) .....	38
Figure II-8 la méthode spirale logarithmique (Khochni, 2024).....	39
Figure II-II-9 le principe de base de la méthode des tranches (Fellenius et Bength , 2025) .....	39
Figure II-10 La méthode de Janbu. (Khochni, 2024).....	40
Figure II-11 La méthode de Fellenius. (Khochni, 2024) .....	40

---

Figure II-12 Paramètres de pente pour le graphique de Taylor. (Briaud, 2013) .....	43
Figure II-13 Paramètres de pente pour le graphique de Spencer (Briaud, 2013) .....	44
Figure II-14 Paramètres de pente de Janbu pour le facteur de réduction de la submersion (Briaud, 2013) .....	44
Figure III-1 Talus avant le chargement dans l'état stable. (Société d'étude technique de sétif, 2022) .....	52
Figure III-2 Talus après le chargement en 2017. (Société d'étude technique de sétif, 2022) .....	52
Figure III-4 Trajectoire de la fissuration en 03/2021 localisé sur Google Earth. (Société d'étude technique de sétif, 2022).....	54
Figure III-5 Début de fissuration au niveau de tête et le long du pied de talus amont.....	54
Figure III-6 Fissures longitudinale centimétriques. (Photo prise by (Medjahdi.M, 2025) .....	55
Figure III-7 La géométrie du modèle de référence. ....	57
Figure III-8 La 1 ère étape de modélisation. ....	58
Figure III-9 La 2 étape de modélisation. ....	59
Figure III-10 Le maillage du modèle. ....	59
Figure III-11 Les condition d'écoulement. ....	60
Figure III-12 Les phases de calcules. ....	60
Figure III-13 le calcule dans plaxis 2D.....	61
Figure IV-1 Les déformations verticales .....	64
Figure IV-2 Le facteur de sécurité. ....	64
Figure IV-3 le facteur de sécurité .....	65
Figure IV-4 La déformations.de maillage.....	65
Figure IV-5 Les déplacement Horizontales. ....	65
Figure IV-6 Les déplacement Verticales. ....	65
Figure IV-7 La directions des contraintes principales. ....	65
Figure IV-8 Les déformations Verticales.....	65
Figure IV-9 Les déplacement horizontales sans précipitation.....	66
Figure IV-10 Les déplacement verticales .....	67
Figure IV-12Les contrainte effective exercé sur le mur. ....	68
Figure IV-13 La forme de cercle de rupture.....	68
Figure IV-14 Le degré de saturation du sol.....	69
Figure IV-15 Les déformation verticales.....	69
Figure IV-16 Les contrainte verticales.....	70
Figure IV-18 Les déplacements verticales de 10mm.....	71
Figure IV-19 Les déplacements verticales de 10mm.....	72
Figure IV-19 La pression interstitielle de 10mm.....	73
Figure IV-19 Le degré de saturation dans 10mm.....	74
Figure IV-20 Les contraintes effectives horizontaux 10mm.....	75
Figure IV-21 Les contraintes effectives horizontaux 10mm.....	75
Figure IV-22 Les contraintes effectives verticaux 10mm.....	76
Figure IV-23 Les contraintes effectives verticaux 10mm.....	76
Figure IV-24 Le facteur de sécurité de 10mm.....	77
Figure IV-25 Les déplacements verticales de 40mm.....	77
Figure IV-26Les déplacements verticales de 40 mm.....	78
Figure IV-27 La pression interstitielle de 40mm.....	79
Figure IV-28 Les contraintes effectives horizontaux 40mm.....	79
Figure IV-29 Les contraintes effectives verticaux 40mm.....	80
Figure IV-30 Le facteur de sécurité de 40mm.....	80

---

# Notations

$c$  : Cohésion du sol [kPa]

$\varphi$ : Angle de frottement interne du sol [°]

$c_c$  : Cohésion critique [kPa]

$\varphi_c$ : Angle de frottement critique [°]

$c_d$ : Cohésion développé [kPa]

$\varphi_d$  : Angle de frottement développé [°]

$c'$ :Cohésion effective. [kPa]

$\varphi'$ :Angle de frottement effective [°]

$\gamma$  : Poids volumique humide [kN/m<sup>3</sup>]

$E$ : Module d'Young [MPa]

$\nu$ : Coefficient de Poisson

$\psi$ : Angle de dilatance [°]

$\beta$ : angle d'inclinaison d'un talus [°]

$H$  : hauteur du talus [m]

$EA$ : Rigidité normale [kPa]

$W$ : Poids de la masse en mouvement ou de la tranche [kN] ;

$W_i$ : Poids d'une tranche  $i$  [kN]

$N$ : Force Normale [kN]

$N_s$ : Coefficient de Stabilité

$N_i$ : Force normale à la base d'une tranche  $i$  [kN]

$T$ : Force tangentielle [kN]

---

$T_i$ : Force tangentielle agissant sur la tranche  $i$  [kN]

$V_i$ : Forces verticales inter tranches [kN]

$H_i$ : Forces horizontales inter tranches [kN]

$\sigma$ : Contrainte normale [kPa]

$\tau$ : Contrainte de cisaillement (tangentielle) [kPa]

F: Facteur de sécurité

u: La pression interstitielle [kPa]

r: Le rayon du cercle de glissement critique [m]

i: Le gradient hydraulique

$\rho$ : L'angle d'arc du cercle de glissement critique [°]

l: La longueur de l'arc du cercle de glissement critique [m]

# Introduction générale

**L**e Glissement de pente ou glissement de terrain, ces termes ont toujours existaient dans le monde de topologie et sont des points importants à étudier avant chaque construction. L'homme a toujours essayé de combattre ce problème depuis 1940 et à trouver de nouvelles méthodes que ce soit numérique ou graphique.

Dans notre pays les glissements de terrain présentent un grand danger de nos jours, comme on a pu voir dernièrement à Oran, le tragique incident qui a causé la mort de 5 personnes et plusieurs blessés. Pas loin de cette Wilaya, a Ghazaout exactement, un autre glissement de terrain a été causé par la construction d'une route.

La relation entre les glissements et la composante climatique c'est l'eau l'ennemie N°1 pour les géotechniciens. Il s'agit d'une problématique classique mais toujours d'actualité dans la pratique de l'ingénieur vu le risque naturel auquel nous somme confronté autan qu'ingénieur.

Cette étude approfondit les mécanismes des glissements de terrain en faisant appel à une analyse intégrale des facteurs climatiques. Elle est basée sur les fondements déontologiques de la mécanique des sols, de la géotechnique et de l'hydrologie afin d'analyser la stabilité des pentes. Le contexte théorique repose sur une série de colonnes clés : la théorie, de la limite d'équilibre (fondée sur les approches de Bishop, Janbu et Fellenius), les lois du sol de rhéologie (critères de Hoek-Brown et Mohr-Coulomb), et l'analyse des mécanismes de défaillance progressive.

Dans le cadre de cette étude, nous nous penchons sur l'influence des facteurs climatiques (pluviométrie et température) influencent-ils la stabilité des talus, et quelles solutions de stabilisation sont les plus utilisables pour limiter ces risques dans un contexte de changements climatiques ?

Dans le cadre de notre travaille la première partie de ce document aborde les mécanismes de base de l'instabilité des terrains, en distinguant les mouvements naturels (coulées de boue, glissements de terrain, reptation, glissements) des mouvements artificiels (pentes, remblais, barrages). Elle examine les causes des glissements de terrain en tenant compte des facteurs climatiques, des surcharges et des conditions hydrologiques. Les méthodes de stabilisation sont également décrites, avec une distinction entre les techniques de drainage, les éléments de retenue et les renforcements par enrobage. L'approche de la conception est basée sur plusieurs modèles de stabilité des pentes, y compris des analyses de pentes infinies et de surfaces planes, ainsi que l'effet de l'infiltration. Des méthodes graphiques et numériques, telles que celles

utilisées par Taylor, Janbu et Bishop, sont examinées pour déterminer les critères de défaillance et les facteurs de sécurité. L'influence de l'eau et les contraintes sismiques sont également prises en compte, avec une analyse détaillée des infiltrations et des pentes renforcées. L'utilisation de PLAXIS 2D 2023 permet d'étudier un cas spécifique de glissement de terrain, en définissant la géologie du site, les caractéristiques géotechniques et la géométrie du modèle. Cette partie comprend la génération du maillage, le para métrisation du sol et l'analyse des contraintes mécaniques pour simuler la stabilité des pentes. Les résultats de la modélisation sont analysés pour comprendre le phénomène de rupture et ses effets sous l'influence des facteurs climatiques et hydrologiques. Les interprétations permettent de valider les méthodes de stabilisation et d'optimiser les méthodes de renforcement pour réduire le risque d'instabilité.

L'ensemble du travail vise à établir une méthodologie claire pour la compréhension et la gestion des glissements de terrain, en prenant en compte les interactions climatiques et géotechniques.

Dans le cadre de la présente étude, nous procéderons à une analyse approfondie des mécanismes de rupture des pentes et distinguons les mouvements naturels (coulées boueuses, fluage, glissements) des mouvements artificiels (talus, remblais, barrages). Elle examine les causes des instabilités en tenant compte des facteurs climatiques, des contraintes géotechniques et hydrologiques. Les différentes méthodes de stabilisation sont abordées, incluant le drainage, le soutènement et le renforcement. (Chapitre I).

Le chapitre II Explore les diverses techniques utilisées pour analyser la stabilité des pentes. Il présente les concepts du facteur de sécurité et décrit différentes approches de conception (glissements plans, circulaires, de blocs). Il aborde les effets de l'infiltration, des contraintes hydrauliques et des séismes sur la stabilité. Les méthodes d'équilibre limite, les modèles numériques (éléments finis) et les critères empiriques sont étudiés, avec une mise en perspective des techniques d'optimisation.

Le processus de génération d'une modélisation est une étape cruciale dans le cadre de la démarche méthodologique s'intéresse à la simulation d'un glissement de terrain réel sur la rocade côtière de Ghazaouet à l'aide du logiciel **PLAXIS 2D**. La modélisation prend en compte l'influence des précipitations et de la température sur la stabilité du talus. Ce projet est décrit en détail dans le chapitre III puis analysé avec interprétation et recommandation pratique dans le chapitre IV.

Le mémoire achèvera par une conclusion générale résumant les conclusions partielles avec une liste des références bibliographiques

# **Partie Bibliographique**

---

# I. GENERALITES SUR LES GLISSEMENT DU TERRAIN

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous pencher sur les glissements de terrain, en analysant les causes et les conséquences de ce phénomène. Notre objectif est de comprendre comment ces instabilités du sol représentent un danger pour toutes les formes de vie. Nous aborderons également l'instabilité des terrains en détaillant ses différents types, les causes de ce phénomène et les méthodes de prévention et de gestion.

## 2. Définitions d'instabilité du terrain

Les glissements de terrain sont des déplacements surfaciques brutaux d'une masse de terre ou de roche le long d'une pente. Ils se caractérisent par des impacts et de l'érosion. Les glissements de terrain mettent en danger la sécurité et la santé de la population en menaçant la stabilité des structures (effondrement de bâtiments, fissures dangereuses, perte de biens). Ils peuvent toucher des structures artificielles ou des pentes naturelles. Naturelles, comme les montagnes et les rivières. Ou artificielles, telles que les routes, les barrages ou les autoroutes, avec des vitesses de déplacement variables et un mécanisme de rupture généralement représenté par un cercle. Il peut s'agir d'un plan unique, d'une série de plans, d'une spirale logarithmique, d'un bloc coulissant, etc. L'étude des glissements de terrain et la prévention des risques qu'ils entraînent relèvent de la géologie appliquée et de la mécanique des sols.

La classification des activités de terrain n'est pas une fin en soi, mais plutôt un moyen d'identifier les principaux phénomènes observés. Cela se fait sur la base de différents critères géologiques et mécaniques qui sont sélectionnés en fonction de l'expérience des spécialistes.

## 3. Différents types des mouvements du terrain

L'organigramme ci-dessous de **(Figure I-1)**, récapitule l'ensemble des différents types de mouvements de terrain.

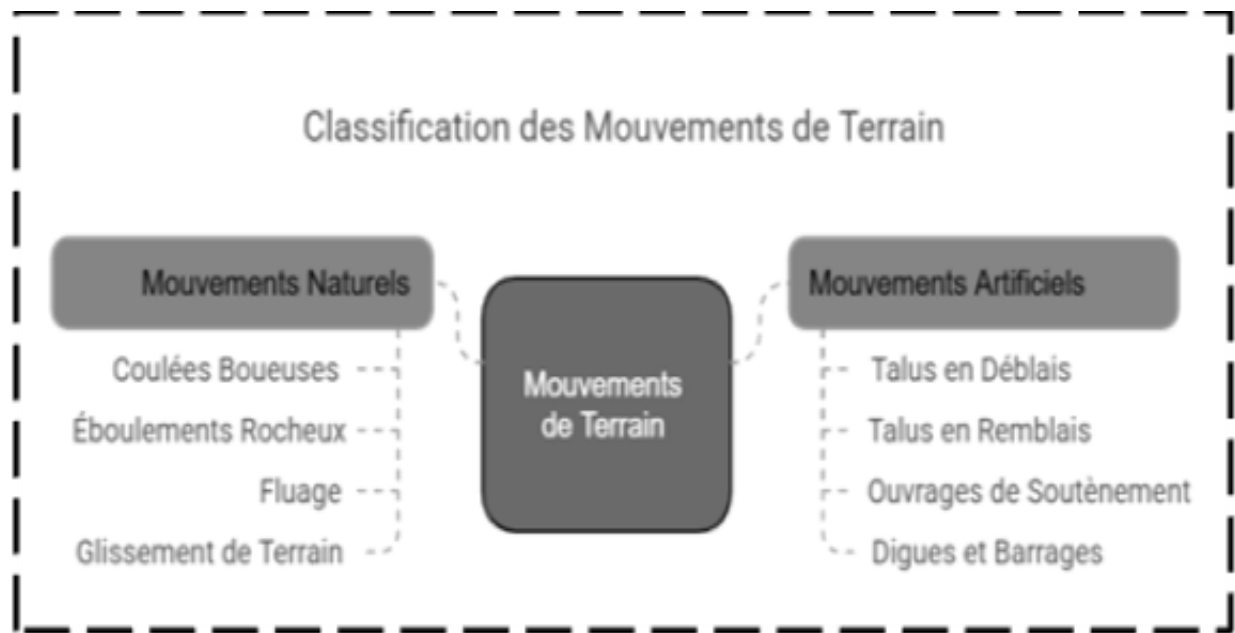


Figure I-1 Organigramme de la classification des mouvements du terrain.

### 3.1 Mouvements naturels

Les mouvements du terrain sont quatre :

Les coulées boueuses

Les éboulements rocheux et les chutes de blocs

Le fluage

Les glissements du terrain

#### 3.1.1 Les coulées boueuses :

Elles s'appellent aussi les glissements de terrain liquide. Ou la couche superficielle du sol soumise à des fortes précipitations, Ce phénomène se produit en montagne des matériaux meubles, hétérogènes à matrice argileuse lorsque la masse dépasse une teneur en eau critique rendant le matériau semi fluide et lorsque l'eau s'infiltré à travers le sol (**Figure I-2**), entraînant avec elle le sol, parfois à un rythme très élevé. L'eau est un facteur qui aggrave, voire provoque, les coulée boueuse, Caractérisé par une déformation et un écoulement visqueux ou liquide. (Belbachir et Amrani , 2020).

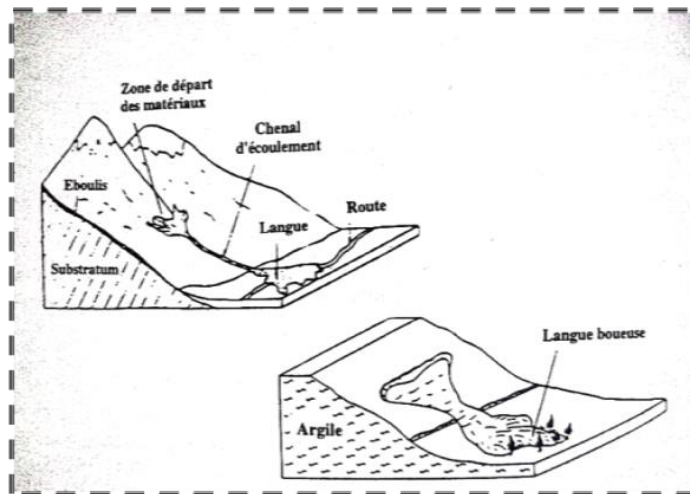


Figure I-2: Phénomène de coulée boueuse (Pilot, 1973)

### 3.1.2 Les éboulements rocheux et les chutes des blocs :

Les éboulements sont des chutes soudaines de masses rocheuses qui en raison de causes internes à la masse rocheuse telles que l'altération, l'augmentation de la pression interstitielle et le glissement d'une couche à une autre dans les roches stratifiées, en plus de causes externes telles que l'effondrement des blocs en surplomb après l'érosion des blocs sous-jacents plus tendres. Le terme chute de pierres est utilisé pour le détachement des quelques unités de volume inférieure 1 dm<sup>3</sup> par contre pour un volume supérieur on utilise le terme chute de blocs. Qu'il est caractérisé par une grande brutalité, (**Figure I-3**). Les énergies mises en jeu sont très importantes et les volumes peuvent être considérable plusieurs millions de mètre cube avec des vitesses atteignent 10m/s. on distingue : les écroulements rocheux les éboulements surplombs les écroulements par fluage et les écroulements par glissement. (Pilot, 1973).

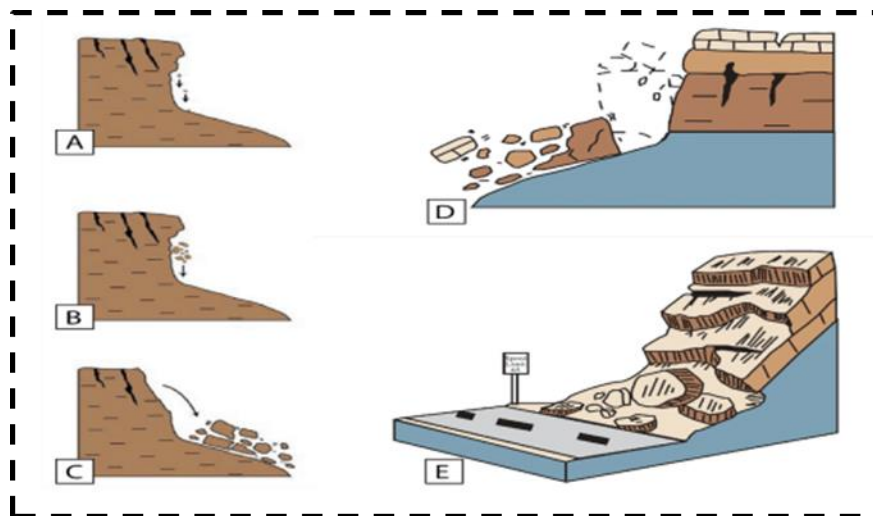


Figure I-3 Ecroulement et éboulement rocheux (Reid, 1999).

### 3.1.3 Le fluage :

Les mouvements de fluage sont lents et continus sans surface de rupture et sans cause mécanique évidente. Ces mouvements affectent principalement des versants naturels divers, Les blocs mis en jeu peuvent être de grande taille et constitués de matériaux de différents types (terre, roche) qui se comportent généralement comme des objets en plastique. **(Figure I-4)** En effet, ces charges provoquent une contrainte sur la structure qui se rapproche de l'état ultime de rupture du sol, ce qui peut conduire soit à :

- Un tassement : La structure atteint l'équilibre sans dépasser la limite de rupture.
- Une rupture : La contrainte dépasse la capacité du sol, ce qui entraîne une rupture.

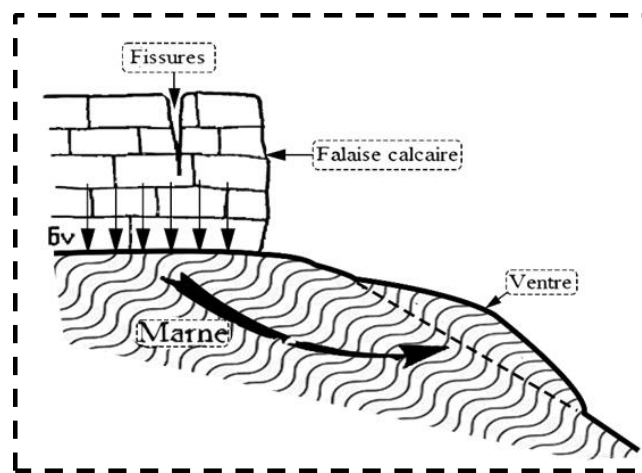


Figure I-4: Le phénomène du fluage (Philipponnat, 1979)

Un cas spécial de fluage c'est la **solifluxion** : c'est la conséquence des climats périglaciaires, se réfère au mouvement des surfaces de sol sur les pentes raides à douces. Elle se produit lorsque la saturation en eau dépasse l'élasticité maximale du matériau, ce qui stimule l'écoulement du sol vers la surface le long de la surface de séparation saturée. **(Figure I-5)** (Pilot, 1973) (Sassi, 1996).

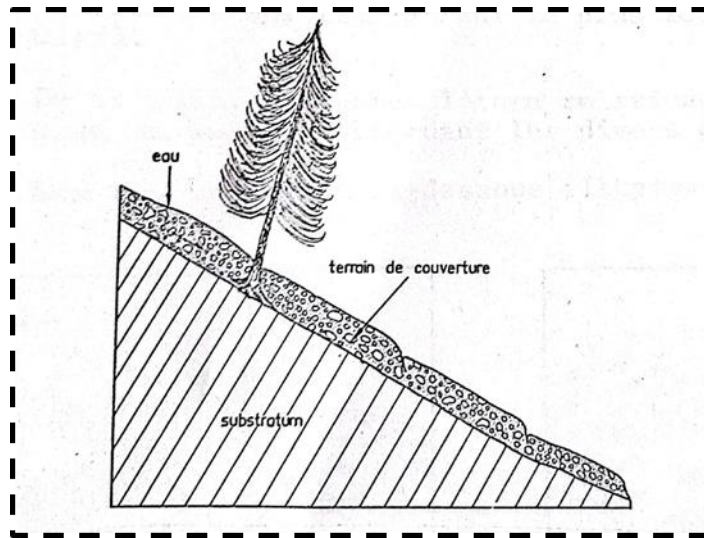


Figure I-5: Le cas particulier de fluage « la solifluction » (Pilot, 1973)

### 3.1.4 Les glissements de terrain :

Ces mouvements se produisent généralement dans des matériaux non cohésifs tels que le sol, peuvent aussi affecter des roches fracturées ou altérées. Les terrains peuvent glisser rapidement, surtout lorsqu'ils sont saturés, avec une forme dépend en partie de la structure géologique du site (**Figure I-6**).

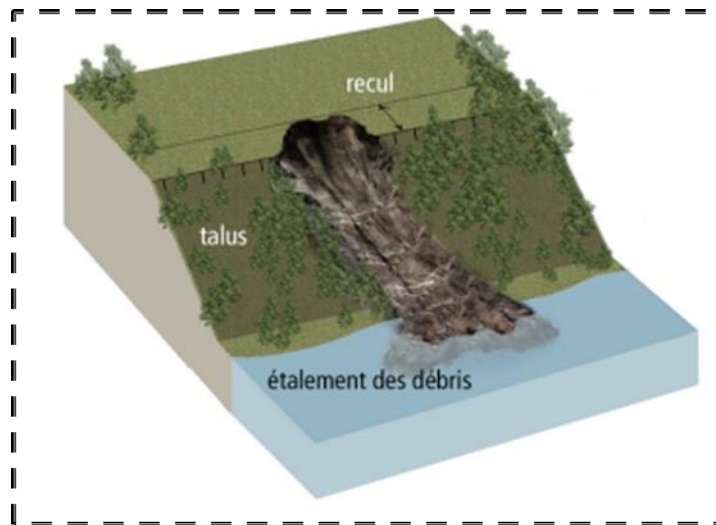


Figure I-6: Le glissement du terrain ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017)

Ces glissements peuvent être des :

- Glissements Plans
- Glissements Rotationnels

- Glissements Quelconques

### 3.1.4.1 Glissements plans :

Il s'agit d'un mouvement de translation le long d'une surface relativement plane, qui se produit principalement dans des environnements rocheux stratifiés. La masse en mouvement se comporte comme une masse unique lorsque ses déformations sont très faibles et que les déformations sont concentrées sur la surface de fracture et sont souvent affectées par l'eau (**Figure I-7**). (Sassi, 1996).

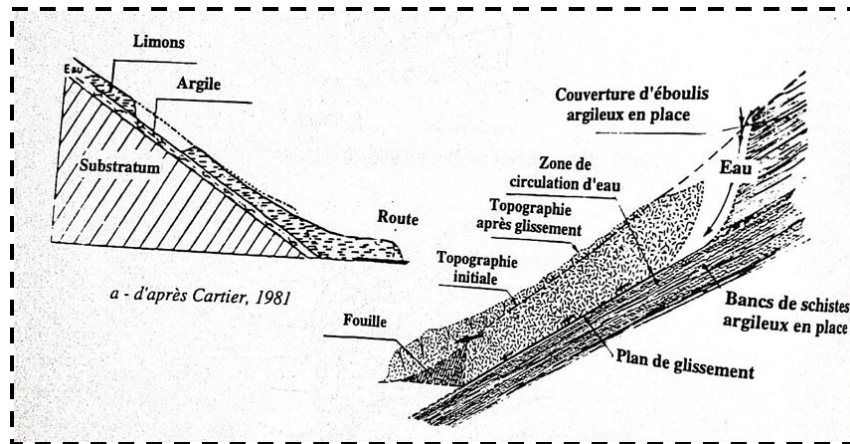


Figure I-7 Le glissement plan. (Sassi, 1996)

### 3.1.4.2 Glissements rotationnels :

C'est un mouvement qui affecte les sols meubles et les roches homogènes à faible cohésion ou très friables. Dans ce type de mouvement, la masse s'incline en glissant le long d'une surface courbe quelque peu circulaire (**Figure I-8**). Les tranches les plus simples sont les glissements circulaires avec une surface de rupture proche ou similaire à un cercle ; Les glissements plus complexes comprennent souvent des éléments de glissement plan et de glissement circulaire. (Pilot, 1973).

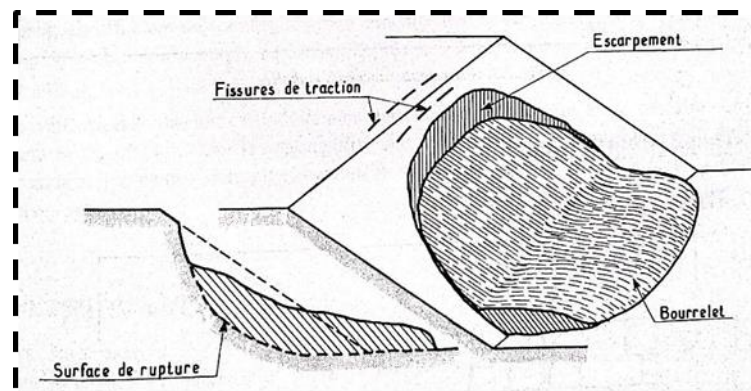


Figure I-8 Le glissement rotationnel (Philipponnat, 1979)

### 3.1.4.3 Glissements quelconques :

Un glissement est qualifié d'aléatoire ou composite lorsque la surface de rupture présente une combinaison des deux types de surfaces mentionnés précédemment. L'analyse de la comparaison entre les deux mouvements montre une similitude frappante à l'œil nu. Cependant, une inspection minutieuse révèle que la section verticale de la surface de glissement présente une forme irrégulière. (**Figure I-9**) La fracture se produit dans un plan aléatoire, est généralement causée par un mouvement de translation et se développe dans des dépôts hétérogènes. (Philipponnat, 1979)

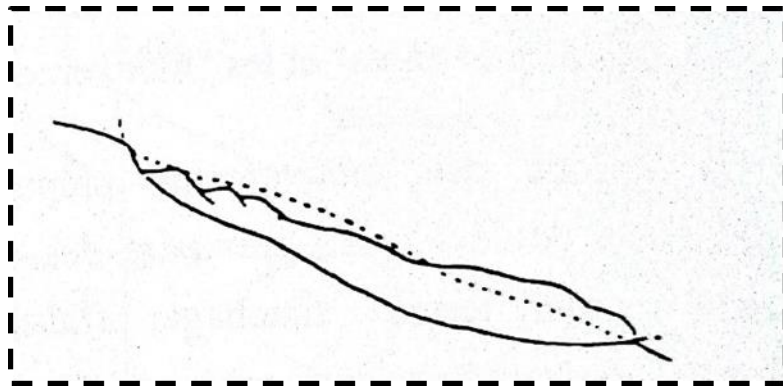


Figure I-9 Le glissement quelconque. (Philipponnat, 1979)

## 3.2 Les mouvements artificiels :

Les talus artificiels sont principalement soumis à des glissements de terrain et parfois à des phénomènes de reptation. Elles peuvent être classées par types d'ouvrages

### 3.2.1 Talus en déblais et talus en remblais sur sols non compressibles :

Lorsqu'un remblai de terre compacté (comme un pont routier) repose sur une couche d'argile molle, de limon ou de tourbe, les fissures potentielles sont profondes et rapides. Si le sol meuble est homogène, les cercles de fissures sont tangents à la base de la couche meuble. (**Figure I-10**).

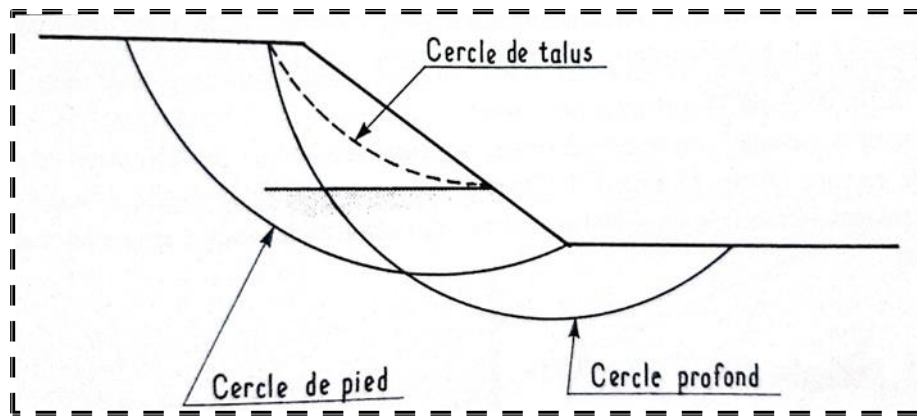


Figure I-10 Les différentes ruptures circulaires (Philipponnat, 1979)

### 3.2.2 Talus en remblais sur sols compressibles :

La rupture observée dans les remblais de sol compacté, (**Figure I-11**) tels que les remblais routiers, est associée à la présence d'une couche d'argile fine, de limon ou de tourbe, qui se trouve souvent en profondeur. Lorsqu'elle est relativement mince, les cercles de rupture sont tangents à la base de cette couche molle. (Philipponnat, 1979) (Khochni.B, 2024).

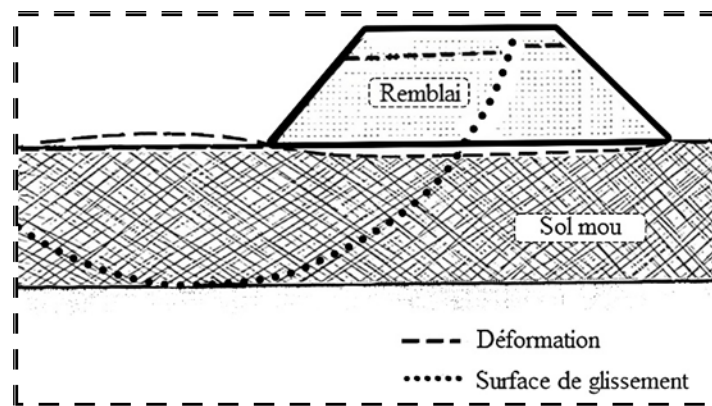


Figure I-11 remblais sur un sol compressible (Philipponnat, 1979)

### 3.2.3 Ouvrages de soutènement vis-à-vis d'un glissement profond :

Concernant ce type de travaux, (**Figure I-12**) il est nécessaire de prendre des mesures de précaution contre le risque de fracture circulaire profonde pouvant toucher l'ensemble de la structure.

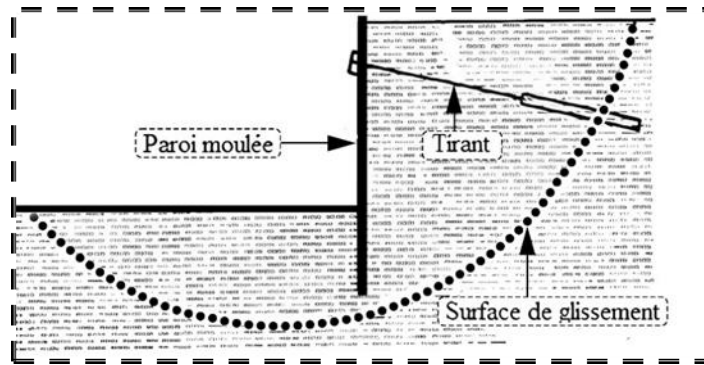


Figure I-12 La rupture circulaire sous un soutènement (Philipponnat, 1979)

### 3.2.4 Dignes et barrages en terre :

L'analyse de la stabilité des pentes, tant supérieure qu'inférieure, s'avère un paramètre déterminant dans la conception des barrages en terre. Dans le cadre de l'analyse des scénarios potentiels, il est impératif de prendre en compte les pressions interstitielles internes au barrage. Dans le cadre de notre démarche, nous procéderons au calcul du facteur de sécurité  $F$  le long des cercles de glissement supposés: (Philipponnat, 1979) (Khochni.B, 2024)

- Lors du remplissage d'eau et avant cela (pendent et après la construction) ;
- Lorsque le barrage vient d'être rempli (avec fuite permanente) ;
- Lors d'une vidange rapide ;

## 4. Les causes des glissements :

Il convient de noter que, indépendamment de leur déclivité, toutes les pentes, qu'elles soient naturelles ou artificielles, sont susceptibles de s'abaisser sous l'effet de divers facteurs aggravants ou déclenchant. Comme montre la (**Figure I-13**) en 1950, Terzaghi a proposé une définition de l'instabilité en l'expliquant comme étant due à des influences d'ordre externe et interne.

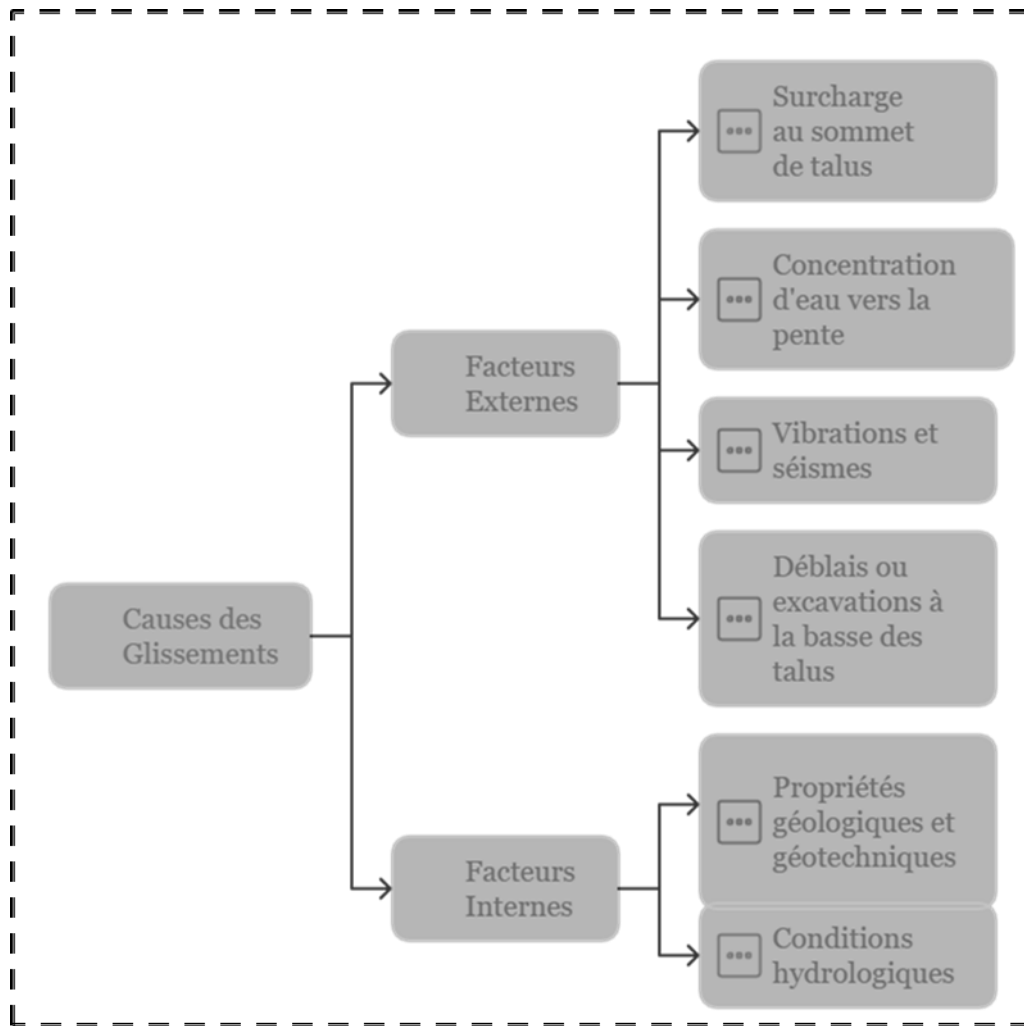


Figure I-13 Organigramme de causes des glissements.

## 4.1 Les facteurs externes :

### 4.1.1 Les actions climatiques :

Les facteurs climatiques dominants sont les apports hydriques. Dans le cadre de l'analyse des facteurs externes susceptibles de modifier l'état d'équilibre d'une pente, il convient de considérer en premier lieu les modifications de la géométrie, du chargement et du déchargement. Dans la plupart des cas, les eaux souterraines sont alimentées par les précipitations atmosphériques, ainsi que par la fonte des neiges. D'autres phénomènes, tels que les infiltrations issues des fossés de rétention et des réseaux d'adduction d'eau ou d'assainissement, peuvent également contribuer à ce cycle hydrologique. (Kezai.I, 2015)

### 4.1.2 La Surcharge au sommet de talus :

L'ajout d'un poids supplémentaire au sommet de talus modifie son équilibre. Ce qui peut

potentiellement causer un glissement durant ou après l'exploitation (**Figure I-14**). Les charges causées par des structures telles que les barrages, les fondations et les soutènements peuvent provoquer des mouvements et des dommages en saillie. De plus, le processus de remblai entraîne généralement une augmentation de la pente du talus, ce qui réduit le facteur de sécurité. ( Bekkouche et marouch, 2024) (Kezai.I, 2015).

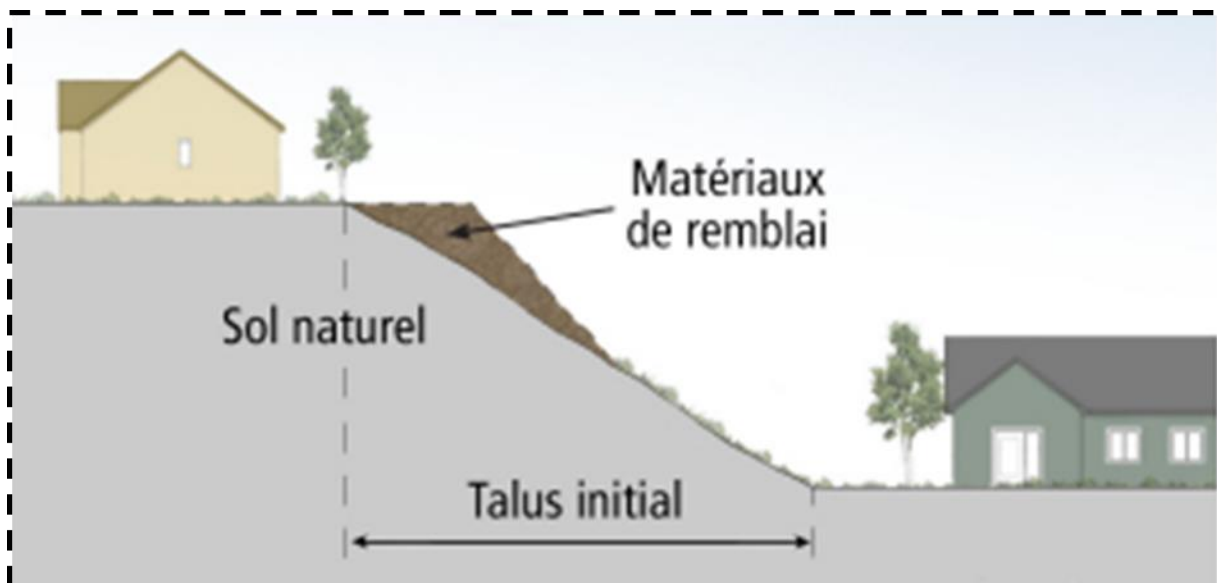


Figure I-14 Le chargement au sommet de talus ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017)

#### 4.1.3 La concentration d'eau vers la pente :

L'évacuation des eaux de pluie, des eaux de drainage, des eaux de ruissellement ou des eaux usées vers une pente ou son sommet peut conduire à l'érosion, à la formation de ravines ou à l'infiltration du sol. Une accumulation excessive d'eau peut compromettre la stabilité de la pente et même provoquer un glissement de terrain. (**Figure I-15**) ( Bekkouche et marouch, 2024).

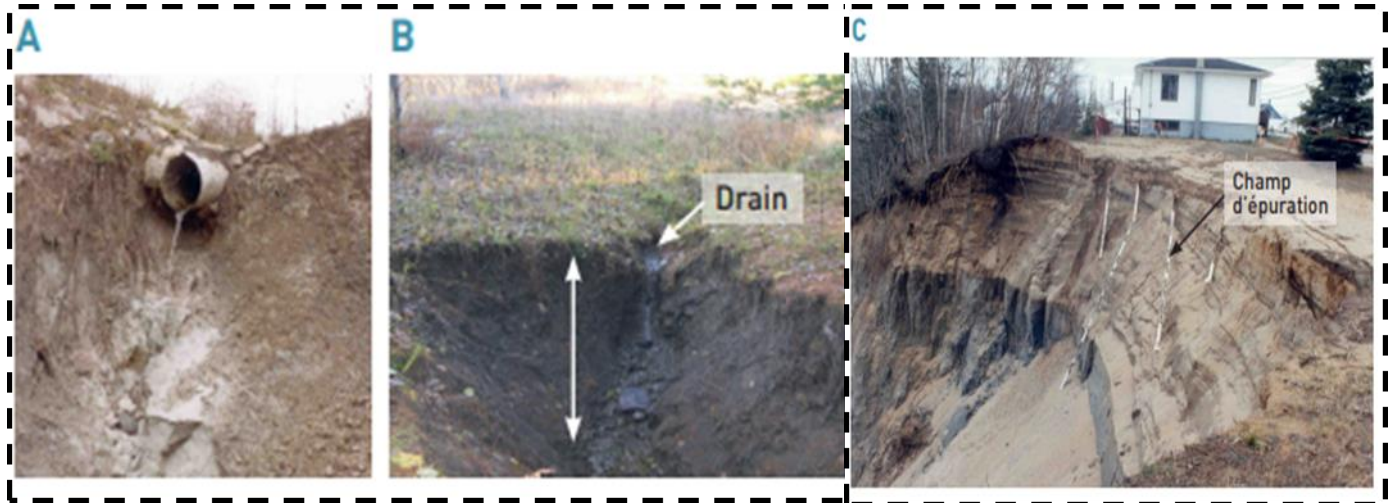


Figure I-15 La concentration d'eau vers la pente ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017)

A) Ravinement provoqué à la sortie d'un ponceau; B) érosion verticale provoquée à la sortie d'un drain; C) infiltration d'eau dans le sol due à un champ d'épuration

#### 4.1.4 Les vibrations et les séismes :

Dans le contexte de risques sismiques, deux phénomènes géologiques majeurs sont à l'origine de glissements de terrain. La liquéfaction des limons et sables fins saturés, d'une part, et la force d'emboîtement déstabilisante induite par le séisme lui-même, d'autre part.

#### 4.1.5 Les déblais ou les excavations à la basse des talus :

Même excavation de faible ampleur ou un déblaiement peut entraîner une rupture lorsque la pente est déjà instable. (**Figure I-16**). Ces travaux d'excavation ont pour effet d'accentuer la pente ou l'élévation, qui peut provoquer un glissement de terrain lors de l'intervention ou à une altération de la stabilité à long terme de la pente. ( Bekkouche et marouch, 2024).

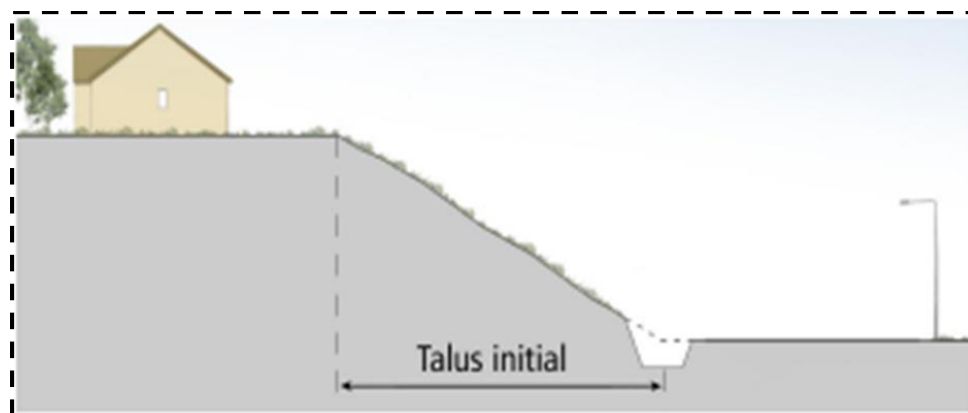


Figure I-16 Les excavations à la base du talus ( Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,, 2017)

## 4.2 Les facteurs internes

### 4.2.1 Les propriétés géologiques et géotechniques :

L'historique de l'état des contraintes prévalant au point considéré, L'état des contraintes est fonction des différentes contraintes appliquées au bloc, telles que le chargement, le déchargement ou la fluctuation du niveau de la nappe phréatique.

L'état de surface du sol est caractérisé par une diminution de la perméabilité due à la végétation ou à la sur-consolidation. Cette réduction du taux d'infiltration et du risque d'instabilité est un phénomène bien documenté. Dans leur étude, Suzuki et Matsuo ont démontré que l'utilisation du béton projeté pour recouvrir les pentes pouvait réduire significativement la probabilité d'instabilité. En effet, ils ont constaté que cette probabilité passait de 80 % à 5 % après une pluie d'une heure.

Par ailleurs, ils ont identifié les formations rencontrées, les discontinuités dans la stratification, la pente des strates et la direction de la pente. En outre, la classification des sols a été abordée, incluant des aspects tels que la granulométrie, la limite d'Atterberg, le poids spécifique et l'analyse minéralogique.

La résistance au cisaillement du sol, notée  $R$ , est une mesure de la résistance à la déformation du sol sous l'action d'une force de cisaillement. Elle est déterminée par deux paramètres : l'angle de frottement interne  $\phi$  et la cohésion effective  $c$ . La résistance au cisaillement est un concept important en géotechnique, car elle influence la stabilité des pentes. (Kezai.I, 2015)

### 4.2.2 Les conditions hydrologiques :

L'élévation de la pression interstitielle dans le sol induit une réduction des propriétés mécaniques ( $\phi$ ,  $c$ ) et par conséquent de la résistance au cisaillement, ainsi qu'une diminution de la consistance du sol.

Les conditions hydrauliques dans les sols sont tributaires de :

- Des propriétés hydrauliques du sol : les sols à faible perméabilité présentent une stabilité supérieure aux sols à forte perméabilité.
- Le système hydraulique : la détermination du régime hydraulique s'avère souvent ardue. Cette difficulté est principalement attribuable à l'ampleur des zones à explorer et à la diversité des sols rencontrés. Ces deux éléments sont d'autant plus complexes à appréhender que des événements tectoniques viennent perturber le niveau des eaux souterraines. Il convient de souligner que certains éléments revêtent une importance capitale dans le cadre de cette étude.

- Il est essentiel de prendre en compte les pressions interstitielles à la surface de rupture. En effet, le niveau d'eau peut être constant ou présenter des gradients de portance le long de la couche affectée par les mouvements.
- L'alimentation hydraulique du site : Des couches plus perméables, dotées d'une capacité d'alimentation élevée, pourrait exister. Il serait donc pertinent de les drainer. En effet, la perméabilité du sol constitue un critère déterminant pour orienter les solutions d'augmentation.
- La nappe phréatique évolue dans le temps ; les mouvements augmentent fortement au-delà d'un seuil critique. (Kezai.I, 2015)

## 5. Méthodes confortatives :

Lors du choix de la méthode de renforcement, plusieurs facteurs doivent être pris en considération, dont les plus importants sont les suivants :

- Les caractéristiques et l'état de chaque site, notamment en ce qui concerne le type de sol.
- Les paramètres spécifiques qui influent sur la capacité de drainage et la surcharge potentielle.
- Compte le coût économique associé à chaque solution.

Ces éléments peuvent être répartis en deux catégories principales (**Figure I-17**). La première est désignée sous le terme approche **douce**, tandis que la seconde est désignée sous le terme approche **dure**.

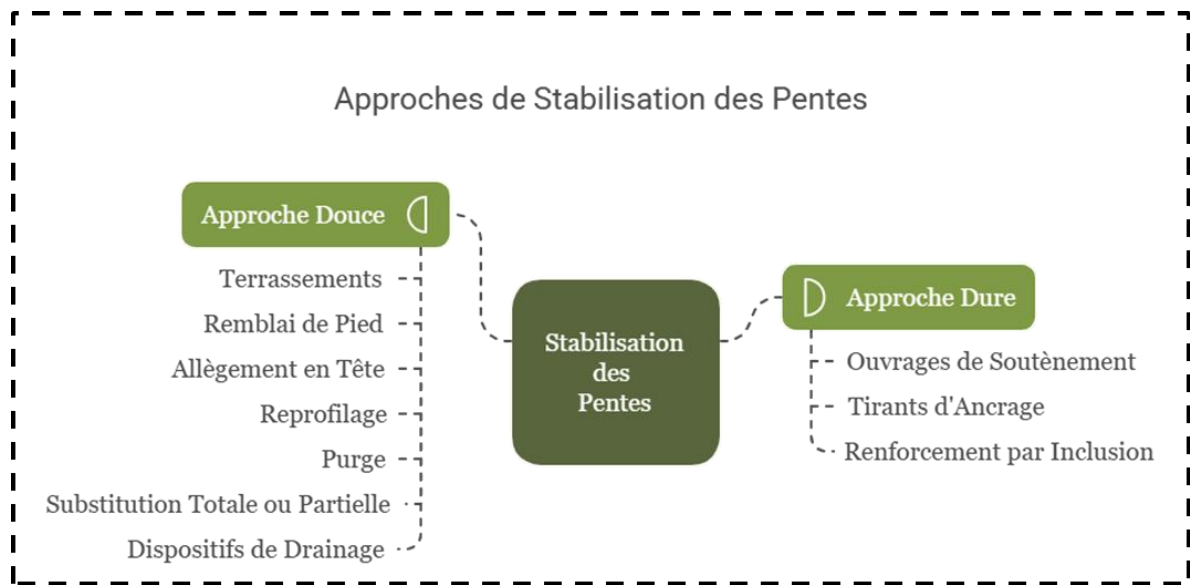


Figure I-17 Organigramme d'approches de stabilisation.

## 5.1 Approche douce :

L'approche douce, c'est une alternative aux techniques traditionnelles de consolidation. Cette approche, qui sera détaillée dans la suite de notre analyse, met l'accent sur l'esthétique et l'intégration environnementale. Cette méthodologie s'avère particulièrement pertinente dans le cadre de sites sensibles, où l'impact visuel des travaux doit être réduit de manière significative. A été identifiée comme une solution potentielle pour la stabilisation des pentes. C'est pour garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages, s'inscrit dans une démarche de respect de l'environnement. (Kezai.I, 2015)

### 5.1.1 Terrassements :

La pente du site a été identifiée comme un facteur crucial. Les travaux de terrassement ont été sélectionnés comme méthode de stabilisation en raison de leur nature adaptée aux caractéristiques du terrain. Une classification des méthodes de stabilisation permet de les regrouper en trois catégories :

- Procédures liées au contrôle de la masse : allègements en tête remblais en pied.
- Procédures liées à la géométrie de la pente : purge et reprofilage.
- Remplacement partiel ou total de la masse instable. (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.2 Remblai de pied :

Le chargement par le bas est une technique fréquemment utilisée et généralement efficace. L'action, également appelée banquettes, berme ou butée, agit en équilibrant les forces motrices. Pour être efficace, il doit être ancré aux structures sous-jacentes en place (**Figure I-18**). Comme

pour un ouvrage de soutènement, la conception doit justifier la stabilité au renversement, la stabilité au glissement sur la base et la stabilité aux glissements importants. (Durville et Séve , 1996)

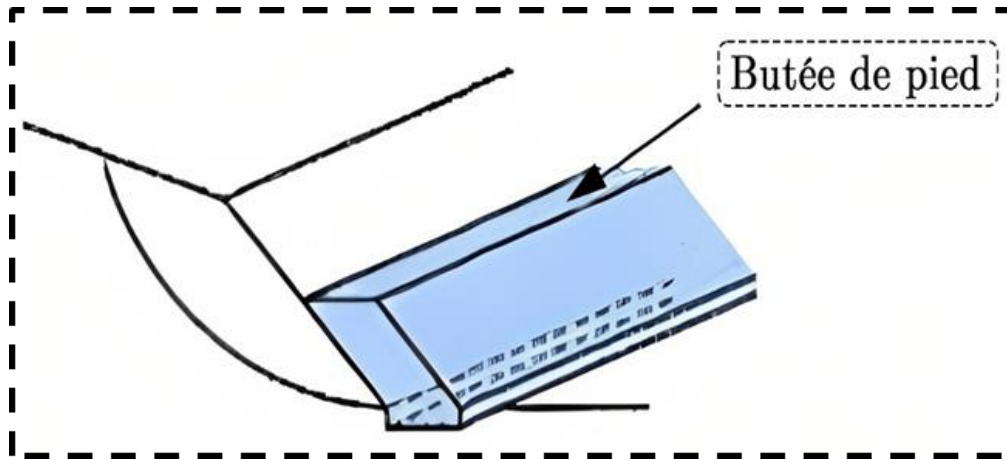


Figure I-18 La butée de pied (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.3 L'allègement en tête :

L'allègement en tête, est attribuable à venir terrasser dans la partie supérieure. Cette approche permet de réduire le poids du moteur, ce qui se traduit par une augmentation du facteur de sécurité. La méthode de conception s'articule autour d'un calcul de la stabilité le long de la surface de rupture déclarée, en tenant compte de l'ajustement de la géométrie à la tête (**Figure I-19**). Il est possible de substituer le matériau terrassé par un matériau léger, tel que le polystyrène ou un matériau de structure alvéolaire, afin de réduire davantage le poids total de la structure. (Durville et Séve , 1996).

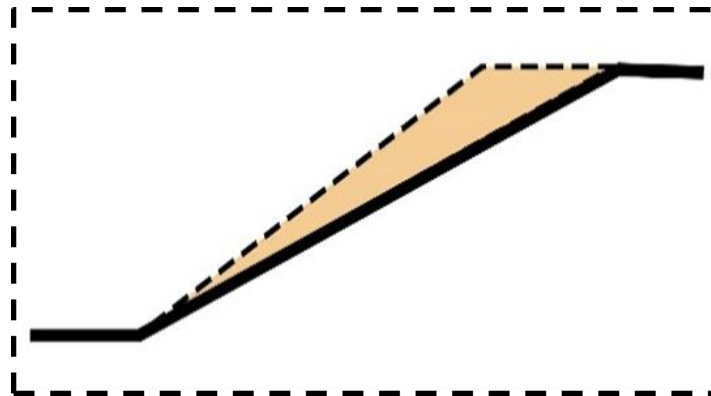


Figure I-19 Allègement en tête de talus (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.4 Le reprofilage :

Nous pouvons résumer le reprofilage en deux étapes :

L'adoucissement de la pente du terrain naturel, par relâchement de la tête, est une méthode couramment utilisée pour découper les pentes (**Figure I-20**).

L'utilisation de barrages améliore la stabilisation des terres et facilite la création de routes d'accès pour l'entretien ou les travaux supplémentaires. (Durville et Séve , 1996).

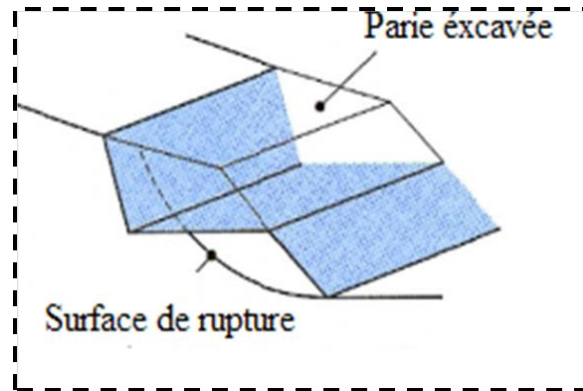


Figure I-20 Adoucissement (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.5 La purge :

Les techniques de terrassement sont fréquemment associées à un déblaiement des matériaux déplacés par glissement. Il a été constaté que cette solution était généralement employée dans le cadre de glissements de taille modeste. Dans certains cas, il est possible d'effectuer une purgeation de l'ensemble des matériaux tombés, à condition que la surface exposée présente une stabilité suffisante (Durville et Séve , 1996).

### 5.1.6 La substitution totale ou partielle :

- La substitution totale consiste à éliminer tous les matériaux qui ont glissé ou qui sont susceptibles de glisser, puis à les remplacer par des matériaux de meilleure qualité. Cela permet de reconstituer le profil initial de la pente. Il est important de
  - vérifier la stabilité pendant les phases de travail ainsi que la stabilité du talus final,
  - tenant compte des propriétés du matériau de remplacement et du matériau en place.
- Les substitutions partielles sont souvent effectuées sous forme de bêches ou de soutènements intermittents (**Figure I-21**). (Khochni.B, 2024) (Pilot, 1973).

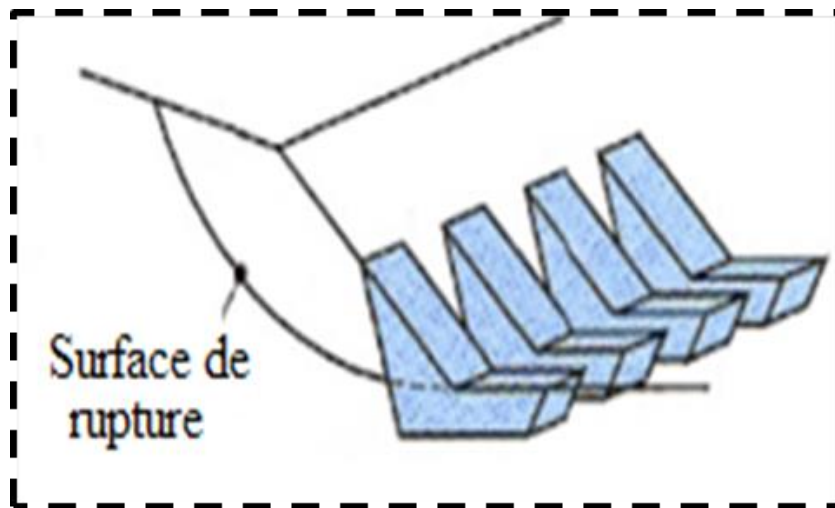


Figure I-21 La substitutions partielles (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.7 Les dispositifs de drainage :

Comme la plupart des structures, les dispositifs de drainage nécessitent un entretien régulier pour rester efficaces. Nous faisons la distinction entre :

- Les drainages de surface (collecte et canalisation des eaux de surface.) ;
- Les travaux de collecte de l'eau ;
- Les tranchées de drainage ;
- Le drainage subhorizontal ;
- Les masques de drainage et les affleurements ;
- Les drains verticaux ;
- Les galeries et autres structures profondes.

Toutes ces techniques peuvent être utilisées individuellement ou en combinaison avec d'autres techniques de stabilisation. (Durville et Séve , 1996)

#### 5.1.7.1 Collecte et canalisation des eaux de surface:

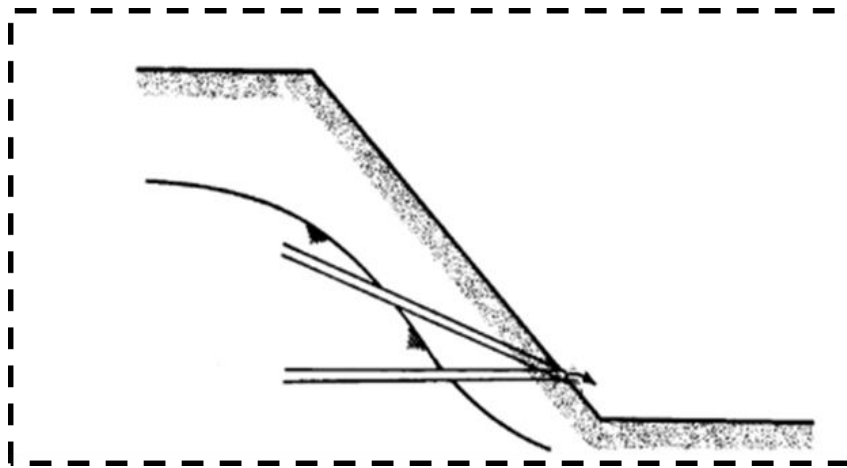
L'objectif à atteindre est de parvenir à une minimisation de l'infiltration dans la masse rocheuse en mouvement. L'eau peut provenir de plusieurs sources distinctes. Elle peut être issue de zones de sources, d'un joint de faille sur une grille ou d'un bassin de stockage en amont. Elle peut également être une eau de pluie ou des eaux de ruissellement. Il a été observé que les eaux de surface présentent une propension à s'infiltrer dans les fissures et à stagner dans les zones à faible pente. Ce phénomène contribue à l'aggravation de l'instabilité déjà amorcée, ce qui nécessite une attention particulière quant à la gestion des ressources en eau et à la prévention des risques d'inondation. (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.7.2 Tranchée drainant:

Les tranchées drainantes constituent une méthode éprouvée pour diminuer le niveau de la nappe phréatique. Ces dernières sont implantées sur le terrain de manière allongées perpendiculaires aux écoulements. Le choix de l'emplacement ainsi que la profondeur et l'espacement des tranchées dépendent des résultats de l'étude hydrogéologique. Ces éléments sont déterminants pour l'efficacité du drainage. Cette opération peut s'effectuer de plusieurs façons : soit par l'intermédiaire d'une pelle mécanique, soit par l'utilisation d'une trancheuse, soit par le biais d'une haveuse de parois. ( Bekkouche et marouch, 2024) (Durville et Séve , 1996)

### 5.1.7.3 Drains subhorizontale:

Pour une nappe trop profonde, La mise en place de drains subhorizontaux peut constituer une stratégie efficace pour réduire les pressions interstitielles et alléger la charge des aquifères localisés (**Figure I-22**). ( Bekkouche et marouch, 2024) (Durville et Séve , 1996).



*Figure I-22 Drain subhorizontale (Cloud front)*

### 5.1.7.4 Masques et éperons drainante :

Les masques drainants sont des ouvrages en matériaux granulaires Masques rugueux, discontinus, difficiles à réaliser, mis en place face à la pente (**Figure I-23**); leur rôle est d'annuler la pression interstitielle dans la partie opposée du terrain, mais leurs propriétés de frottement élevé apportent également un gain de stabilité. (Durville et Séve , 1996).

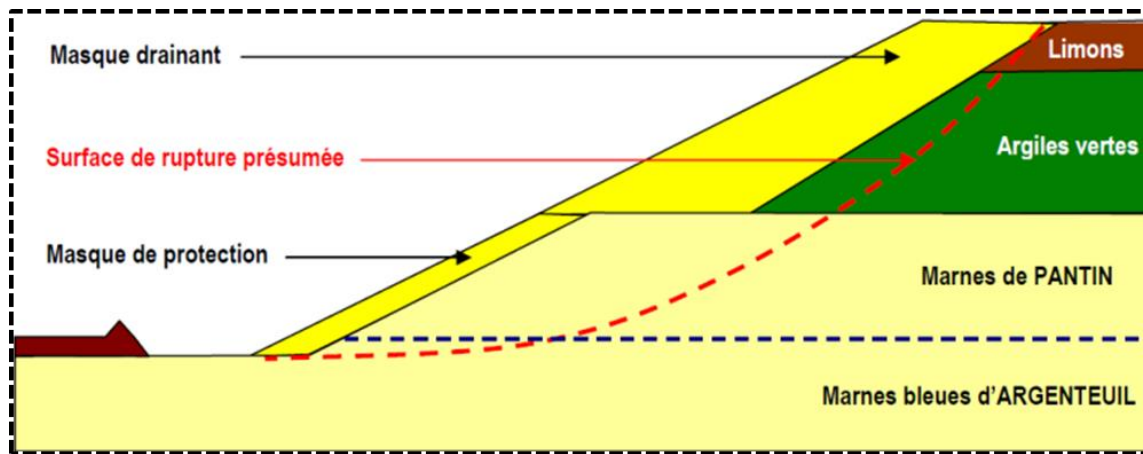


Figure I-23 Masque drainant (Talfumière, 2019)

### 5.1.7.5 Drains verticaux et galerie drainantes :

Les drains à siphon, composés d'un puits vertical équipé d'un dispositif d'extraction de l'eau par siphonage vers un point de la pente situé en dessous du fond du puits (**Figure I-24**), constituent une solution technique pour l'évacuation des eaux. Le creusement de canaux de drainage constitue une solution coûteuse, mais efficace.

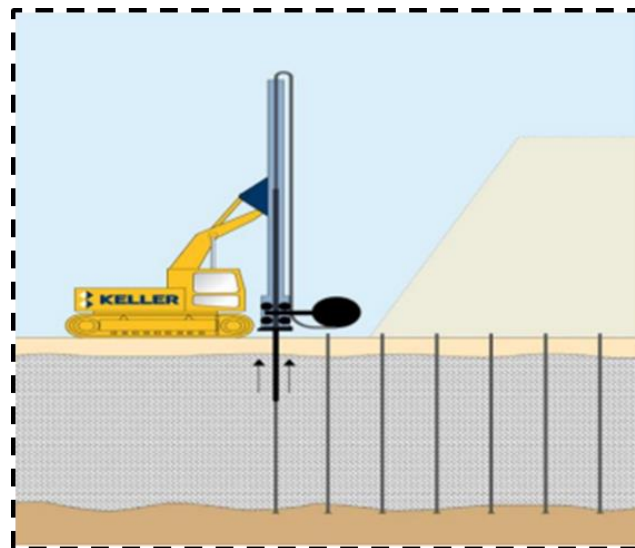


Figure I-24 Drain vertical (Keller Group, 2025)

## 5.2 Approche dure:

Cette approche implique l'utilisation de techniques et de méthodes avancées avec des demandes spécifiques pour modifier les propriétés du sol (mécaniques, physiques ou chimiques). Elle permet d'obtenir des résultats plus rapides et plus fiables en utilisant comme

méthodes de confortements (Belbachir et Amrani , 2020):

- Le soutènement
- Le renforcement
- Le durcissement

### **5.2.1 Ouvrages de soutènement :**

- Les ouvrages rigides : Ne sont pas mieux adaptés à la stabilisation des glissements de terrain, en raison de leur incompatibilité avec toute déformation, comme les soutènements en maçonnerie, les soutènements en béton armé...etc.
- Les ouvrages souples : Des structures obtenues à partir de gabions, de murs cellulaires, ou de sols renforcés par des fils, ou par des armatures synthétiques ou métalliques, au moyen de feuilles géotextiles, de mailles métalliques ou synthétiques. Ces structures agissent comme les poids massifs décrits précédemment, Comme les murs en terre, les murs en gabion... etc. (Durville et Séve , 1996)

### **5.2.2 Les tirants d'ancrage :**

La démarche méthodique entreprise s'articule autour de l'optimisation des forces de glissement actives, tout en maximisant les contraintes naturelles effectives sur la surface de rupture. Dans le cadre de cette étude, des tirants composés de câbles d'acier multitorsons sont ancrés dans le sol stabilisé, à une profondeur correspondant à la surface de rupture. Une force de traction est appliquée à la tête de l'ouvrage. Cette force peut être répartie sur la surface du sol par de petites dalles ou blocs de béton armé. Dans un grand nombre de cas, les tirants sont combinés à un mur ou à des tendons. (Belbachir et Amrani , 2020)

### **5.2.3 Renforcement par inclusion:**

Le renforcement intégré **est** largement utilisé depuis ces dernières années comme technique de stabilisation des pentes instables. Il présente l'avantage d'être facile et rapide à mettre en œuvre, tout en n'affectant pas la géométrie du site. (Durville et Séve , 1996)

On distingue généralement deux catégories d'inclusions :

- Les clous et micropieux.
- Les pieux et barrette.

### 5.2.3.1 Clous et micropieux :

La stabilisation d'un glissement de terrain par clouage (**Figure I-25**) repose sur les principes suivants:

- La partie supérieure de la masse rocheuse en mouvement provoque la déformation des clous.
- Les forces résultantes sont alors transmises par les clous au substrat, qui résiste alors au mouvement.

L'efficacité du processus de clouage repose sur le transfert des forces de traction et de cisaillement au clou. (Durville et Séve , 1996).

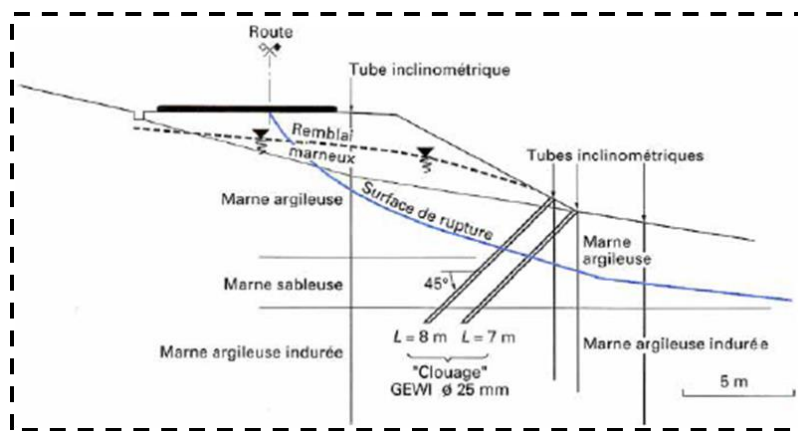


Figure I-25 Renforcement par clouage (Durville et Séve , 1996)

### 5.2.3.2 Pieux et barrettes :

La stabilisation d'un glissement de terrain à l'aide de pieux (tubes métalliques ou pieux en béton armé) ou de tiges repose sur le même principe. Cependant, en raison de leur forte inertie, les pieux travaillent principalement en flexion/cisaillement, tandis que les clous, qui ont une faible inertie, travaillent en traction.

### 5.2.4 Remblai sur sols mous :

Lorsque le sol sous-jacent n'est pas capable de supporter la charge correspondant à la hauteur totale prévue du pont à court terme, il est nécessaire de recourir à des dispositions constructives garantissant la stabilité de la structure pendant la phase de construction et de service.

Différentes méthodes permettent de minimiser le risque de rupture, qui repose sur trois principes :

- Renforcement du sol de fondation, augmentant ainsi sa résistance au cisaillement.

- Réduire la charge appliquée au sol de fondation.
- Renforcement par l'intégration d'éléments résistant. (Durville et Séve , 1996)

## **6.Choix de méthode de confortement :**

Le choix de type de confortement consiste une étape déterminante, indépendamment du rôle du décideur, du concepteur ou de l'exécutant. Cependant, une pléthore d'option peut complexifier la tâche, la méthode choisie doit répondre aux exigences suivantes :

Aspect économique : la méthode de renforcement doit être la moins chère et la plus disponible sur le marché ;

Aspect de la résistance : la méthode choisie doit assurer la stabilisation de la pente, de sorte qu'elle n'engendre aucun risque d'augmentation des forces motrices de la pente ;

Aspect technologique: la méthode doit être simple, nécessiter un minimum d'efforts être facile à mettre en œuvre (facilité de mise en œuvre et manœuvrabilité) (Durville et Séve , 1996)

## **7. Conclusion**

Les glissements de terrain peuvent être d'origine naturelle ou humaine et affecter les pentes naturelles et les structures humaines telles que les routes et les barrages. Ces mouvements comprennent les coulées de boue, les chutes de pierres, la reptation et divers glissements (planaires, rotatifs et composés), chacun étant caractérisé par des causes et des dynamiques spécifiques.

L'instabilité de la Terre est causée par divers facteurs internes et externes. Les facteurs externes comprennent les précipitations, la charge du sol, les tremblements de terre et les vibrations, tandis que les facteurs internes comprennent la nature géologique des matériaux, la résistance au cisaillement, la pression interstitielle et les variations hydrologiques qui affectent la structure du sol.

Les solutions d'augmentation se répartissent en deux grandes catégories : Les méthodes douces, telles que le drainage, le remodelage et le terrassement, qui visent à améliorer la géométrie des pentes et la gestion de l'eau ; et les méthodes dures, telles que les culées, les ancrages et les renforcements de pieux, qui modifient directement les propriétés mécaniques du sol afin d'en améliorer la stabilité.

---

# Références

- Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,. (2017). «*Glissement de terrain dans les dépôts meubles : Types et causes*». Consulté le 05 14, 2025, sur Glissement des pentes dans les depots meubles: [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement\\_territoire/orientations\\_gouvernementales/glissements\\_t errains\\_types\\_causes.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_t errains_types_causes.pdf)
- Bekkouche.Y et Morouch.A. (2024). «*Etude de stabilité d'un glissement du terrain*»129p.PFE Master voie et ouvrage d'art *Univercité de Tlemcen*,Département de Genie Civil,Algérie.
- Belbachir.A et Amrani.W. (2020). «*Développement d'un outil numérique d'aide à la décision : cas de stabilité et confortement de glissement des terrains*» 104p.PFE Master Géotechnique Univercité de Tlemcen, Département de Genie Civil,Algérie.
- Cloud front. *Chapitre IV : «Méthodes de confortement des glissement du terrain.»* Consulté le 05 19, 2025, sur Cloud front: <https://d1n7iqsz6ob2ad.cloudfront.net> > pdf
- Durville,J.L.et Sève G (1996). «*Stabilité des pentes:Glissements en terrain meuble*»17p. Technique de l'ingénieur, France.
- Keller Group. (2025) «*Drains verticaux préfabriqués*». Consulté le 05 06, 2025, sur Keller Group: <https://www.keller-algerie.com/expertise/techniques/drains-verticaux-prefabriques>
- Kezai.I. (2015, 11 25). «Analyse des glissement de terrain de grand ampleur par la methode des element finis». 108. PFE Master Construction Univercité de Tlemcen Département de Genie Civil,Algérie.
- Khochni.B. (2024). «*Stabilisation des Talus par nappage*»126p,Thèse de Doctorat Traveaux Publics Univercité de Sidi Bel Abbes Département de Genie Civil, Algérie.
- Matsui, T. (1992). *Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique, Soils Found*, . 32(1), 59–70.
- Philipponnat.G et Hubert.B, (1998). «*Fondation Et Ouvrage en Terre*»578p Eyrolles.
- Pilot.G (1973). «*Stabilité des pentes: Glissement de terrain.*»20p : Ministère de L'aménagement du Territoire, de L'équipement, du Logement et de Tourisme.Paris, France.
- Reid, R. G. (1999). «*Real-time monitoring of active landslides*». *La Husen and William.L Ellis*. US Department of the interior US Géological servey .
- Sassi, K. (1996). «*Contributions à l'étude des mécanismes de déformation des pentes instables*» 433p, Doctorat Matériaux Structures Physique du batiment Département de Genie Civil, Lyon France.
- Schlosser, F. (1988). «*Élément de mécanique des sol*».275p : Press de l'ecole nationale des ponts et chaussées.
- Talfumièrè, V. (2019, 05 16). 40 ANS de retour d'expérience sur les ouvrage en terre des LGV . *Journée technique CFBR – CFMS –SPTF FNTP du 16 mai 2019*. 40 ANS de retour d'expérience. Consulté le 05 10, 2025, sur Comité française de mécanique des sols: <https://www.cfms->

---

sols.org/sites/default/files/journee-20190516/09.pdfSoliman, M. .. (2014). Bio-inspiring techniques in watermarking medical images: a review. Springer, Berlin, 70, 93–114. Récupéré sur <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43616-5>.

## II. LES METHODES DE CALCUL DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

### 1. Introduction

Les ouvrages en terre, tels que les remblais et les talus d'excavation, éventuellement renforcés, sont justifiés par catégorie selon des méthodes codifiées. Donc, Lorsqu'il s'agit de résoudre ce problème, l'ingénieur se trouve confronté à sélectionner une méthode de calcul parmi la multitude de celles qui sont disponible. Les valeurs des paramètres sont le plus souvent déterminées à l'issue d'une série d'essais.

Il convient de noter que l'impact économique du choix des valeurs des paramètres de conception, ainsi que du facteur de sécurité qui garantit la sécurité de la structure, est loin d'être négligeable.

Les méthodes de calcul de la stabilité couramment utilisées sont fondées sur différentes hypothèses concernant le mode de défaillance (surface de glissement ou recuit en masse) et l'évaluation de la sécurité (équilibre des forces, analyse cinématique). Cependant, il est important de noter que ce type de problème est statiquement indéterminé, ce qui signifie qu'il n'y a pas de solution unique et que les résultats peuvent varier en fonction des hypothèses de départ

Les obstacles d'ordre pratique inhérents à l'emploi de ces méthodologies découlent principalement du caractère essentiellement empirique de la justification des coefficients de sécurité.

Dans le cadre de cette étude, l'objectif de la recherche présentée dans ce chapitre est d'illustrer la démarche de dimensionnement et d'équivalence entre les méthodes de calcul basées sur des données expérimentales.

### 2. Facteur de sécurité

La tâche de l'ingénieur chargé d'analyser la stabilité des pentes consiste à déterminer le facteur de sécurité. En général, ce facteur est défini comme suit :

$$F_S = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = \frac{\text{Résistance au cisaillement maximale mobilisable}}{\text{Résistance au cisaillement nécessaire à l'équilibre}} \quad \text{Équation II-1}$$

Il convient de noter que, selon cette définition, la valeur du facteur de sécurité est une valeur

ponctuelle et dépend de type de surface du glissement étudié et de la position du point testée M.

$$FS = \frac{\text{Effort résistant}}{\text{Effort moteur}} \quad \text{Équation II-2}$$

Cette définition suppose que la surface testée est plane.

$$FS = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment moteur}} \quad \text{Équation II-3}$$

Cette définition suppose que la surface testée est circulaire.

### 3. Approche de la conception.

Avant d'étudier les méthodes générales de calcul il s'avère nécessaire d'examiner quelque cas typiques ainsi que les conditions bidimensionnelles peuvent se produire

#### 3.1 Glissement plan

La figure II-1 représente une pente de longueur infini le massif glisser le long de la pente (Element de mécanique des sols , 1988).

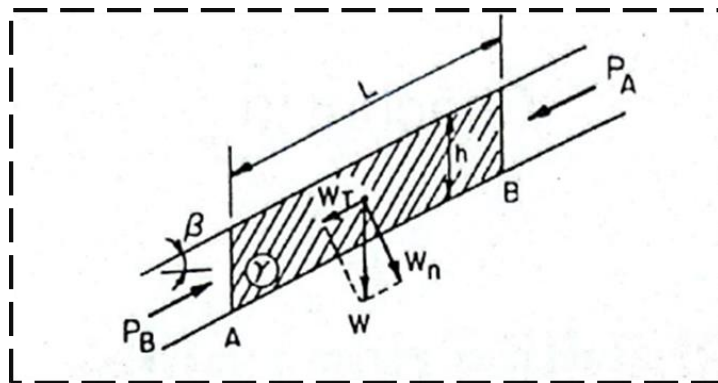


Figure II-1 Le glissement plan. (Schlosser, 1988)

$$FS = \frac{\sum \text{force resistente}}{\sum \text{force motrice}} \quad \text{Équation II-4}$$

$$FS = \frac{T}{W_T} \quad \text{Équation II-5}$$

$W_T$ : la composante tangentielle de poids :  $W_T = W \sin \beta$

$T$ : la résistance au scissaillement du sol :  $T = cL + N \tan \varphi$

### 3.2 Glissement circulaire

Nous précéderons a l'analyse de la rupture circulaire d'un talus d'angle  $\beta$  (l'angle que fait la pente de talus avec l'horizontale) (**Figure II-2**), nous postulons que le cercle est centré en O, et passe par le pied de talus avec un rayon de:

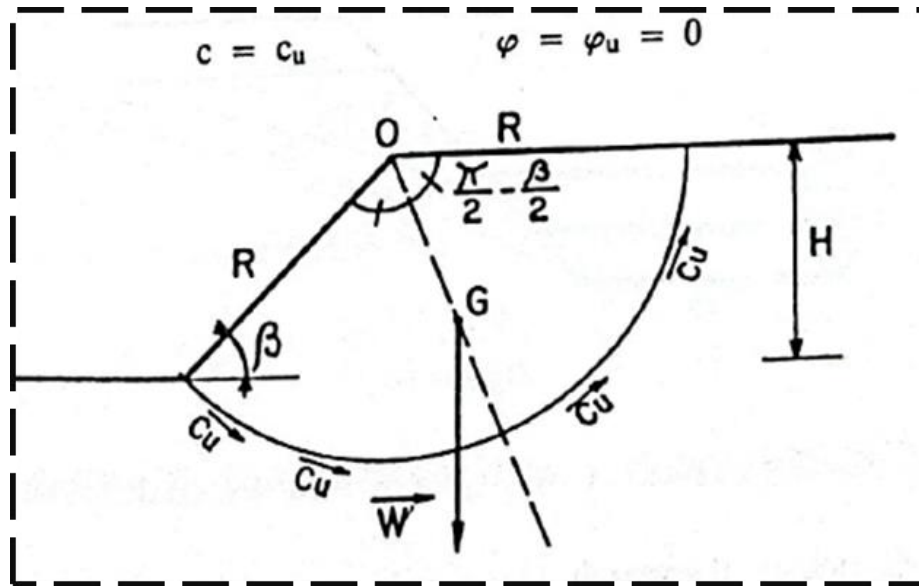


Figure II-2 Le glissement circulaire (Schlosser, 1988)

$$R = \frac{H}{\sin \beta}$$

Équation II-6

Fondation et ouvrage en terre (Philipponnat, 1979)

Le facteur de sécurité est :

$$F_s = \frac{\mathcal{M}/_o(\vec{f} \text{ résistantes})}{\mathcal{M}/_o(\vec{f} \text{ motrices})}$$

Équation II-7

Avec:

$$\mathcal{M}/_o(\vec{f} \text{ résistantes}) = R^2 \cdot c_u \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} \right) * 2$$

$$\mathcal{M}/_o(\vec{f} \text{ motrices}) = OG \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} \right) W$$

### 3.3 Glissement de bloc

Parfois, le mécanisme de rupture le plus probable est le mouvement d'un bloc de sol le long d'une interface prédéfinie en raison de la présence d'une couche faible le long de la base du bloc (**Figure II-3**). L'analyse de la stabilité du bloc ABCD de la figure est appelée analyse de bloc. Dans ce cas, la force de cisaillement  $T$  le long du plan de rupture potentiel DC est: (Briaud, 2013)

Ou le poids du massif  $W = Wt \sin \alpha$

La résistance au cisaillement  $T = c'L + (W \cos \alpha - uwL) \tan \phi'$

La composante de la force active  $Pa \cos(\phi' - \alpha)$

La composante de la force passive  $Pp \cos(\phi' - \alpha)$

$$FS = \frac{c'L + (W \cos \alpha - uwL) \tan \phi' + Pp \cos(\phi' - \alpha)}{W \sin \alpha + Pa \cos(\phi' - \alpha)} \quad \text{Équation II-8.}$$

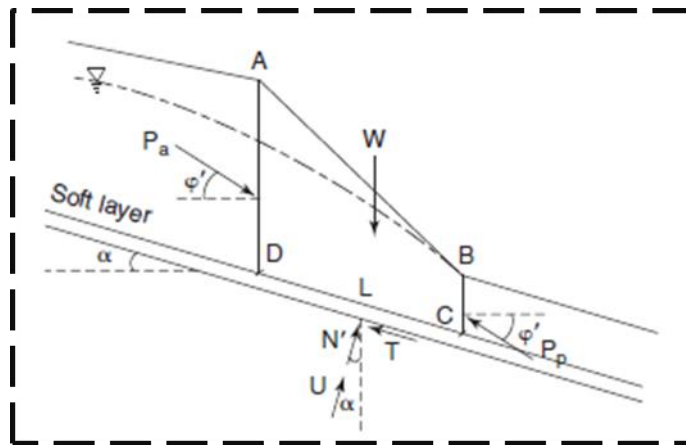


Figure II-3 Le rupture d'un bloc (Briaud, 2013)

#### 4. Pente infini

Pour examiner la question de la stabilité des pentes infinie, comme le montre (**Figure II-4**), La résistance au cisaillement du sol peut être déterminée par l'équation : (Sobhan, 2012)

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{Équation II-9}$$

$c'$ : la cohésion

$\phi'$ : l'angle de frottement

$\sigma'$ : la contrainte normale de rupture

$\gamma$ : le poids volumique du sol

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad \text{Équation II-10}$$



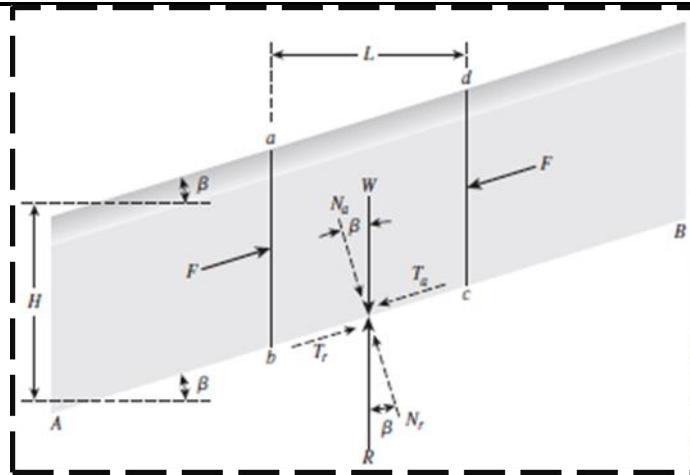


Figure II-5 Analyse de pente infini (sans filtration) (Sobhan, 2012)

L'équation de la contrainte normale totale sur le plan de rupture s'exprime comme suit :

$$\sigma = \gamma_{sat} h \cos^2 \beta \quad \text{Équation II-15}$$

$\gamma_{sat}$  c'est le poids volumique saturé de sol

La pression interstitielle de rupture ;

$$u_w = \gamma_w h_p \quad \text{Équation II-16}$$

$h_p$  c'est la hauteur de pression sur le plan de rupture

Il convient de noter que l'une des propriétés d'un réseau d'écoulement est que la hauteur totale en A (Figure) est égale à la hauteur totale en B. En A (Figure) la pression totale est égale à celle en B. Nous savons également que la hauteur de pression en B est nulle. Ainsi, le sommet au point A est la différence de hauteurs entre les points A et B.

Donc, la hauteur de la charge en A est la différence de hauteur entre A et B :

En A est la différence de hauteur entre A et B :

$$h_{pA} = h \cos^2 \beta \quad \text{Équation II-17}$$

$$h_{pB} = h \cos^2 \beta \quad \text{Équation II-18}$$

$$u_w = \gamma_w h \cos^2 \beta \quad \text{Équation II-19}$$

La contrainte normale effective

$$\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) h \cos^2 \beta \quad \text{Équation II-20}$$

La résistance au cisaillement égale

$$\tau_f = c' + (\gamma_{sat} - \gamma_w) h \cos^2 \beta \tan \varphi' \quad \text{Équation II-21}$$

Le facteur de sécurité devient

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\gamma_{sat} - \gamma_w) h \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma_{sat} h \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Équation II-22}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} \sin \beta \cos \beta} + \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w) \tan \varphi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad \text{Équation II-23}$$

## 5. Force d'infiltration dans l'analyse de stabilité

La force d'infiltration est la force de frottement que l'eau qui s'écoule exerce autour des particules du sol et tente de les éloigner.

La force d'infiltration est une force externe lorsque nous considérons la structure du sol comme le corps libre, mais une force interne lorsque nous considérons à la fois la structure du sol et l'eau comme le corps libre. La plupart des analyses de stabilité des pentes considèrent la structure du sol et l'eau comme des corps libres. Dans ce cas, la force d'infiltration ne doit pas être incluse dans les calculs de stabilité des pentes. **(Figure II-5)** présente deux options pour le diagramme de corps libre.

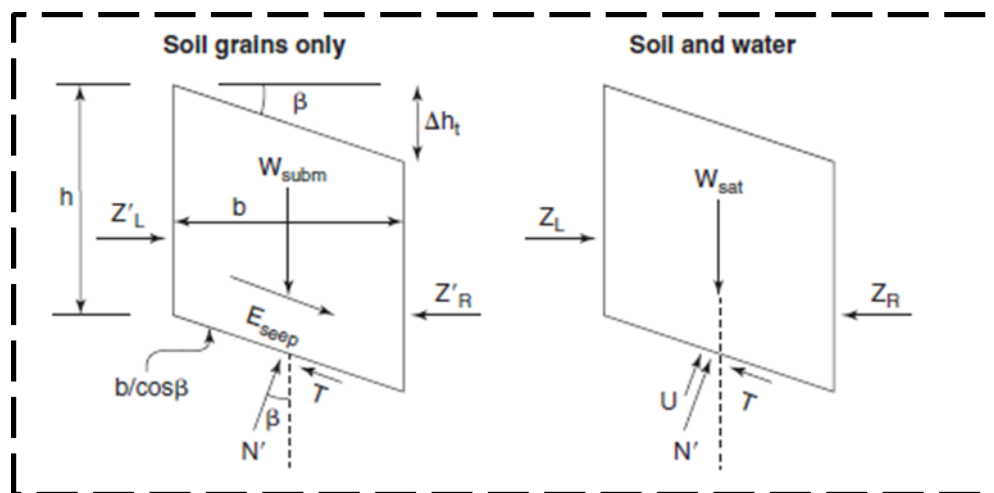


Figure II-5 Approche du squelette du sol et de la force d'infiltration. (Briaud, 2013)

Dans le cas où le corps libre est constitué de particules de sol et d'eau, le poids  $W$  est le poids total incluant les solides et l'eau ; les forces latérales sont la somme des forces  $Z_R$  et  $Z_L$  ; et les

forces vers le bas sont la force normale effective  $N'$ , la force de levage  $U$ , et la force de cisaillement  $T$ . Si le corps libre est constitué uniquement de particules de sol, le poids  $W_{sat}$  est le poids total moins la force de flottabilité, les forces latérales sont les composantes effectives  $Z'R$  et  $Z'L$ , les forces descendantes sont la force normale effective  $N'$  et la force de cisaillement  $T$ , et la force de fuite  $Eu$  doit être incluse. Revenons à l'exemple de la pente infinie dans le cas d'une fuite à travers la pente. Dans la solution présentée dans la sous-section sur le sol  $c' - \phi'$  avec fuite, le corps libre considéré était la structure combinée du sol et de l'eau, comme c'est généralement le cas. Comme vous vous en souvenez, nous n'avons pas tenu compte de la force de fuite dans ce cas. En effet, il s'agissait d'une force interne car elle agit entre les particules et l'eau, qui font toutes deux partie du corps libre. Voyons ce qui se passe si nous considérons la structure du sol seule comme un corps libre.

Poids immergé :

$$W_{img} = (\gamma_{sat} - \gamma_w)bh \quad \text{Équation II-24}$$

Force normale de bas

$$N' = W_{img} \cos \beta = (\gamma_{sat} - \gamma_h)bh \cos \beta \quad \text{Équation II-25}$$

Force de cisaillement sur le fond

$$T = W_{img} \sin \beta + Q_{inf} \quad \text{Équation II-26}$$

La force d'infiltration

$$Q_{inf} = i\gamma_w bh \quad \text{Équation II-27}$$

Le gradient hydraulique

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} = \frac{\Delta h}{\frac{b}{\cos \beta}} = \sin \beta \quad \text{Équation II-28}$$

Contrainte normale sur le fond

$$\sigma' = \frac{N'}{b} = (\gamma_{sat} - \gamma_h)h^2 \cos^2 \beta \quad \text{Équation II-29}$$

Force d'eau appliquée sur la base

$$u_w = \gamma_w h \cos^2 \beta * \frac{b}{\cos \beta} \quad \text{Équation II-30}$$

Donc la contrainte de cisaillement

$$\tau = \frac{T}{\frac{b}{\cos \beta}} = (\gamma_{sat} - \gamma_h)h \sin \beta + \gamma_w h \sin \beta \cos \beta = \gamma_{sat} \sin \beta \cos \beta \quad \text{Équation II-31}$$

La résistance au cisaillement

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\gamma_{sat} - \gamma_h)h \cos^2 \beta \tan \varphi' \quad \text{Équation II-32}$$

Donc le facteur de sécurité devient

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\gamma_{sat} - \gamma_h)h \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma_{sat} h \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Équation II-33}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} \sin \beta \cos \beta} + \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_h) \tan \varphi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad \text{Équation II-34}$$

Le résultat obtenu est identique à celui de l'équation de sol avec infiltrations, mais il est dérivé d'un diagramme de corps libre différent celui du squelette du sol, où l'eau est traitée comme une force extérieure.

Cependant, l'approche la plus simple pour analyser la stabilité des pentes consiste à considérer le sol et l'eau comme un système unique. Dans ce cas, la force d'infiltration devient une force interne, ce qui permet de l'exclure des calculs. Selon la (**Figure II-6**) Rupture de plan le long de la base d'un coin. (Briaud, 2013).

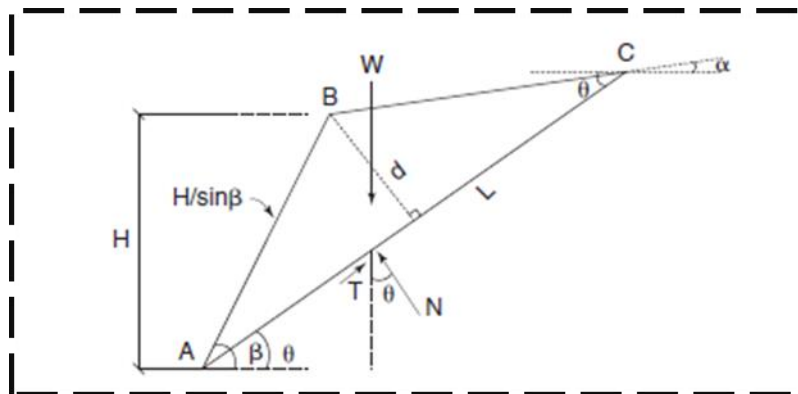


Figure II-6 Rupture plane le long du bas d'un coin. (Briaud, 2013)

## 6. Pression interstitielle pour la stabilité des pentes

La contrainte hydrique a un effet important sur le facteur de sécurité d'une pente. Une contrainte hydrique positive haute dégrade la stabilité, tandis que l'une négative la renforce. Son estimation peut être réalisée par la traversée piézométrique, le rapport de contrainte

hydrique. Ou une grille de valeurs. Une contrainte hydrique peut aussi résulter du chargement, nécessitant une surveillance pour éviter les dépassements critiques, notamment dans les remblais sur argile molle. L'infiltration d'eau modifie la contrainte hydrique par rapport aux conditions hydrostatiques, nécessitant des calculs basés sur la hauteur de charge. La ligne piézométrique, généralement sous la ligne phréatique, peut-être trop conservatrice pour les pentes raides. (Briaud, 2013).

## 7. Les méthodes d'équilibre limites

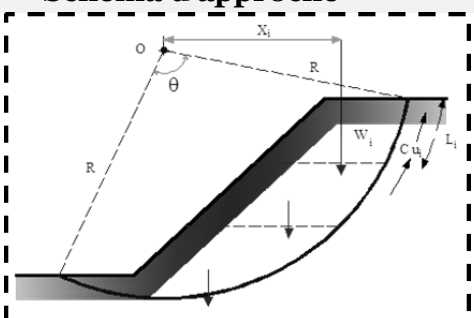
Les approches fondées sur l'équilibre limite peuvent être réparties en deux catégories distinctes :

Les méthodes d'analyse globale sont employées pour les sols homogènes et isotropes. Elles prennent en compte la masse totale du sol délimité par la surface de rupture. Ces méthodes se révèlent particulièrement utiles pour la création de diagrammes permettant de déterminer le coefficient de sécurité et la position de la surface la plus inadaptée.

Les méthodes par tranches constituent des outils analytiques largement exploités. Ces approches méthodologiques offrent la capacité de gérer des configurations de terrain plus élaborées, englobant des profils de pente non linéaires, des variations dans la composition et les caractéristiques du sol, ainsi que des trajectoires de rupture arbitraires. (Schlosser, 1988) (Khochni, 2024)

### 7.1 Les méthodes d'analyses globale

Tableau II-1 La méthode d'analyse globale.

LES METHODES D'ANALYSE GLOBALE			
Méthode	Hypothèses	Eq. d'équilibre	Schéma d'approche
Suédoise $\phi = 0$	Basé sur : - Une surface de glissement circulaire; - L'angle de frottement est nul.	$Fs = \frac{R \sum C_{ui} L_i}{W_i X_i}$	 <p>Figure II-7 La méthode suédoises. (Khochni, 2024)</p>
Cette méthode s'applique aux pentes pour lesquelles l'angle de frottement interne est égal à zéro. autrement dit, elle concerne les analyses des pentes non drainées en argiles saturées. cette approche			

## Chapitre II Les méthodes de calculs des glissements des terrains

méthodique a été adaptée pour les zones de matériaux relativement épaisses, ou la surface de glissement peut être approchée par une forme circulaire.

la spirale logarithmique

Basé sur une surface de glissement sous forme d'une spirale logarithmique

$$Fs = \frac{c}{c_d}$$

$$Fs = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_d}$$

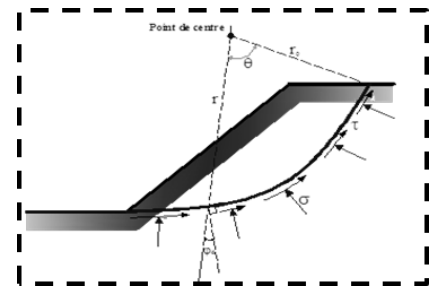


Figure II-8 la méthode spirale logarithmique (Khochni, 2024)

Ces méthodes, qui sont utilisées pour l'élaboration des diagrammes de stabilité des pentes et intégrées dans certains logiciels pour la conception des pentes renforcées, sont applicables aux pentes homogènes précises.

## 7.2 Les méthodes d'analyse par tranche

Tableau II-2 La méthode d'analyse par tranches.

### LES METHODES D'ANALYSE PAR TRANCHE

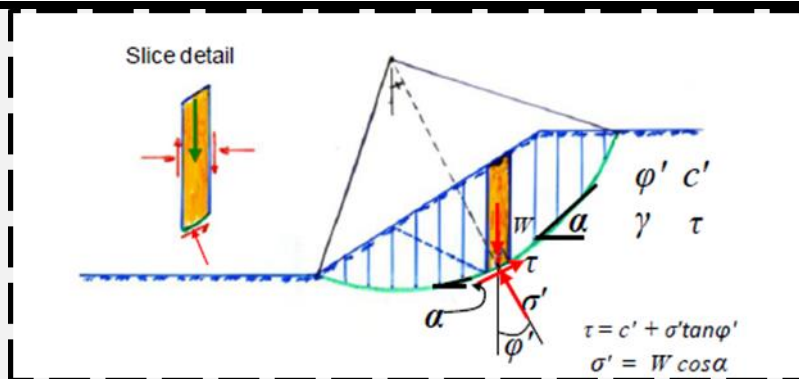


Figure II-II-9 le principe de base de la méthode des tranches (FELLENIOUS ET BENGTH, 2025)

Méthode	Hypothèse	Eq. d'équilibre	Schéma d'approche

JANBU

basé sur :  
Les inclinaisons des forces inter tranches sont prises. (Sobhan, 2012)

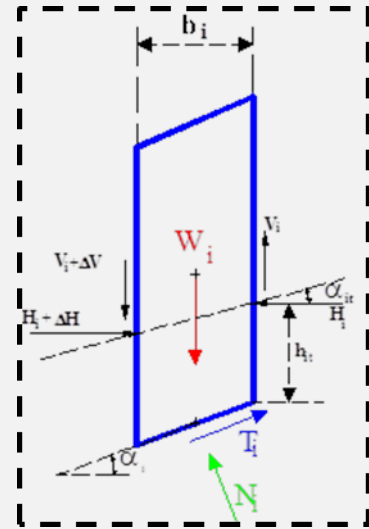


Figure II-10 La méthode de Janbu. (Khochni, 2024)

$$Fs = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} \left\{ [c'_n b_i + (W_i + \Delta V_i - u_i b_i) \tan \varphi_n] \frac{1}{\cos^2 \alpha_i (1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi_n}{F})} \right\}}{\sum_{i=1}^{i=m} (W_i + \Delta V_i) \tan \alpha_i}$$

Cette méthode est applicable a toutes les formes de pente et a tous les types de sol, elle est la seule méthode pratique pour calculer manuellement les glissements de terrain non circulaires.

FELLENIUS

basé sur une surface circulaire avec forces inter-tranches négligeables. (Khochni, 2024)

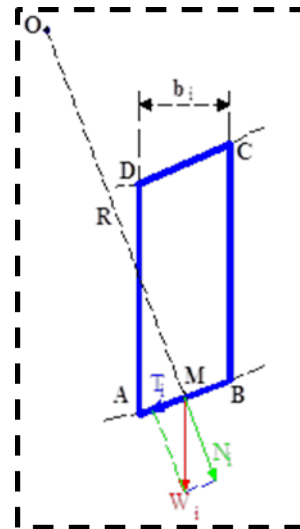


Figure II-11 La méthode de Fellenius. (Khochni, 2024)

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} \left[ c'_n \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + (W_i \cdot \cos \alpha_i - \frac{u_i \cdot b_i}{\cos \alpha_i}) \cdot \tan \varphi'_n \right]}{\sum_{i=1}^{i=m} W_i \cdot \sin \alpha_i}$$

Cette méthode s'applique aux pentes hétérogènes, en particulier aux glissements circulaires, et simplifie les calculs manuels. La méthode n'est pas applicable dans le cas d'un sol contenant une forte pression d'eau.

**Bishop simplifiée**

La méthode base sur la prise en compte de l'effet des forces agissant sur la tranche. (Sobhan, 2012)

$$Fs = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} (c' b_i + W_i \tan \varphi') \frac{1}{m_\alpha(i)}}{\sum_{i=1}^{i=p} W_i \sin \alpha_i}$$

La méthode théorie s'applique aux pentes en sols non homogènes, caractérisées par une cohésion **c** et un angle de frottement interne **φ** avec une surface de glissement approcher a un cercle, c'est la méthode la plus courante dans la majorité des cas, les résultats obtenus sont plus précis et satisfaisants.

## 8. La méthode d'analyse limite

L'analyse limite s'appuie alors sur deux théorèmes fondamentaux :

- le théorème de la borne inférieure, qui établit bel et bien que toute charge en équilibre avec un champ de contraintes ne dépassant jamais le critère de rupture mineure ainsi la charge d'effondrement réelle;
- le théorème de la borne supérieure, qui montre précisément que tout mécanisme cinématiquement admissible majore en fait cette charge. Cette approche, appliquée à la stabilité des pentes, permet d'encadrer par une optimisation successive des bornes la charge critique et modélise le sol comme un matériau parfaitement plastique.

Les méthodes numériques modernes ont considérablement permis d'étendre les applications pratiques, notamment par des éléments finis. L'analyse limite inférieure utilise des champs de contrainte statiquement acceptables avec des éléments linéaires, tandis que l'analyse limite supérieure utilise des éléments quadratiques ou des discontinuités de vitesse afin de minimiser l'énergie dissipée. Aujourd'hui, des outils rigoureux permettent d'étudier les pentes en sols complexes combinant frottement et cohésion, là où les solutions analytiques exactes font défaut. En particulier les travaux de (Chen, 1975) et (Drucker, 1952).

## 9. Analyse par élément fini

La méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour analyser la stabilité d'une pente, et un maillage suffisamment large ( $\geq 3H$  en hauteur et  $\geq 5L$  en largeur (H représente la hauteur de la pente, et L la distance horizontale entre le pied de la pente et le sommet)) est nécessaire pour atténuer l'effet de la condition limite. La MEF présente plusieurs avantages significatifs par rapport aux méthodes classiques d'équilibre limite (Griffiths, 1999):

- Elle ne nécessite pas la définition préalable des surfaces de rupture,
- Elle satisfait automatiquement aux conditions d'équilibre,
- Elle peut modéliser les ruptures progressives et elle tient compte des propriétés mécaniques non linéaires et complexes des sols.
- Cette méthode fournit donc une description plus complète et plus réaliste des mécanismes de rupture, ce qui permet de pallier les insuffisances des procédures précédentes.

### **9.1 La méthode de réduction de la force (SRM)**

Au cours des récentes avancées dans les technologies de l'information, la méthode de réduction des résistances est devenue l'une des solutions les plus prometteuses pour l'évaluer. Initialement développée par (Zienkiewicz, 1975) et son équipe, cette approche a été affinée et validée par de nombreuses études ultérieures. Les avantages clés de SRM par rapport aux classiques méthodes de l'équilibre limite peuvent être énumérés comme suit: (Dawson, 1999); (Matsui, 1992); (Zheng H. S., 2009 ). (Zheng H. T., 2006)

- Elle identifie la surface de glissement critique automatiquement sans nécessiter d'hypothèses simplifiées.
- Elle s'adapte aux configurations géométriques complexes
- Elle fournit des formations précises sur l'état de contraintes et les déformations
- Elle reproduit le comportement mécanique des sols

Cette méthode combine ainsi rigueur scientifique et applicabilité pratique, offrant aux ingénieurs une approche fiable et complète pour l'analyse des pentes, quel que soit leur degré de complexité.

### **9.2 La méthode des éléments finis rigide**

Cette méthode est basé généralement sur des hypothèses explique la méthodologie des

éléments finis rigides;

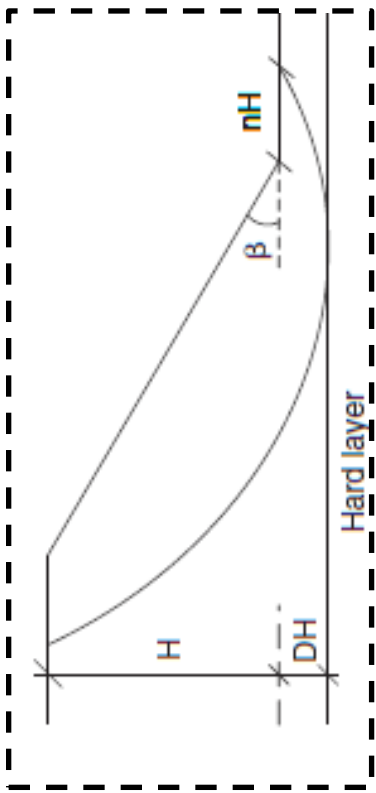
L'ensemble des éléments sont rigides et connectés par une interface d'élément. L'hypothèse propose que l'énergie de déformation soit exclusivement accumulée au niveau des interfaces, induisant ainsi un champ de vitesse discontinu à cette même interface.

L'hypothèse 2 postule que les interfaces sont isotropes avec une déformation plastique parfaite. Cette hypothèse se base sur la condition d'écoulement de Mohr-Coulomb et la règle d'écoulement associée. (Khochni, 2024)

## 10. Les méthodes des abaques

Tableau II-3 Les méthodes d'analyse par abaques.

### LA METHODE DES ABBAQUES

Méthode	Hypothèses	Equation	Schéma d'approche
<p><b>L'abaque De Taylor</b></p>	<p>Ce s'applique lorsque le sol est uniforme,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\varphi' &gt; 0</math>,</li> </ul> <p>La résistance au cisaillement non drainée analyse des contraintes totales</p> <p><math>\varphi' &gt; 0, c' &gt; 0</math>,</p> <p>Pas d'eau, analyse des contraintes effectives</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>F_s = \frac{S_u}{c_d}</math></li> <li>• <math>F_d = \frac{c'}{c_d}</math> et</li> </ul> $F_\varphi = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_d}$	 <p>Figure II-12 Paramètres de pente pour le graphique de Taylor. (Briaud, 2013)</p>

L'abaque De Spencer

La surface des eaux souterraines se trouve à l'intérieur du cercle de pente et la surface de rupture est considérée comme circulaire.

$$r_u = \frac{\gamma_w}{\gamma_t} * \frac{\text{Surface (ABGEFA)}}{\text{Surface(ABCDEF)}}$$

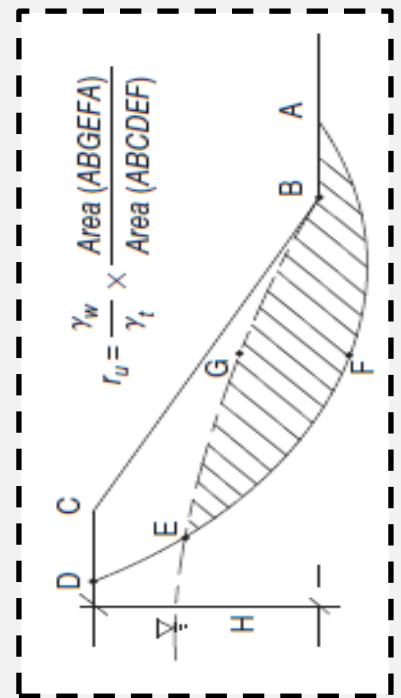


Figure II-13 Paramètres de pente pour le graphique de Spencer (Briaud, 2013)

L'abaque De Janbu

Applicable sur :

- sol a plusieurs couches
- une surcharge existe au sommet de la pente,
- une fissure existe au sommet de la pente
- comportement non drainé à court terme.

$$P_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t}$$

$$P_e = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H'_w}{\mu_q \mu'_w}$$

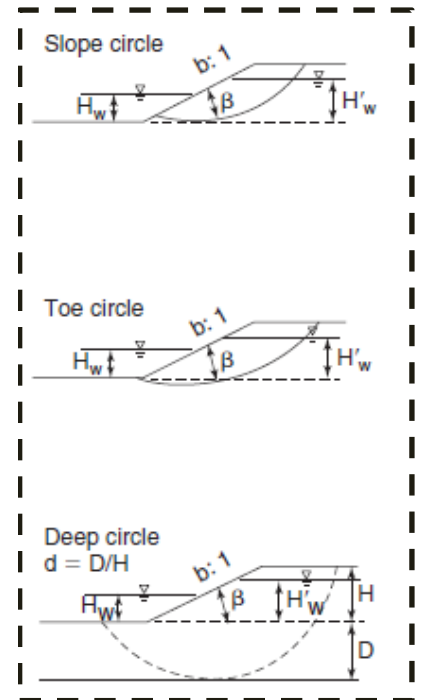


Figure II-14 Paramètres de pente de Janbu pour le facteur de réduction de la submersion (Briaud, 2013)

11. Analyse des pentes sismique

Un tremblement de terre peut provoquer la rupture d'une pente qui est censée être stable. En effet, le séisme accroît le risque de rupture de la pente et, dans certains sols, il peut diminuer la résistance au cisaillement du sol en augmentant la contrainte de compression de l'eau sous l'effet de mouvements cycliques.

Ce qui peut entraîner une liquéfaction. Il y a différentes techniques à utiliser pour tenir compte de la charge sismique dans l'étude de stabilité des pentes:

- La méthode pseudo statique;
- La méthode de déplacement de Newmark;
- Méthode de stabilité post-séisme;
- Méthode des éléments finis dynamiques.

## 12. Fondements mathématiques des méthodes d'optimisation appliquées à l'analyse de la stabilité des pentes

Tableau II-4 Les méthode d'analyse moderne.

L'algorithme	Définition
Algorithmes Heuristiques	<p>Les heuristiques procèdent par exploration stochastique ou règles métier pour identifier des solutions quasi-optimales, offrant un compromis efficace entre précision et coût calculatoire lorsque des solutions exactes s'avèrent inaccessibles</p> <p>Ces algorithmes intelligents trouvent des solutions 'assez bonnes' rapidement là où les méthodes classiques seraient trop longues ou complexes. (Cook, 1983).</p>
Algorithme génétique (GA)	<p>L'algorithme génétique (GA), proposé initialement par Rechenberg en 1965 et approfondi par Holland en 1975, est une méthode d'optimisation stochastique inspirée de la théorie de l'évolution de Darwin. Il exploite les mécanismes fondamentaux de la génétique naturelle, tels que la reproduction, le croisement, la mutation et la sélection naturelle, pour explorer les solutions possibles. Particulièrement efficace pour résoudre des problèmes de maximisation sans contrainte, il constitue une approche robuste pour l'optimisation globale. (Rechenberg, 1965) (Holland, 1975)</p>

Intelligence de l'essaim (SI)	<p>Les techniques d'optimisation basées sur l'intelligence en essaim (IS) imitent les comportements collectifs d'organismes comme les oiseaux, les poissons et les insectes (Blum, 2008) .</p> <p>Elles incluent des méthodes comme l'optimisation par essaim de particules et par colonie de fourmis, offrant adaptabilité et efficacité supérieures aux approches classiques. (Soliman, 2014)</p>
L'UTILISATION DE SAR DANS LES GLISSEMENTS	<p>Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) est une technologie satellitaire ou aéroportée qui mesure avec précision millimétrique l'humidité du sol et les déplacements de surface en exploitant des micro-ondes. Son principe fondamental repose sur l'interaction entre les ondes émises et l'eau contenue dans le sol : plus le sol est humide, plus il réfléchit l'énergie vers le capteur, augmentant ainsi la rétrodiffusion. Cette capacité permet des applications cruciales comme la surveillance agricole, la prévision des inondations et la gestion des ressources en eau. Parallèlement, le SAR détecte les déplacements du sol (notamment pour les volcans, glaciers, mines et infrastructures telles que barrages ou ponts), en analysant les variations de phase des ondes. Ses atouts majeurs incluent une insensibilité aux conditions météorologiques (pénétration des nuages), une couverture large échelle (jusqu'à 250 km × 250 km pour Sentinel-1) et l'accès gratuit aux données de la mission Sentinel-1 de l'ESA. En combinant l'analyse de la réponse diélectrique de l'eau pour l'humidité et celle de la phase des ondes pour les déplacements – notamment via l'interférométrie –, il constitue un outil unique pour la surveillance environnementale et la prévention des risques naturels. (Lis et Jad, 2025)</p>

### 13. Les méthodes de réparation et de surveillances

Il existe essentiellement deux méthodes pour réparer une pente proche de la rupture:

- augmenter le moment résistant (par exemple, améliorer le sol ou y introduire des inclusions).
- diminué le moment d'enfoncement (par exemple, en créant une pente plus faible).

La surveillance consiste à effectuer des observations ou des mesures sur une pente afin d'évaluer sa stabilité. Parmi les paramètres les plus utiles à observer ou à mesurer figurent:

- Les fissures, notamment en haut de pente ;
- Les mouvements de la pente en surface ou en profondeur;
- Les eaux souterraines et les conditions de stress hydrique. (Briaud, 2013)

## **14. Conclusion**

Ce chapitre explore les différentes méthodes de calcul de la stabilité des pentes, en mettant en avant leurs fondements théoriques, leurs hypothèses et leurs applications. Il met en évidence la complexité du choix méthodologique auquel l'ingénieur est confronté, notamment en raison des diverses approches basées sur l'équilibre limite, les méthodes numériques et les outils graphiques.

L'analyse souligne que chaque méthode repose sur des hypothèses spécifiques qui influencent les résultats obtenus. Le facteur de sécurité est central dans cette évaluation et varie selon la nature du sol, les conditions hydrologiques et les sollicitations externes. L'intégration des contraintes hydriques, des forces d'infiltration et des sollicitations sismiques dans les calculs permet de mieux cerner les phénomènes de rupture et leurs impacts.

En conclusion, ce chapitre met en avant l'importance d'une approche rigoureuse et adaptée à chaque cas d'étude, en tenant compte des paramètres expérimentaux et des limites des méthodes utilisées. L'évolution vers des techniques numériques comme la méthode des éléments finis et la réduction de la force (SRM) offre une meilleure compréhension des mécanismes de rupture et une modélisation plus précise des glissements de terrain. Cette diversité méthodologique souligne la nécessité d'une analyse critique pour garantir des solutions efficaces et économiquement viables en ingénierie géotechnique.

## Références

- Blum, C. a. (2008). « *Swarm intelligence in optimization, Swarm intelligence: Introduction.* »
- Briaud, J. (2013). « *Geotechnical Engineering : Saturated Unsaturated Soil de Jean.L Briaud.* », 1022p Wiley & Sons, Canada
- Chen, W. (1975). « *Limit Analysis and Soil Plasticity, Developments in geotechnical engineering, vol.7.* » Amsterdam, The Netherlands.
- Cloud front. (s.d.). « *Chapitre IV : Méthodes de confortement des glissement du terrain* ». Consulté le 05 19, 2025, sur Cloud front: <https://d1n7iqsz6ob2ad.cloudfront.net> > pdf
- Cook, S. (1983). « *An overview of computational complexity* ».
- Dawson, E. M. (1999). « *Slope stability analysis by strength reduction* ». J.Geotechnique.
- Drucker, D. C. (1952). « *Extended limit design theorems for continuous media* ». Math.
- Durville et Séve . (1996). « *Stabilité des pentes: Glissements en terrain meuble.* » 20p: Technique de l'ingénieur, France.
- Fellenius et Bength.H . (2025). « *Basics of foundation design* », 570p. <Bengt@Fellenius.net> Sidney, British Columbia.
- Griffiths, D. V. (1999). « *Slope stability analysis by finite elements.* » Géotechnique.
- Holland, J. (1975). « *Adaptation in natural and artificial systems.* » . University of Michigan Press”, Oxford.
- Khochni, B. (2024). « *Stabilisation des Talus par nappage* », Département de Genie Civil Thèse de Doctorat Traveau Publics Univercité de Sidi Bel Abbes, Algérie.
- Lis.A Jad A, (2025). « *Connect the content of soil moinsture derived from satelites with the power of the soil and the stability of the slope using the analysis of the limited elements.* » Webinaire, Geofem et Bentley, powred by ON24
- Matsui, T. a. (1992). « *Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique, Soils Found* ».
- Philipponnat.G et Hubert.B, (1998). « *Fondation Et Ouvrage en Terre* » 578p Eyrolles.
- Pilot.G (1973). « *Stabilité des pents: Glissement de terrain.* » 20p : Ministère de L'aménagement du Territoire, de L'equipement, du Logement et de Tourisme.Paris, France.
- Rechenberg, I. (1965). « *Cybernetic solution path of an experimental problem* ». Library Translation1122, Royal Aircraft Establishment, Farnborough.
- Sassi, K. (1996). « *Contributions à l'étude des mécanismes de déformation des pents instables* » 433p, Doctorat Matériaux Structures Physique du batiment Département de Genie Civil, Lyon France.
- Schlosser, F. (1988). « *Elément de mécanique des sol* ». 275p : Press de l'ecole nationale des ponts et chaussées.
- Sobhan, k. B. (2012). « *Principles of geotechnical engineering* ». Cenrage Learning Florida, United State America.
- Soliman, M. (2014). « *Bio-inspiring techniques in watermarking medical images: a review.* Springer » Berlin, sur <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43616-5>.

## *Chapitre II Les méthodes de calculs des glissements des terrains*

---

- Zheng, H. S. (2009). «*A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique*». J Comput, Geotech.
- Zheng, H. T. (2006). «*On two definitions of the factor of safety commonly used in the finite element slope stability analysis*». J Comput, Geotech.
- Zienkiewicz. (1975). «*Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics*». Géotechnique.

# **Partie Pratique**

---

# **III. MODELISATION DES OUVRAGES GEOTECHNIQUE « ETUDE D'UN CAS DE GLISSEMENT DE TERRAIN »**

## **1. Introduction**

Ce chapitre traite de la recherche sur la stabilité d'un véritable glissement de terrain dans l'un des talus-littoraux de la rocade côtière entre PK1+000 et PK1+150 à Ghazaouet. L'analyse, réalisée à l'aide du logiciel Plaxis 2D, adopte une approche méthodologique classique consistant en la caractérisation de l'ampleur du phénomène, l'identification des causes de l'instabilité, l'analyse des facteurs déclenchants et l'interprétation des résultats géotechniques. La modélisation numérique peut tester l'impact des paramètres climatiques, particulièrement les précipitations et les variations thermiques, sur la stabilité du talus, donc pour mieux considérer les mécanismes en jeu dans ce mouvement de terrain.

## **2. Présentation de cas étudié**

### **2.1 Description globale.**

Cette analyse examine un cas de déstabilisation survenu lors des travaux préliminaires de terrassement pour la route pénétrante Ghazaouet-autoroute Est-Ouest, affectant spécifiquement un talus adjacent à des terres agricoles (l'ajout des charges permanentes importantes). Lors de la réalisation d'un autre projet d'une route côtière reliant Ghazaouet et Marsa Ben M' Hidi, un projet de construction routière, qui consiste en une double chaussée, Le tracé de la route est susceptible de traverser le territoire du Terrain agricole. L'excavation des sols en pied de talus correspond à une suppression de butée, entraînant mécaniquement une perte de stabilité. Cette intervention modifie radicalement l'équilibre des contraintes de ce talus.



Figure III-1 Talus avant le chargement dans l'état stable. (Société d'étude technique de sétif, 2022)



Figure III-2 Talus après le chargement en 2017. (Société d'étude technique de sétif, 2022)

## 2.2 Contexte hydrologique et hydrogéologique

Relevé périodique de niveau d'eau dans les différents sondages selon le rapport géotechnique de LTPO : SC1 : Sondage N°1 SC3 : Sondage N°3 (LTPO, 2021)

Table III-1 La variation des niveaux de la nappe d'eau.

Date de relevé	Sondage	Niveaux d'eau nette	Date de relevé	Sondage	Niveaux d'eau nette
22/08/2021	SC1	17.8m	14/09/2021	SC1	17.6m
	SC3	6.75m		SC3	6.87m
31/08/2021	SC1	17.6m	23/11/2021	SC1	17.75m
	SC3	7.05m		SC3	6.82m

### 2.3 Diagnostique du glissement

La zone instable équivaut à environ 7 500 m<sup>2</sup> de terres agricoles, d'une longueur de 200 m dans l'axe de la route et d'une largeur de 65 m perpendiculairement à celle-ci. L'instabilité s'est manifestée par le développement d'une fissure centimétrique qui s'étendait de la base du talus jusqu'à son sommet, avant de se poursuivre sur le talus amont sur une longueur de 100 mètres. Pour cette raison, les travaux de construction ont été suspendus dans la section affectée par le glissement.

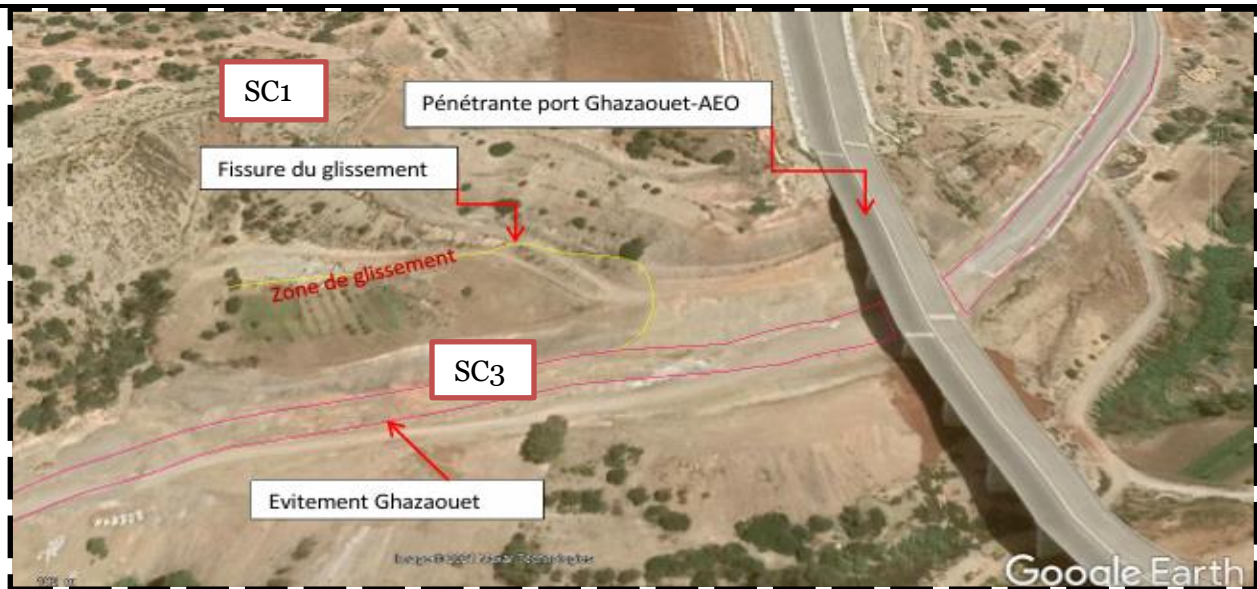


Figure III-3 Trajectoire de la fissuration en 03/2021 localisé sur Google Earth. (Société d'étude technique de sétif, 2022)



Figure III-4 Début de fissuration au niveau de tête et le long du pied de talus amont.

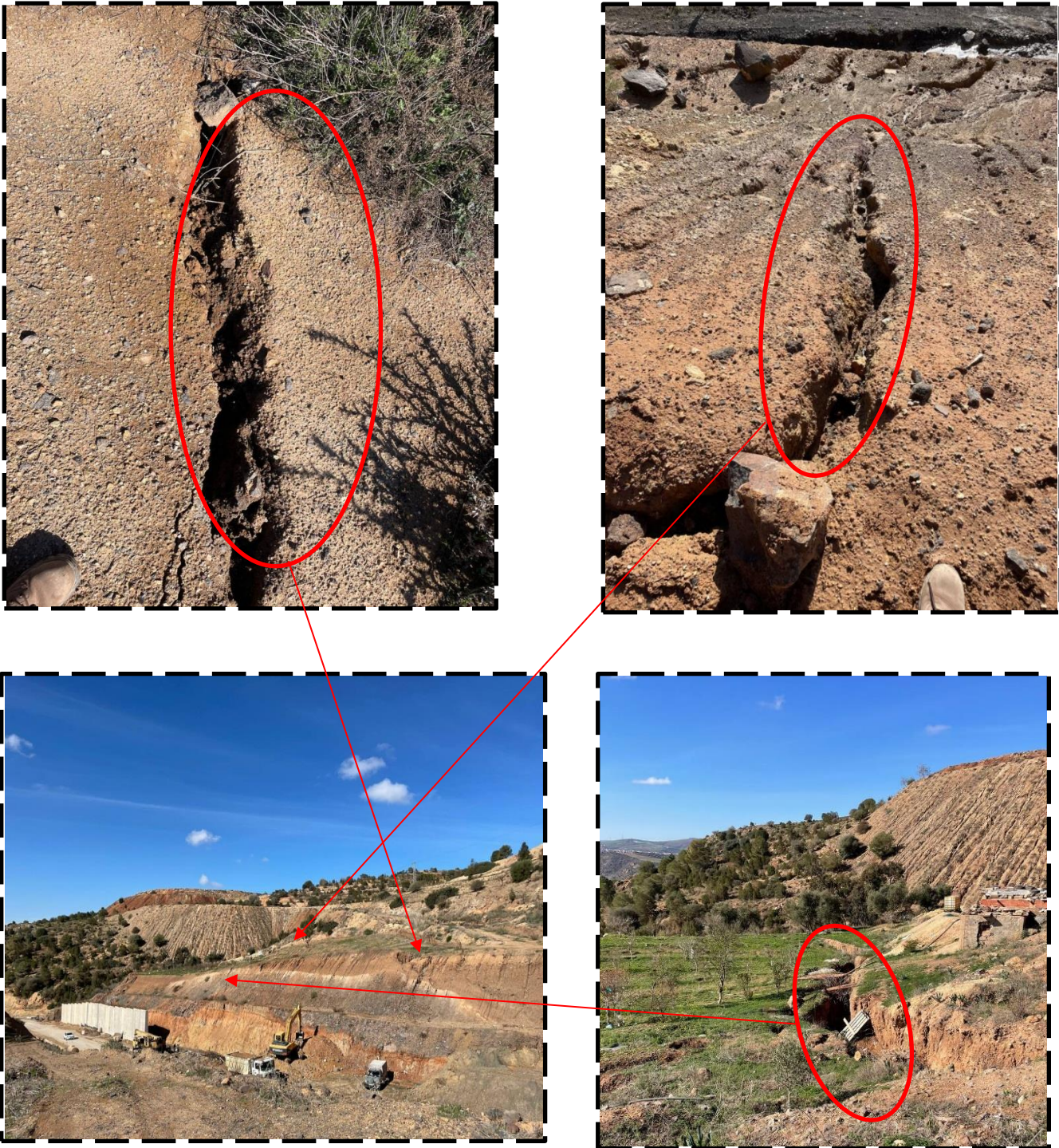





Figure III-5 Fissures longitudinale centimétriques. (Photo prise by (Medjahdi.M, 2025)

### 2.4 Caractérisations du terrain

Tableau III-1 Les caractéristiques du terrain selon les sondages.

LES COUCHES DU SOL	$\gamma_{nsat}$ (KN /m3)	$\gamma_{sat}$ (KN /m3)	$E$ (MPa)	$\nu$	$C$ (KPA)	$\varphi$	$\psi$
ARGILE MARNEUX 	18.40	19.40	30	0.35	30	12°	0°
MARNE SHISTEUSE 	20.30	21.30	32	0.33	20	15°	0°
ROCHE VOLCANIQUE 	22	23	25	0.35	250	5°	0°

## 2.5 Modélisation numériques

Face à ce phénomène de glissement de terrain identifié, une solution technique combinée a été développée, synthétisant les propositions initiales de la société. L'entreprise SEROR et le bureau d'étude SET Sétif a retenu une solution de stabilisation combinant un **mur de soutènement fondé sur pieux**, dont la mise en œuvre a été initiée selon une méthodologie rigoureuse. Avait démontré une stabilité acceptable avec un coefficient de sécurité de 1,23 selon la modélisation du rapport Set Sétif. Notre approche est enrichie par les travaux de **BENTALHA Hicham et MEDJAHDI Mehdi (2ème PFE)** qui ont optimisé ce système par un recalibrage dimensionnel du mur de soutènement, l'intégration d'un drain vertical utilisant des matériaux locaux, et une meilleure gestion des eaux de ruissellement. Cette solution composite offre des avantages multidimensionnels, combinant la stabilité géotechnique grâce à l'adaptation d'un modèle de référence qui comprend l'ensemble du système pente, mur, pieux et système de drainage. Ce modèle servira de base à l'étude, permettant une analyse globale des interactions mécaniques afin d'optimiser la stabilité du talus et la résistance des structures associées.

### 2.5.1 Géométrie du modèle étudié

Dans le cadre de ce projet, l'intégration simultanée d'un mur de soutènement et d'un système de drainage a pour objectif de prévenir et stabiliser le talus, en limitant d'une part la poussée des sols correspondant notamment à l'hydraulique du sol et, d'autre part, la variation des efforts hydrauliques sur les matériaux de soutènement. Pour ce faire, le mur de soutènement joue un rôle fondamental dans le maintien des matériaux du versant pour limiter les déformations à la fois sous l'effet des charges et des contraintes latérales induites sur le matériau du soutènement (sol ou roche).

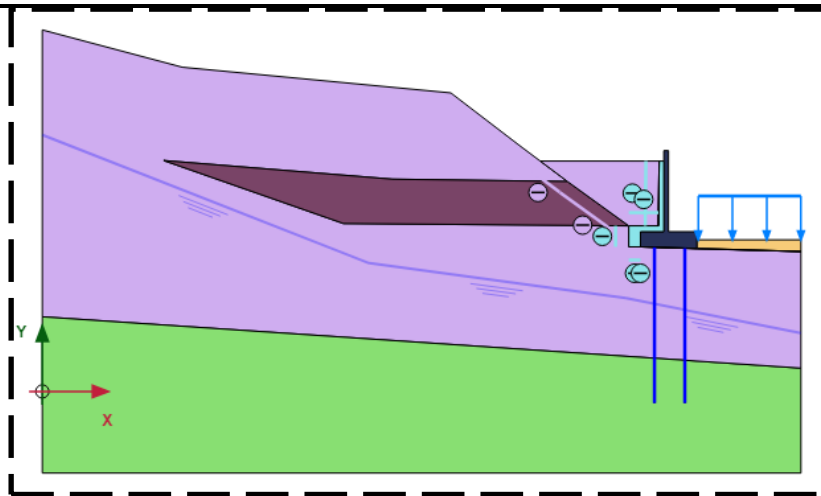


Figure III-6 La géométrie du modèle de référence.

### 2.5.2 Etape de modélisation

Après une modélisation géométrique est placement de différentes couches des sols Comme une première étape:

- **Talus:**
  - Création du profil topographique (hauteur, pente, couches géologiques).
  - Discrétisation en éléments finis.
- **Pieux:**
  - Positionnement selon l'étude géotechnique (profondeur, diamètre, espacement).

Tableau III-2 Les caractéristiques des pieux.

PIEUX	W (kg/m*m)	EI (kN/m)	EA (kN/m)	$\nu$	D(m)
15 m	19.63	$3000 * 10^6$	$8.438 * 10^9$	0.6	1

- **Mur de soutènement :**

- *Tableau III-3 Les caractéristique du mur de soutènement.*

Modèle	Drainage	$\gamma_b kN/m^3$	E(MPa)	$\nu$
Elastique linéaire	non poreux	23 kN/m <sup>3</sup>	30000	0.15

- Définition des dimensions (hauteur, épaisseur, ancrage).
- Attribution des propriétés mécaniques (béton armé, acier).

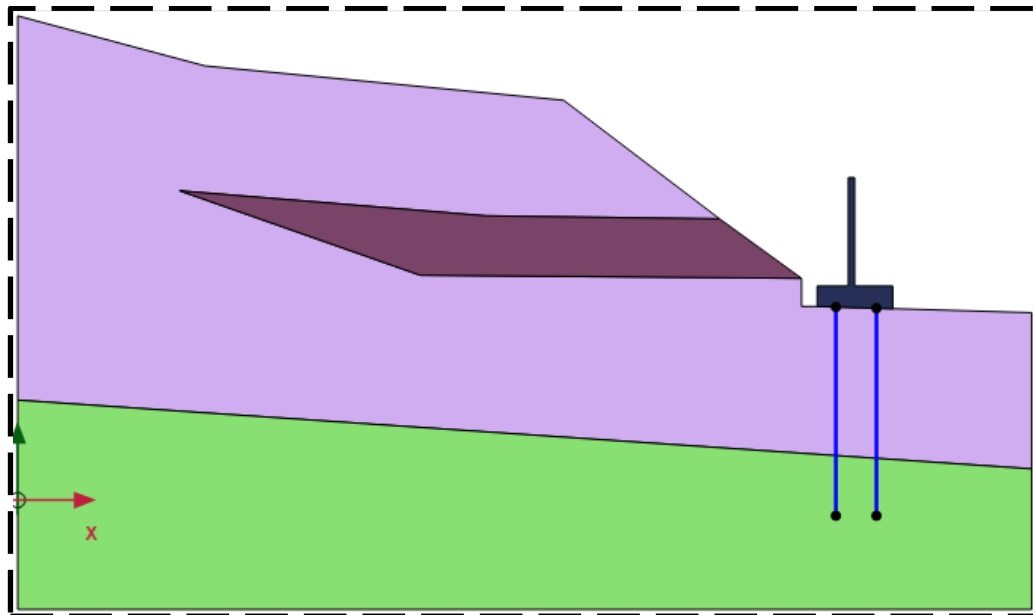


Figure III-7 La 1ère étape de modélisation.

### • Drain et remblais de route

Le drain vertical proposé c'est d'utiliser un matériau drainant de type gravier, sélectionné pour sa perméabilité élevée et sa disponibilité locale.

Pour simplifier l'analyse tout en conservant une représentation réaliste, la route qui existe au bas de talus est modélisée comme une couche unique de remblai aux propriétés homogénéisées, on prendre la charge de roulement due à la route  $Q = 10kN/m^3$

Pour minimiser l'effet de pente en terrasse une partie de sol et on se positionne derrière le mur.

Tableau III-4 Les caractéristiques du drain et de remblais de route.

Les couches	$\gamma_{nsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (MPa)	$\nu$	$C$ (KPa)	$\phi$	$\psi$
Drain	19	20	20	0.5	0	35°	5°
Remblais	18	19	80	0.3	50	30°	0°

de route

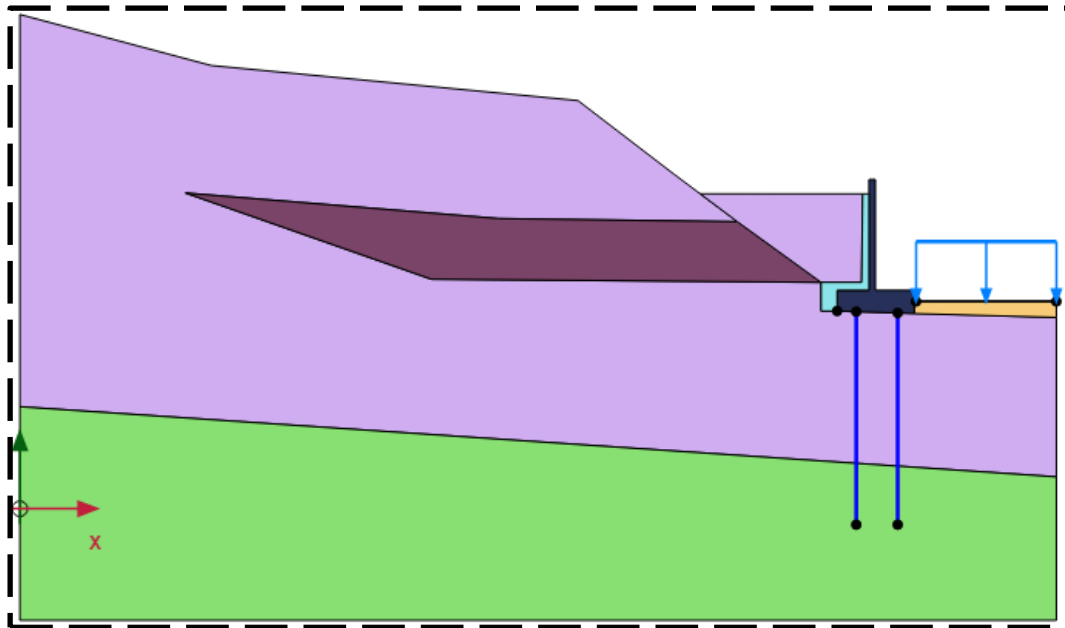


Figure III-8 La 2 étape de modélisation.

- Le maillage de modèle
  - Un maillage moyen a été employé, avec un raffinement spécifique sur les surfaces
  - la surface du talus, 0.5 et 0.1 sur les autres côtés,
  - , Le modèle numérique comprend 7 900 éléments et 71 077 nœuds, garantissant une résolution adéquate pour l'analyse de la stabilité du talus et des interactions sol-structure.

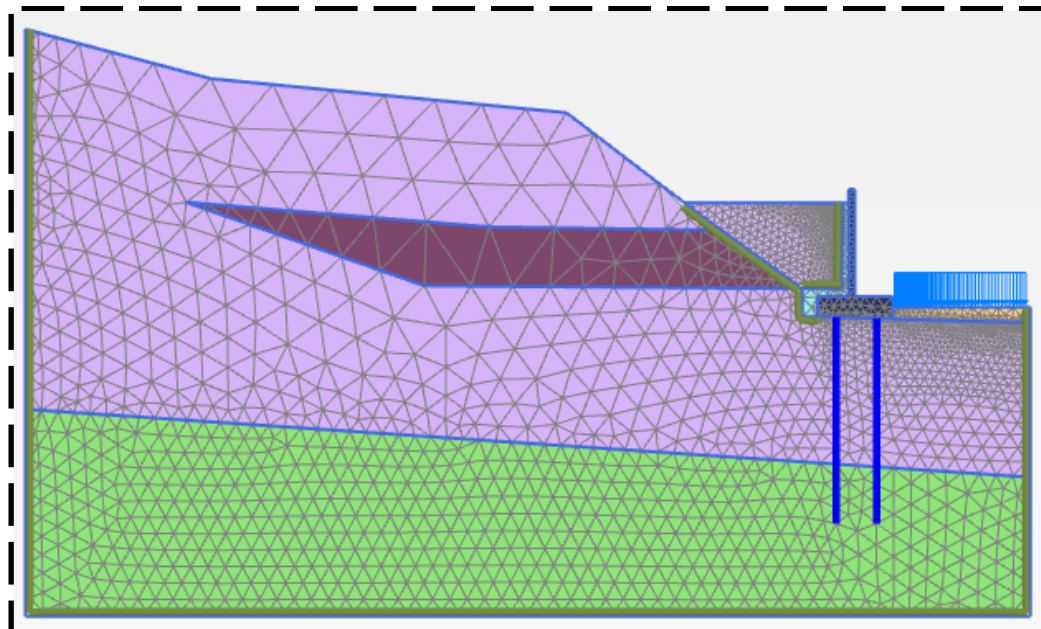


Figure III-9 Le maillage du modèle.

- Les conditions d'écoulement:

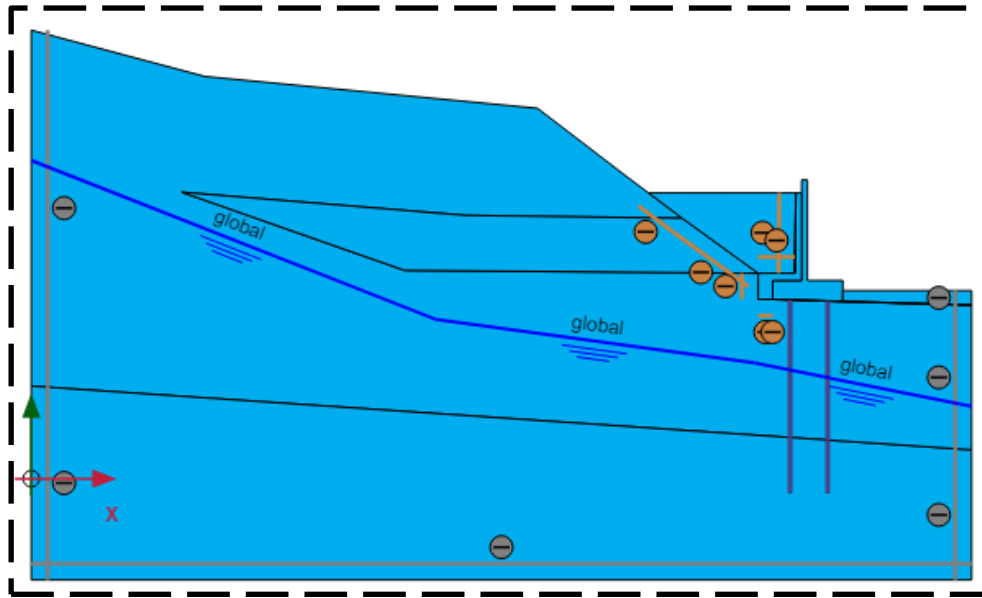


Figure III-10 Les condition d'écoulement.

Dans la modélisation numérique, les **interfaces** jouent un rôle clé pour représenter les interactions entre différentes couches géotechniques. Elles permettent de modéliser les discontinuités dans les propriétés mécaniques du sol et de prendre en compte les effets des variations de matériaux sur la stabilité des pentes.

- Les phases de calcules

Les calculs de stabilité s'organisent souvent en plusieurs phases afin de simuler de manière progressive le comportement du sol sous différentes sollicitations.

- **Phase initiale;** la base de calcule
- **Phase plastique** tous qui concerne les déformations les déplacements et les contrainte;
- **Phase de sécurité** pour le calcul de Fs.

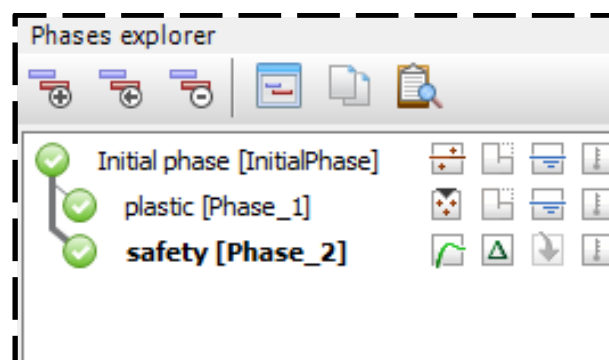


Figure III-11 Les phases de calcules.

- Le calcul

Le calcul est au cœur de l'analyse géotechnique, permettant de valider les hypothèses et d'assurer la fiabilité des résultats.

C'est dans cette étape que les choix méthodologiques deviennent cruciaux : l'intégration des interfaces, le choix des paramètres de sol, la prise en compte des conditions hydrologiques et le calibrage des efforts appliqués. L'interprétation des résultats permet ensuite d'ajuster les stratégies de stabilisation et d'optimiser les solutions.

## Hypothèse de calcul de précipitation

Cette méthode vise à simuler l'effet de pluies constantes, exprimées en mm/h, sur un système donné (hydrologique, agricole, urbain, etc.) afin d'analyser les résultats de manière contrôlée. Cette approche hypothétique est une étape clé pour comprendre les processus hydrologiques.

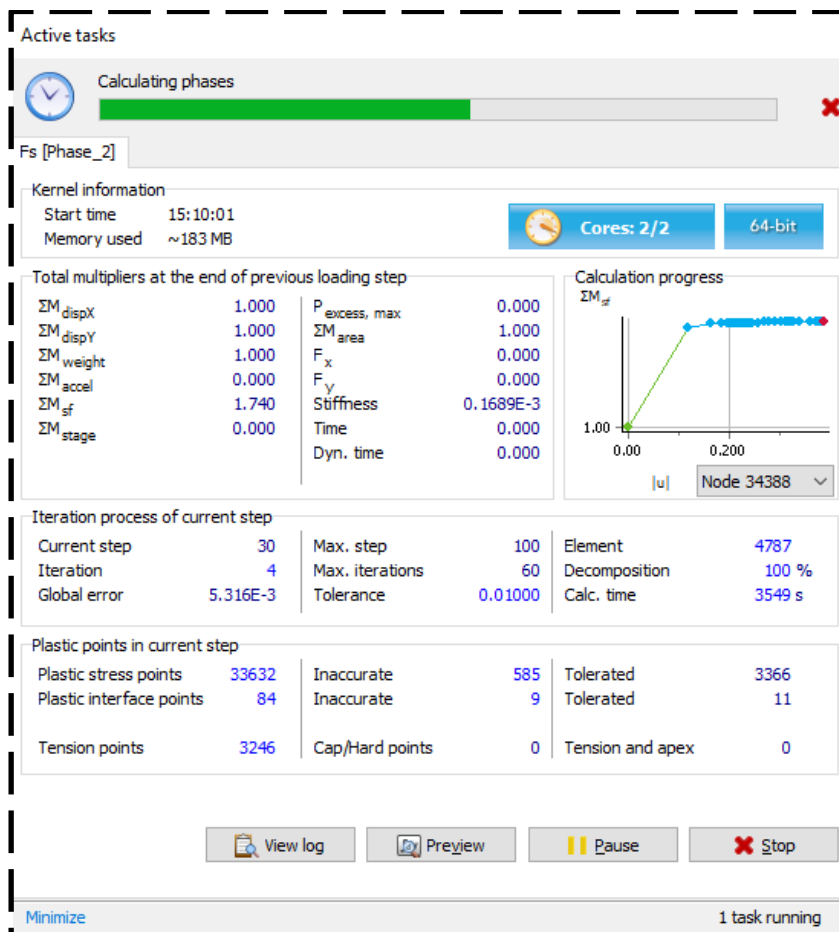


Figure III-12 le calcul dans plaxis 2D.

### **3. Conclusion**

Ce chapitre a porté sur l'un des cas de glissement de terrain survenu lors de la construction de la route pénétrante reliant le port de Ghazaouet à Marsa Ben M'Hidi, et a mis en évidence les interactions entre les facteurs naturels et anthropiques. Cette recherche a été menée selon une approche multidisciplinaire permettant l'intégration d'études géologiques, hydrologiques et géotechniques complémentaires, afin de rétablir les conditions de déclenchement des mécanismes d'instabilité. Une simulation numérique réalisée sur Plaxis 2D a permis de démontrer l'efficacité d'un renforcement composé d'un mur de soutènement ancré, d'un pieu stabilisateur et d'un drain en gravier, capable d'assurer un coefficient de sécurité (FS) conforme aux exigences standard ( $FS \geq 1,5$ ).

## **Références**

- LTPO. (2021). *Etude de sol : Stabilité au niveaux d'un talus faisant partie de rocade cotière lot N°1 du PK1+000 au PK1+150 a Gazaouet*. Tlemcen: Laboratoire de Traveaux Publics Ouest .
- Medjahdi.M, (2025, 02 24). Photo . Ghazaouet , Tlemcen Algérie.
- Société d'étude technique de sétif. (2022). *Projet : suivi technique des travaux d'achèvement du Lot n°01 réalisation de l'évitement de Ghazaouet sur 16km: Glissement du terrain apparu au PK 01+000*.

# IV. DEPOUILLEMENT ET INTERPRETATION DES RESULTATS

## 1. Introduction

La phase de dépouillement et d'interprétation des résultats constitue l'étape clé permettant de transformer des données brutes en connaissances exploitables pour l'analyse de stabilité des talus. Dans le cadre de ce projet, centré sur la rocade côtière de Ghazaouet, cette démarche vise à décrypter les interactions complexes entre les paramètres géotechniques, hydrologiques et climatiques (précipitation) influençant le comportement du massif. Les données recueillies sur le terrain (caractérisation des sols, des déformations, mesures piézométriques) sont confrontées aux résultats des modélisations numériques (PLAXIS 2D) pour identifier les mécanismes de rupture dominants et valider les hypothèses initiales.

## 2. Les résultats de 1 ère modèle

L'analyse du premier modèle de drainage avec une solution de **drain de grande dimension** met en évidence l'impact de l'augmentation de la capacité d'évacuation sur la gestion des flux hydriques.

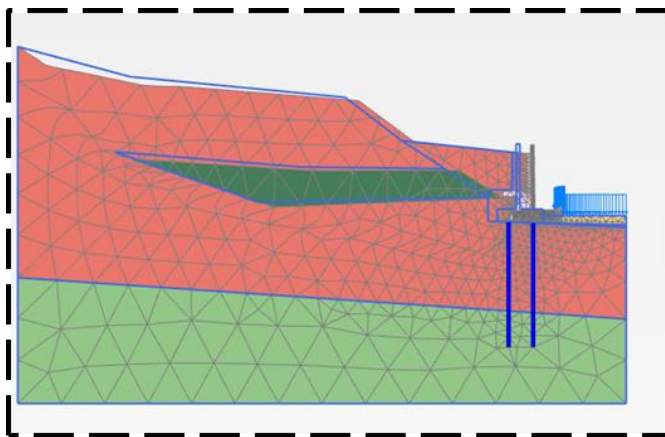


Figure IV-1 Les déformations verticales

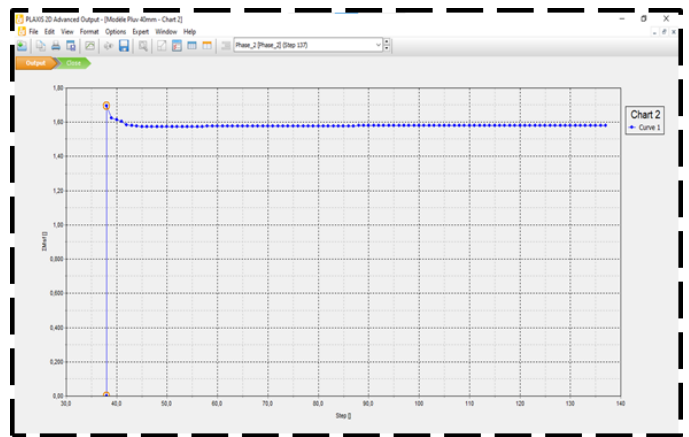


Figure IV-2 Le facteur de sécurité.

La représentation de la déformation du maillage indique les variations de pression de déformation à travers le talus. Les zones en bleu semblent les moins sollicitées, tandis que les jaunes pourraient correspondre aux zones de concentration des contraintes.

Le **cercle de rupture** visible dans la figure représente la **surface de glissement critique**, qui correspond à la zone où la stabilité du talus est la plus faible et où un effondrement pourrait potentiellement se produire.

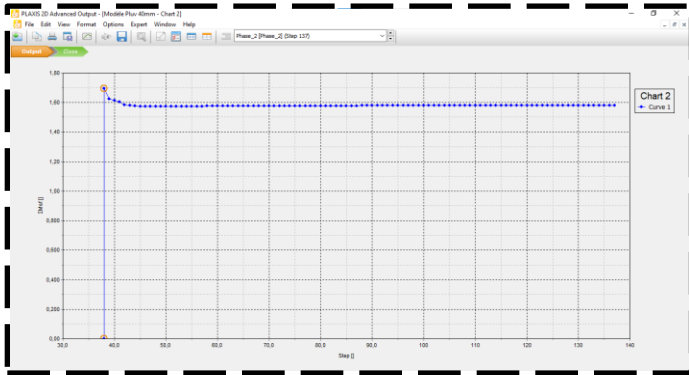


Figure IV-3 le facteur de sécurité

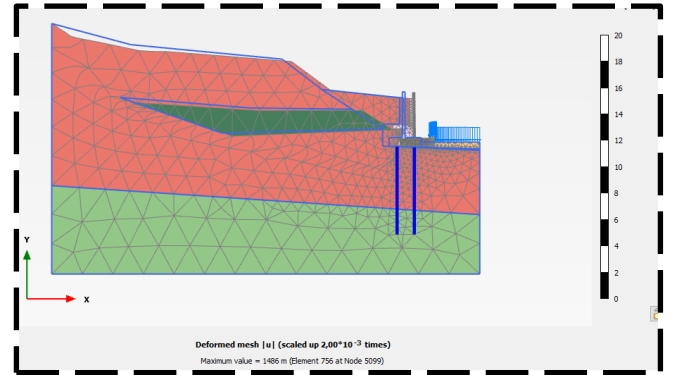


Figure IV-4 La déformations.de maillage.

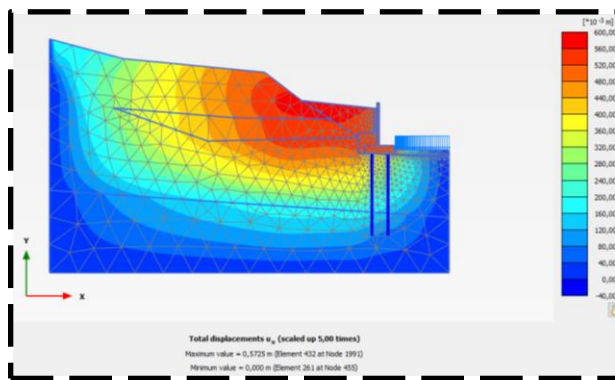


Figure IV-5 Les déplacement Horizontales.

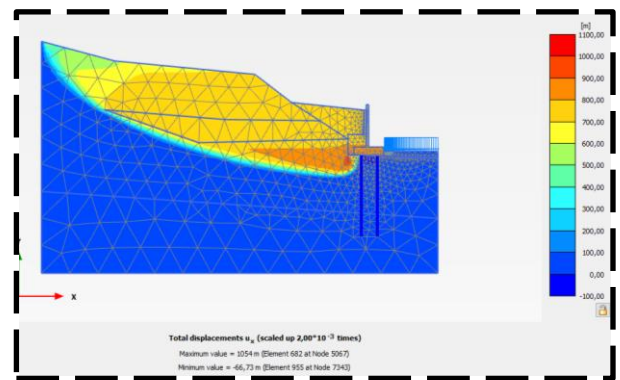


Figure IV-6 Les déplacement Verticales.

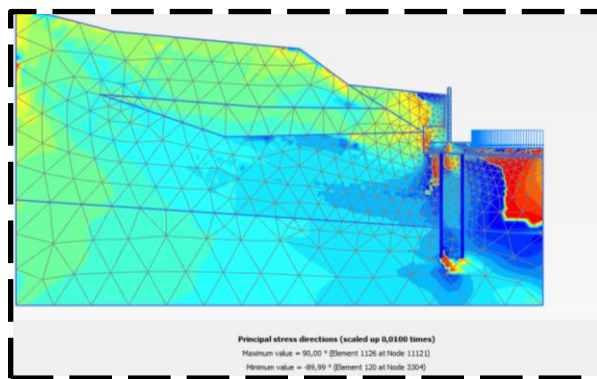


Figure IV-7 La directions des contraintes principales.

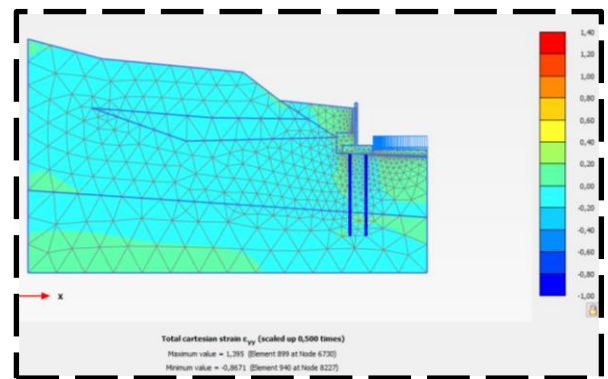


Figure IV-8 Les déformations Verticales.

Les résultats du premier modèle avec la 1 ère solution du drain montrent une réponse mécanique stable en conditions normales. Cependant, la variation de pluviométrie provoque des déplacements et des contraintes identiques et très grandes. Cette réponse uniforme, non proportionnelle aux sollicitations hydriques, révèle une instabilité fondamentale du modèle.

### 3. Les résultats de modèle de références (sans précipitation)

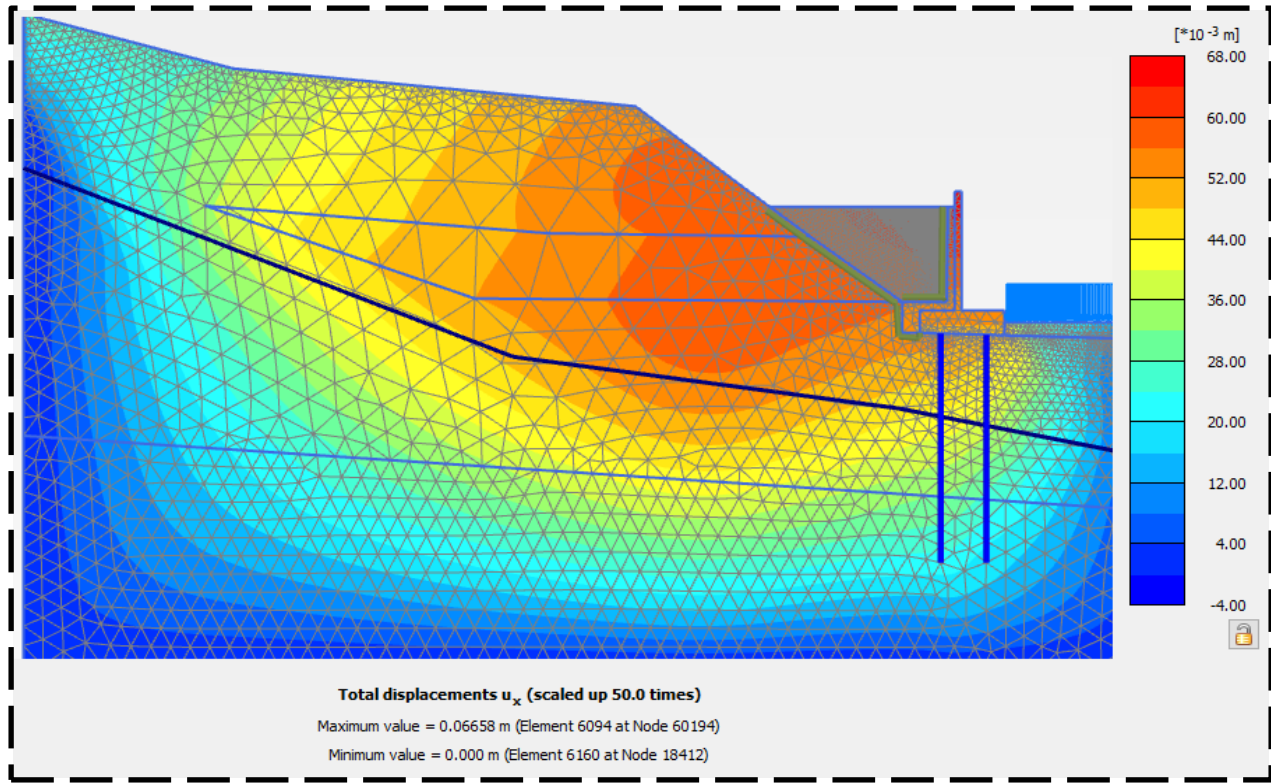
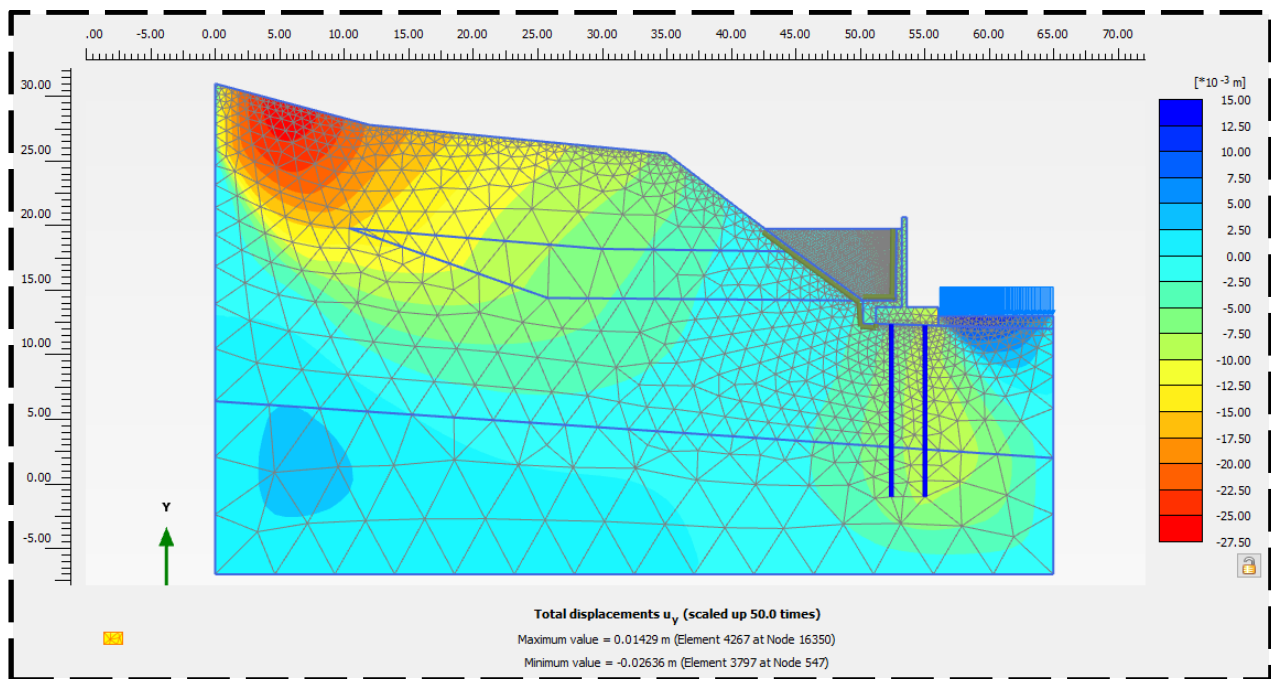


Figure IV-9 Les déplacement horizontales sans précipitation

Une fois les calculs effectués, La figure présente des déplacements horizontaux dans la phase plastique de **6.65 cm**.



Des déplacements verticaux obtenus par le modèle de référence sont Comme illustré à la figure IV-10 présentent un déplacement d'environ **1,429 cm**.

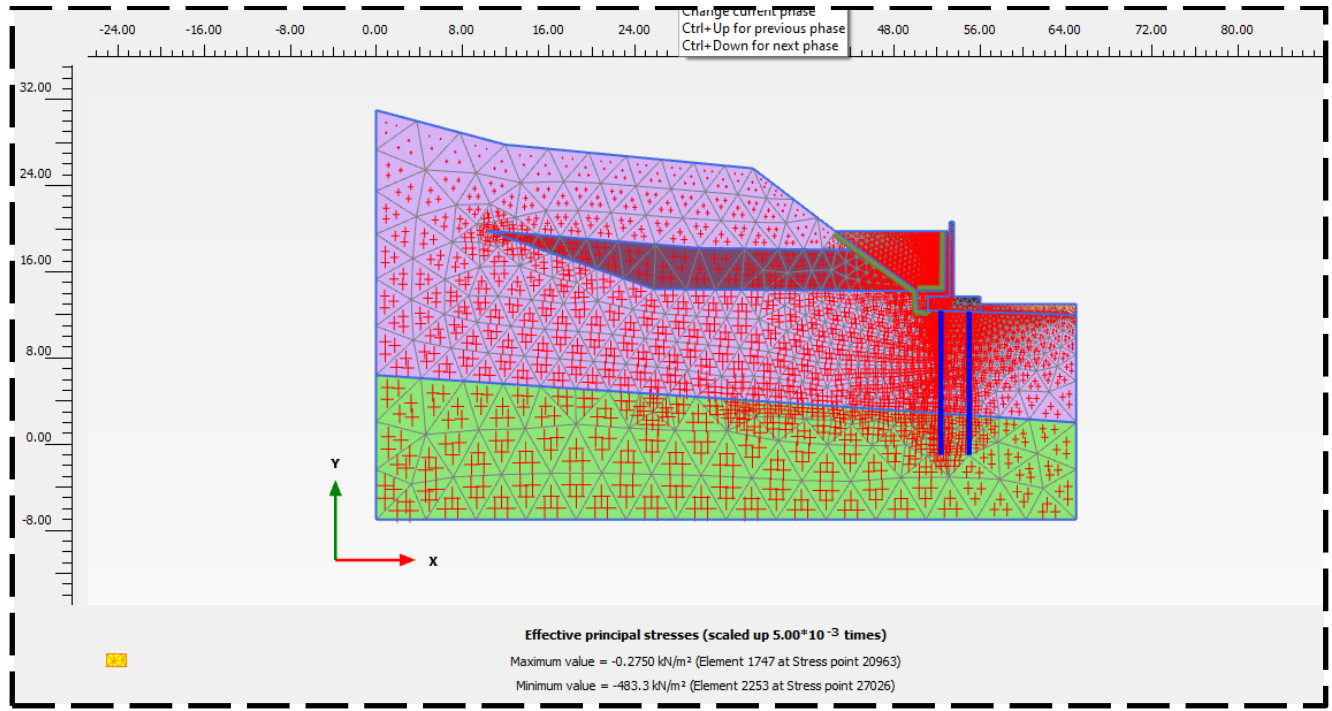


Figure IV-11 Les contrainte effective principale.

Cette représentation illustre comment les contraintes principales évoluent dans le talus stabilisé, en tenant compte de l'effet de soutènement et du drainage. Le drainage influence la pression interstitielle et contribue à réduire la composante de contrainte totale, améliorant ainsi la stabilité globale du talus. Une diminution de la pression interstitielle entraîne une augmentation des contraintes effectives, ce qui renforce la résistance au cisaillement.

**La figure IV-11** permet d'identifier les points de faiblesse et d'optimiser les paramètres de conception pour garantir une stabilité à long terme.

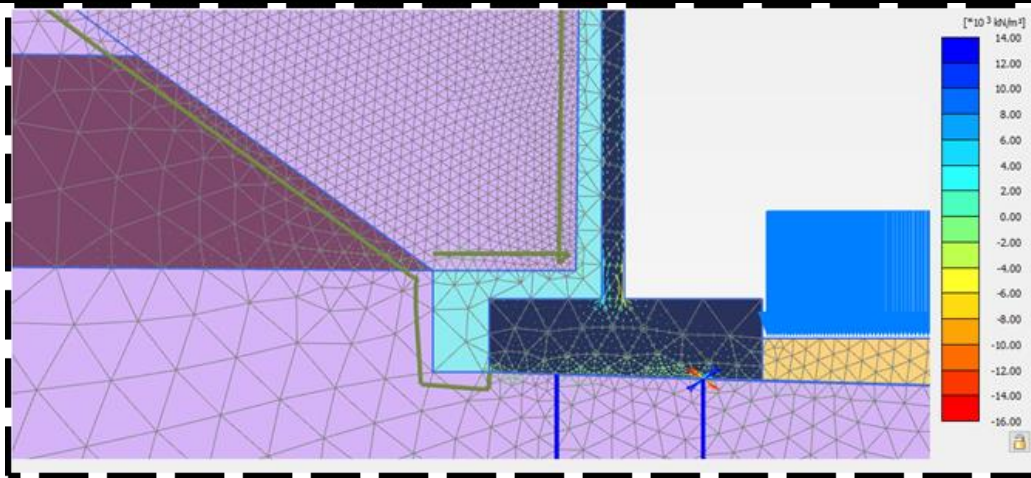


Figure IV-11 Les contraintes effective exercé sur le mur.

Dans la zone concernée, située sous la chaussée et en aval du mur, les contraintes effectives sont remarquables.

La répartition des contraintes effectives exercées sur le mur de soutènement et les pieux, les zones de forte contrainte sont localisées principalement à la base et le long des zones d'interaction avec le sol

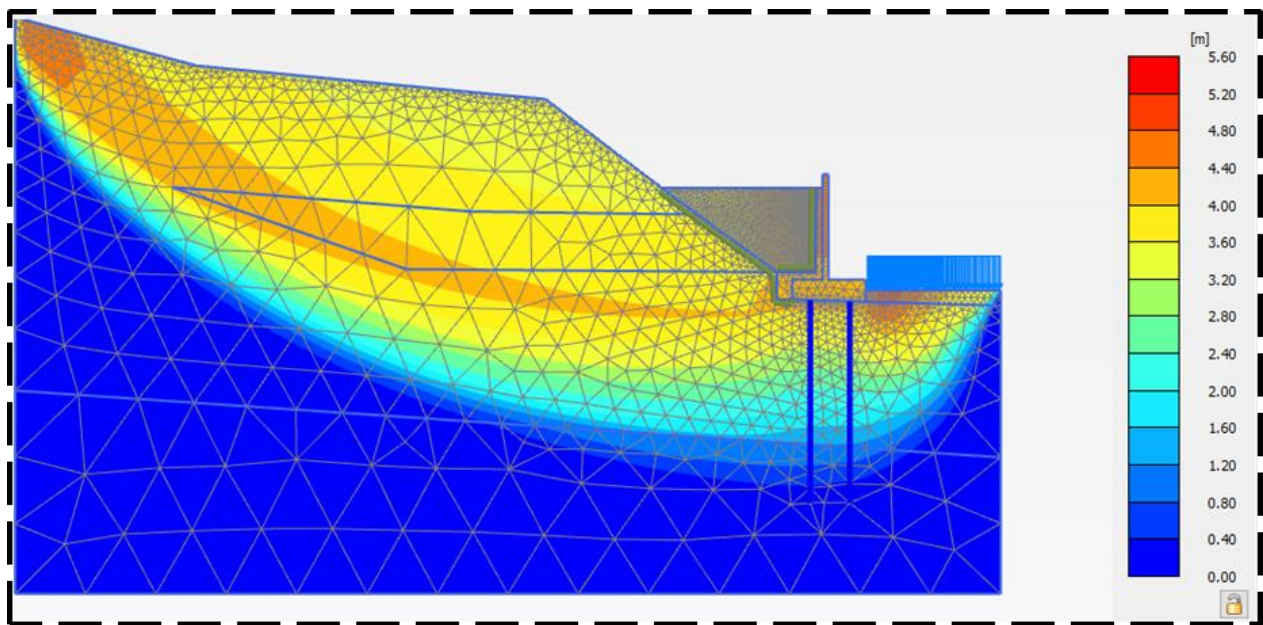


Figure IV-12 La forme de cercle de rupture.

La figure montre le cercle de rupture dans le modèle, ce qui indique une amélioration temporaire du facteur de sécurité du talus avant une possible redistribution des contraintes ou une influence hydrique.

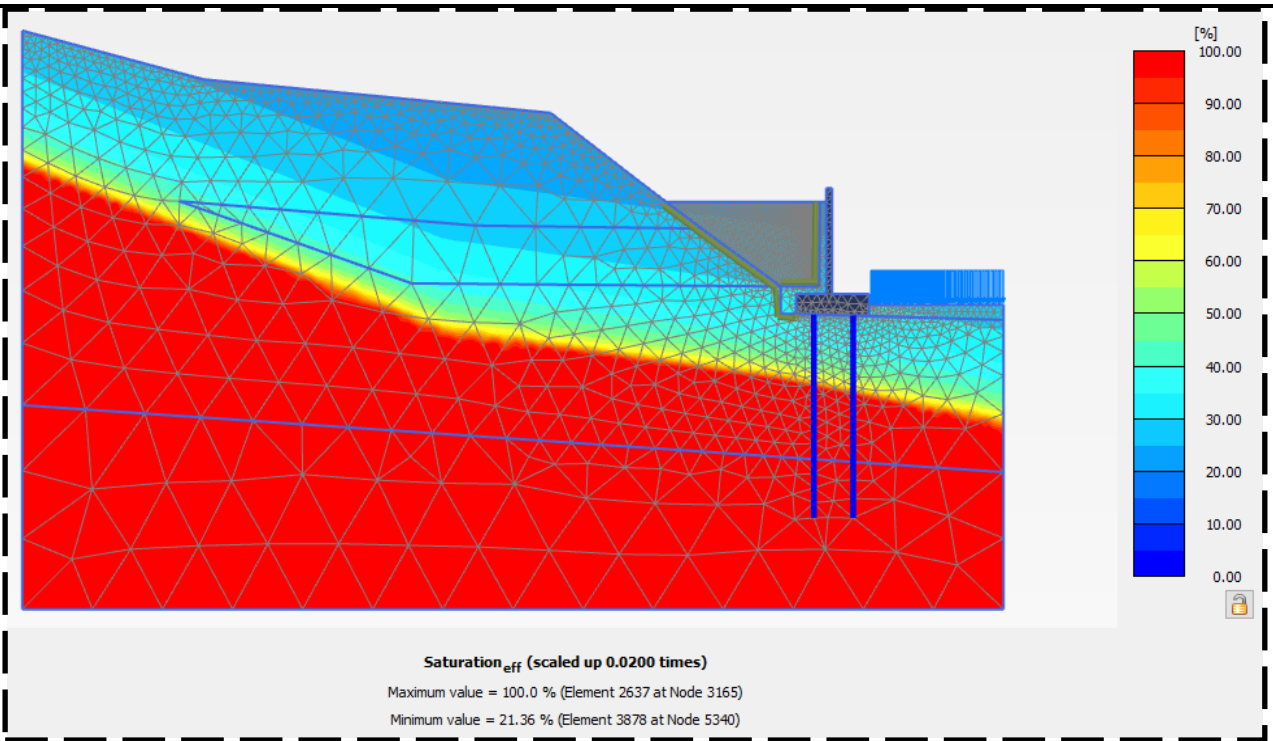


Figure IV-13 Le degré de saturation du sol.

La figure illustre le degré de saturation du sol sous celui de la nappe phréatique saturé de 100% le haut humide de 21.36%

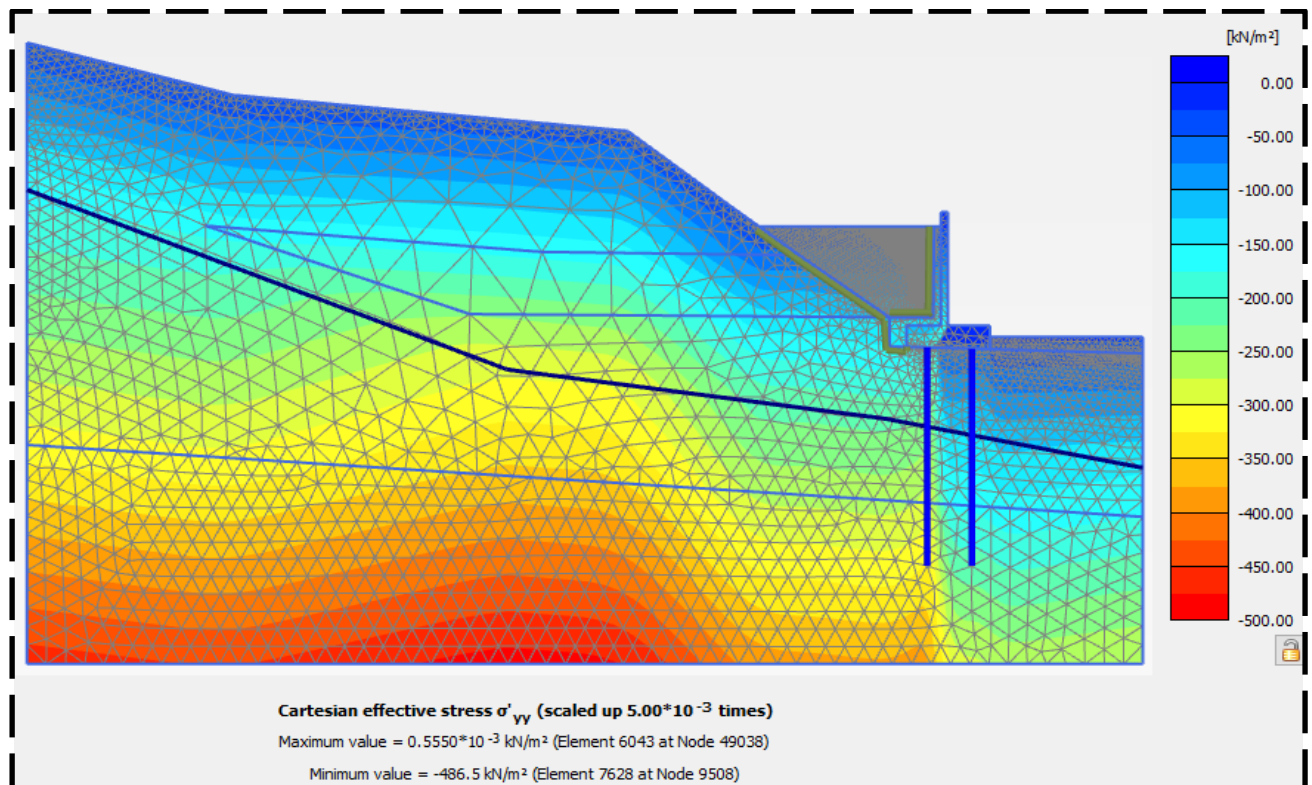


Figure IV-14 Les déformation verticales.

## Chapitre IV Dépouillement et interprétations des résultats

La figure IV-19 présente la variation de la contrainte effective suivant Y dans la phase initiale, avec des valeurs comprises entre 555 et 490 kN/m<sup>2</sup>.

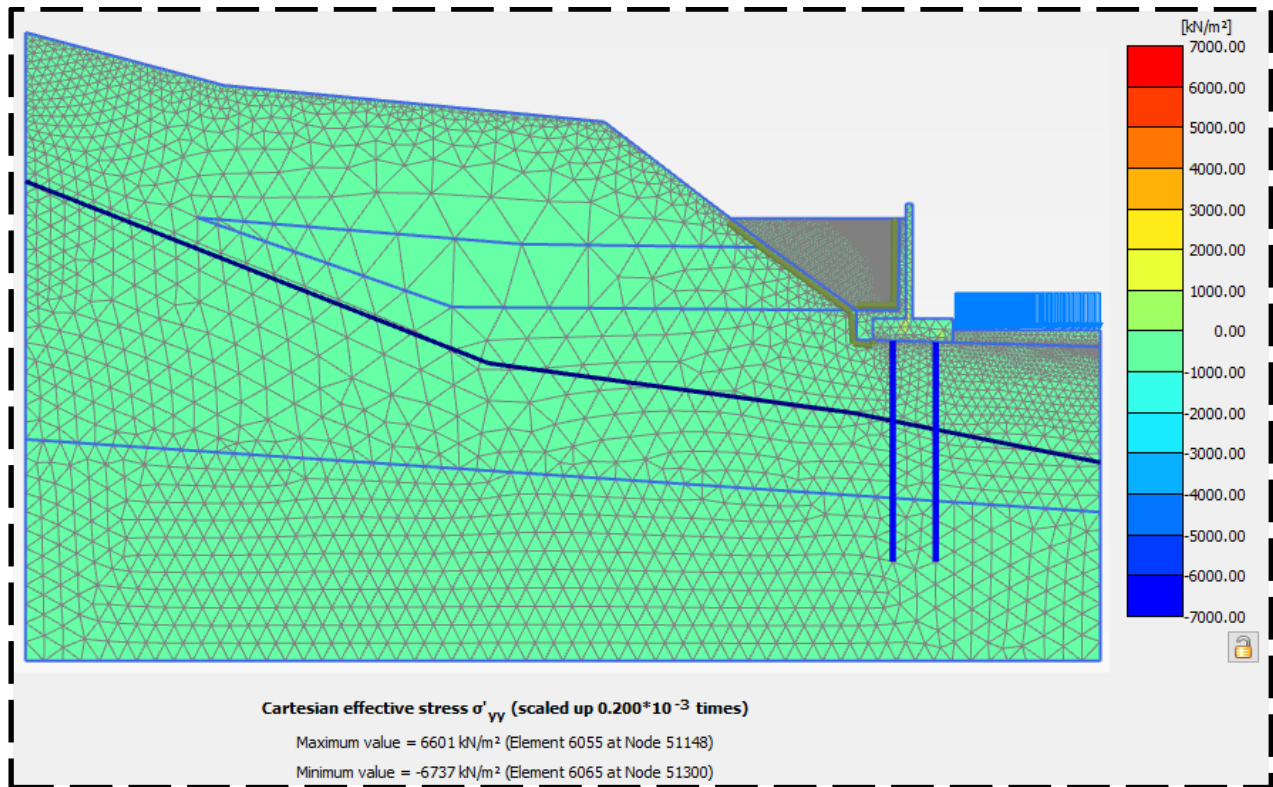


Figure IV-15 Les contrainte verticales.

La figure illustre la variation de la contrainte effective  $\sigma'_y$  dans la phase plastic, avec des valeurs entre 6601 et 6737 kN/m<sup>2</sup>.

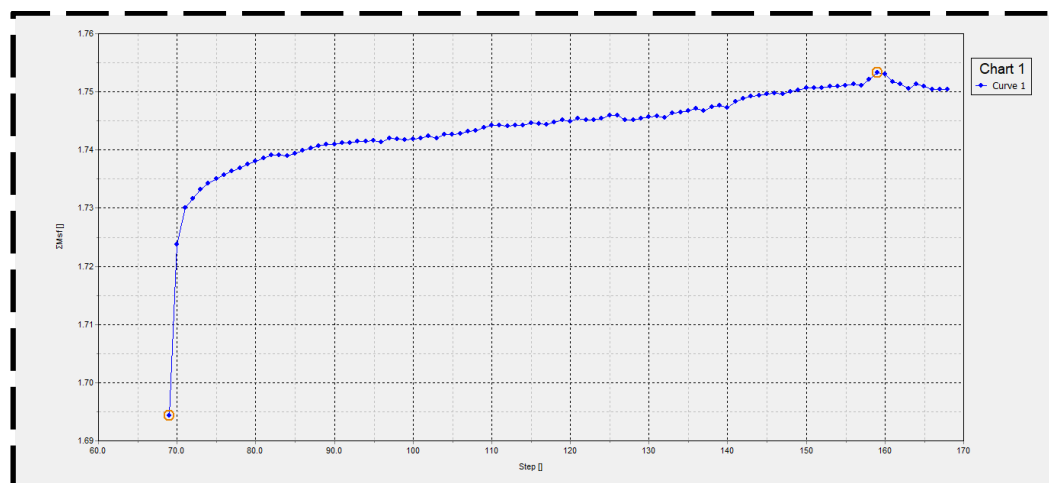


Figure IV-17 Le facteur de sécurité.

Le facteur de sécurité (Fs) représenté dans l'image montre son évolution en fonction des étapes de calcul, le Fs reste dans une plage acceptable (**1.754**), son évolution nécessite une

analyse approfondie des interactions entre drainage, soutènement et sollicitations mécaniques pour garantir une stabilité durable.

- **10 mm**

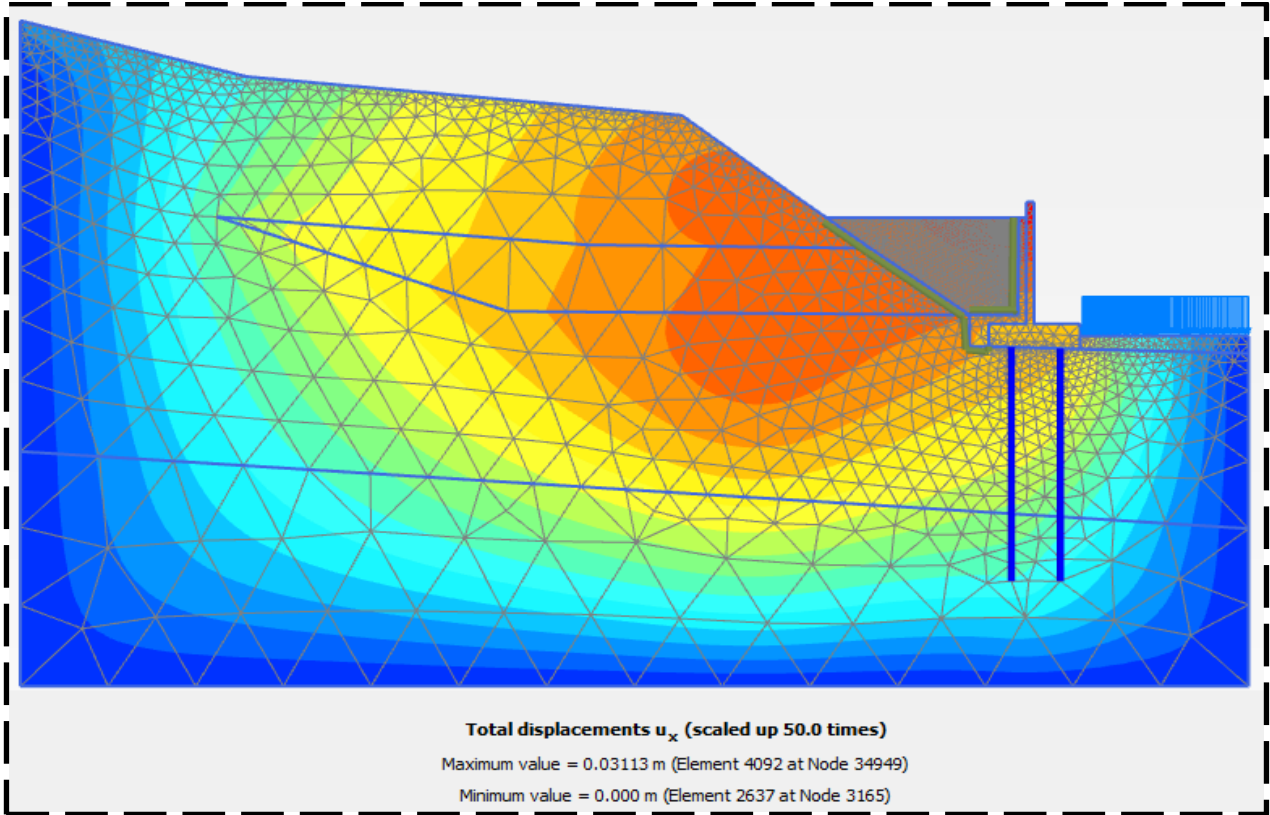


Figure IV-16 Les déplacements verticales de 10mm.

Avec 10 mm de précipitation, les déplacements horizontaux observés dans la phase plastique, atteignent 3.113 cm. Cette faible amplitude de déplacement suggère que, malgré l'effet des précipitations, la structure conserve une bonne stabilité.

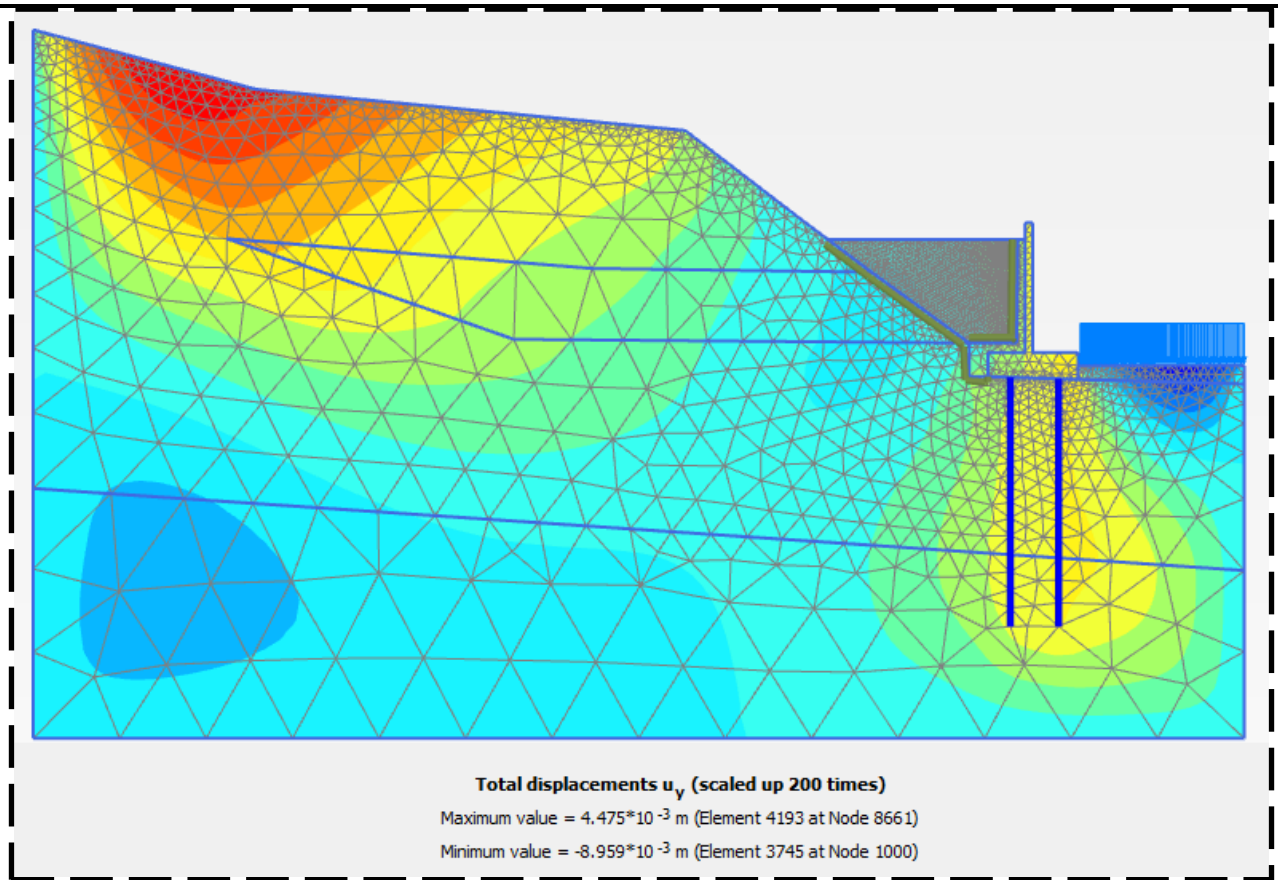


Figure IV-17 Les déplacements verticales de 10mm.

La figure IV-19 montre l'évolution des déplacements verticaux au cours des étapes de calculs dans la phase plastique, atteignent 0.5cm.

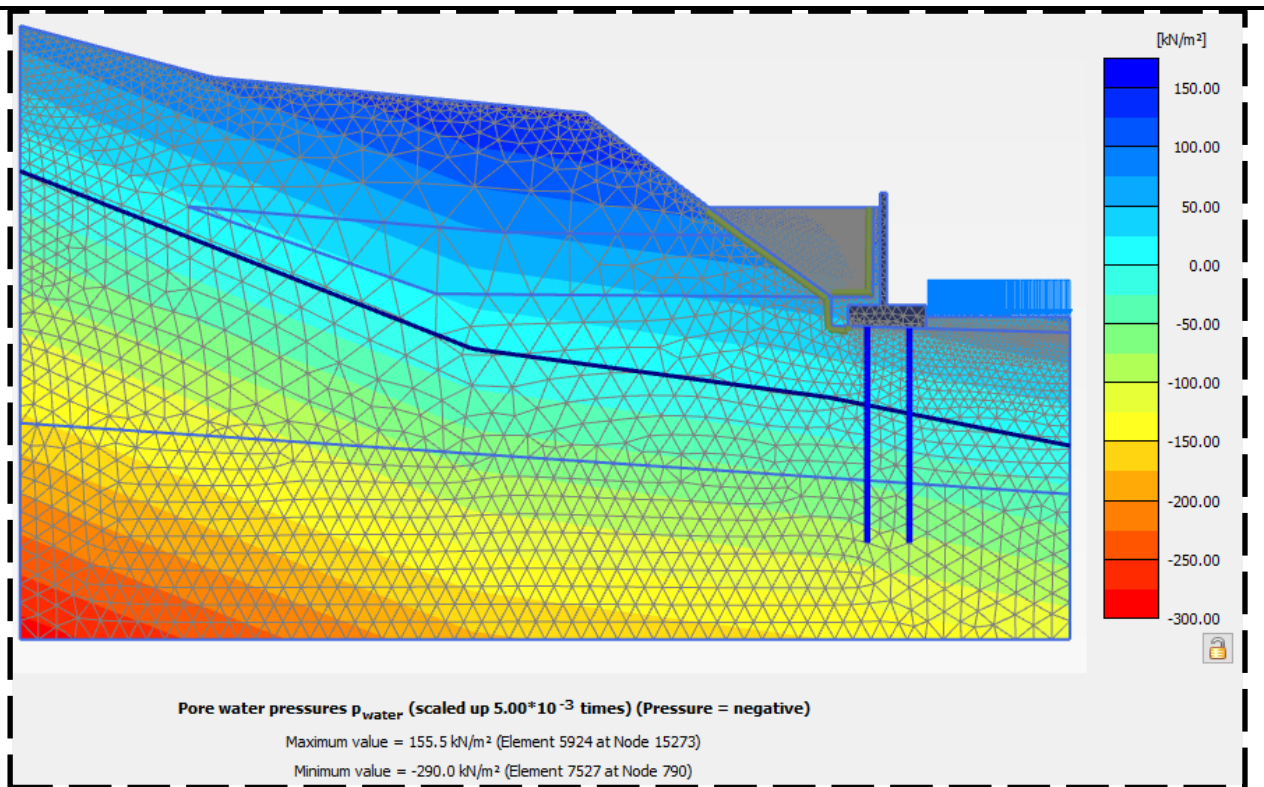


Figure IV-18 La pression interstitielle de 10mm.

La figure présente analyse la pression interstitielle, la nuance de couleurs indique des valeurs variant de 300 à 160 kN/m<sup>2</sup>, mettant en évidence les zones de pression négative et positive. Les zones rouge à orange des zones de pression élevée, Les zones bleu foncé à vert des zones de pression négative sont situées dans les régions périphériques.

Une augmentation de la pression interstitielle due à l'infiltration d'eau ou à des précipitations excessives réduit la résistance effective du sol.

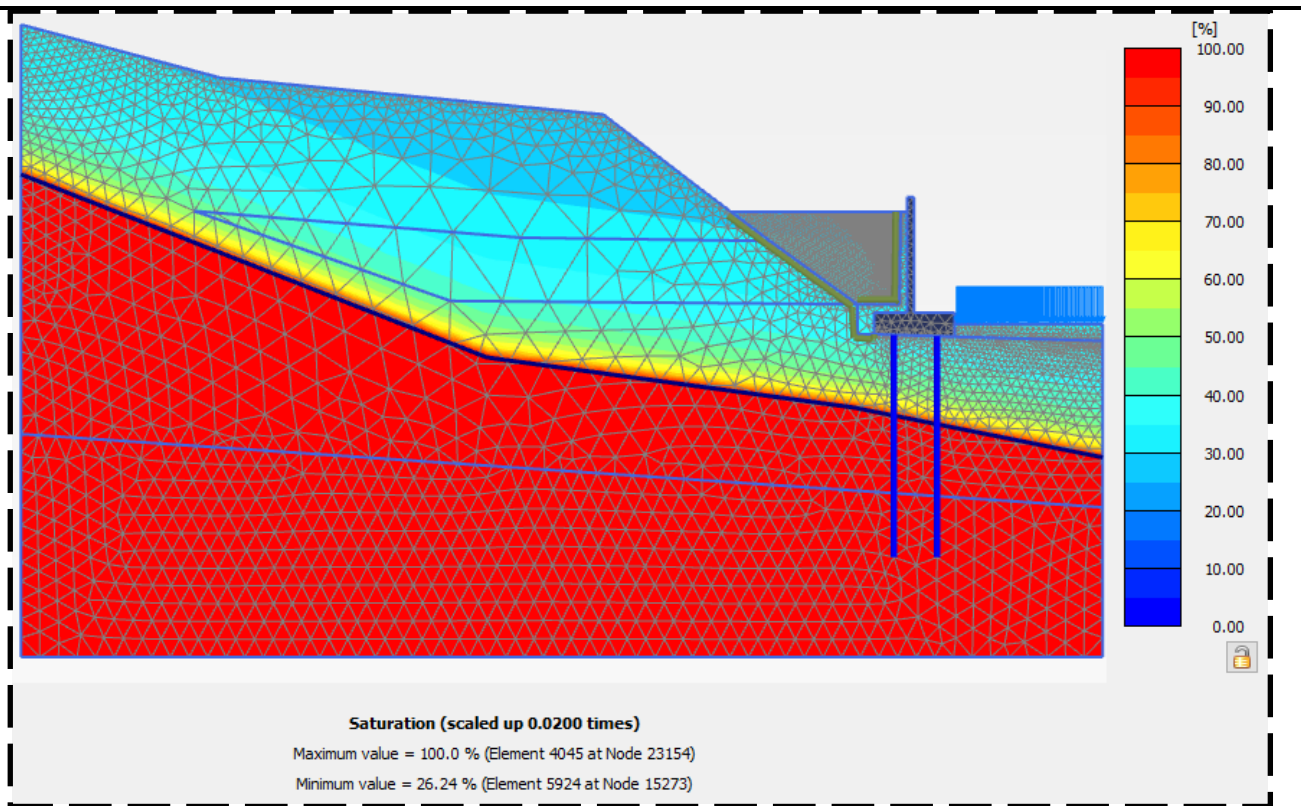


Figure IV-19 Le degré de saturation dans 10mm.

La figure illustre le degré de saturation avec une variation allant de 100% sous la nappe phréatique à 26.24% en dessous de celle-ci. Qui est légèrement supérieur par rapport à la situation sans précipitation.

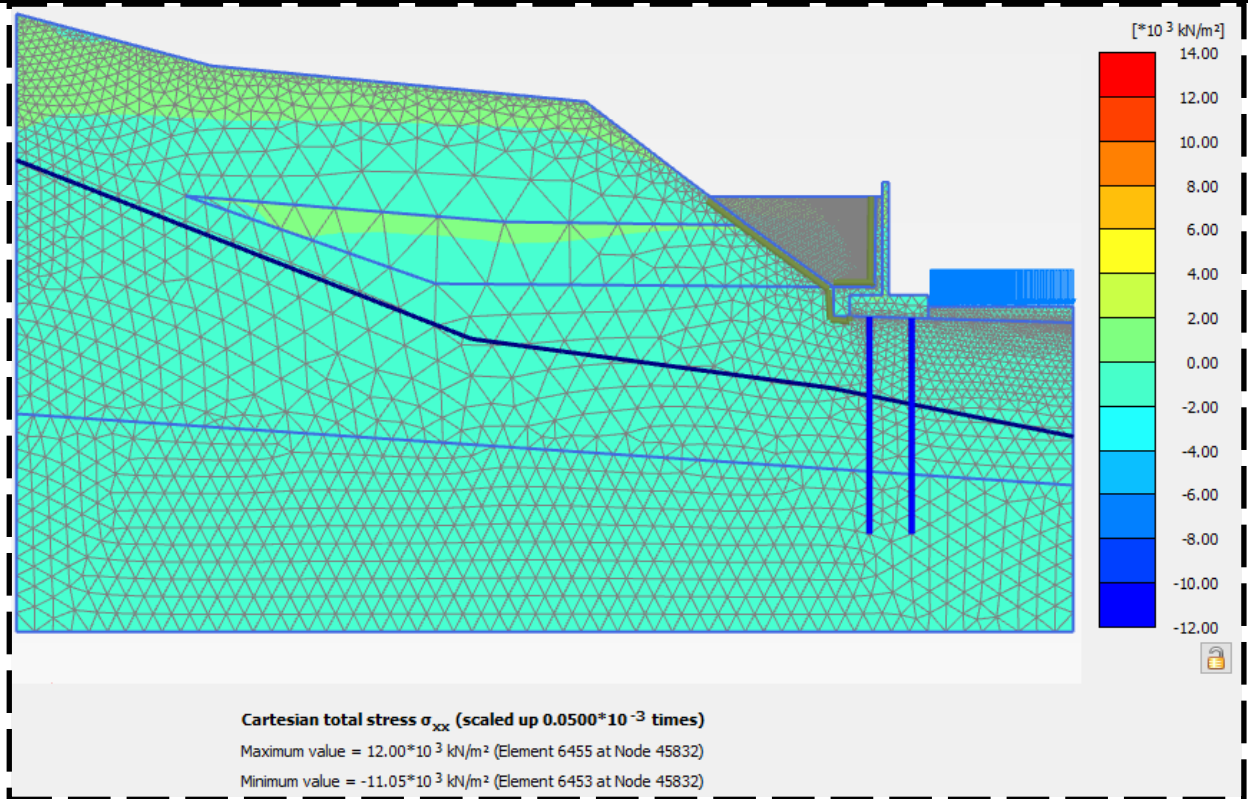


Figure IV-20 Les contraintes effectives horizontaux 10mm.

Les contrainte effective dans la phase plastique selon x varient entre  $\sigma'_x = 11 \cdot 10E-3$  et  $\sigma'_x = 12 \cdot 10E-3 \text{ kN/m}^2$ .

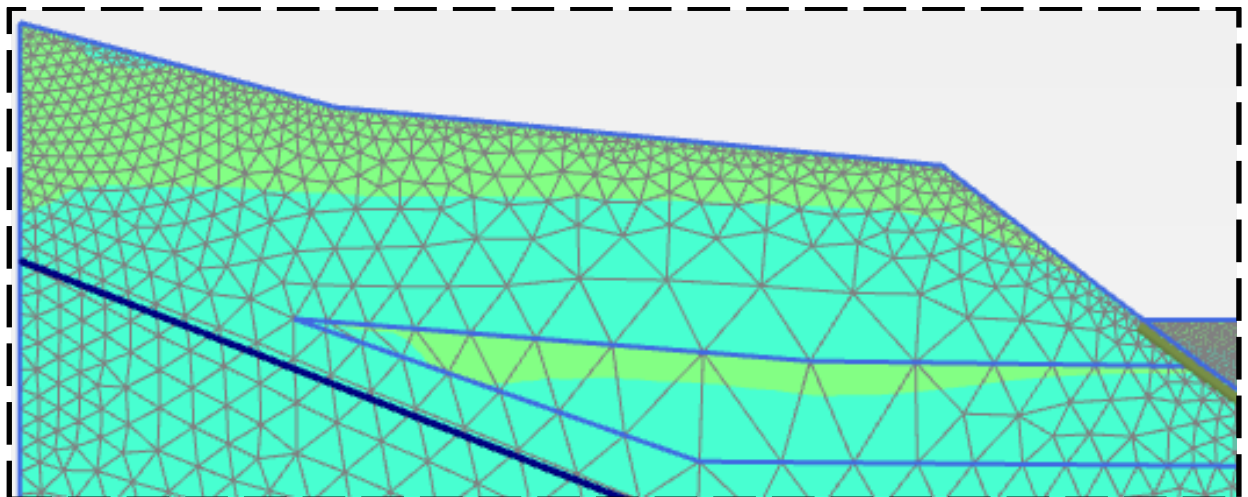


Figure IV-21 Les contraintes effectives horizontaux 10mm.

Les contraintes effectives peuvent évoluer de différentes manières par rapport à un scénario sans précipitation.

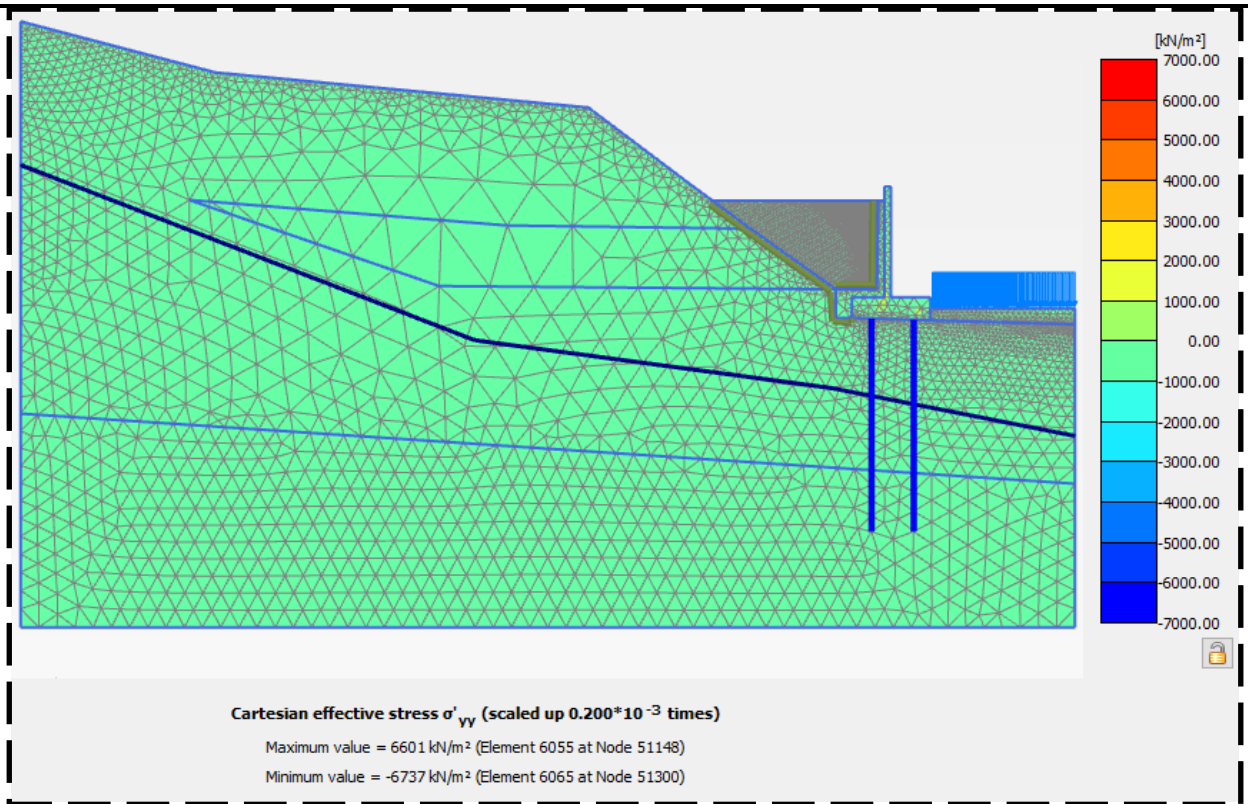


Figure IV-22 Les contraintes effectives verticaux 10mm.

Les contrainte effective dans la phase plastique selon y varient entre  $\sigma'_y=6600$  a  $\sigma'_y=6800$  kN/m<sup>2</sup>.

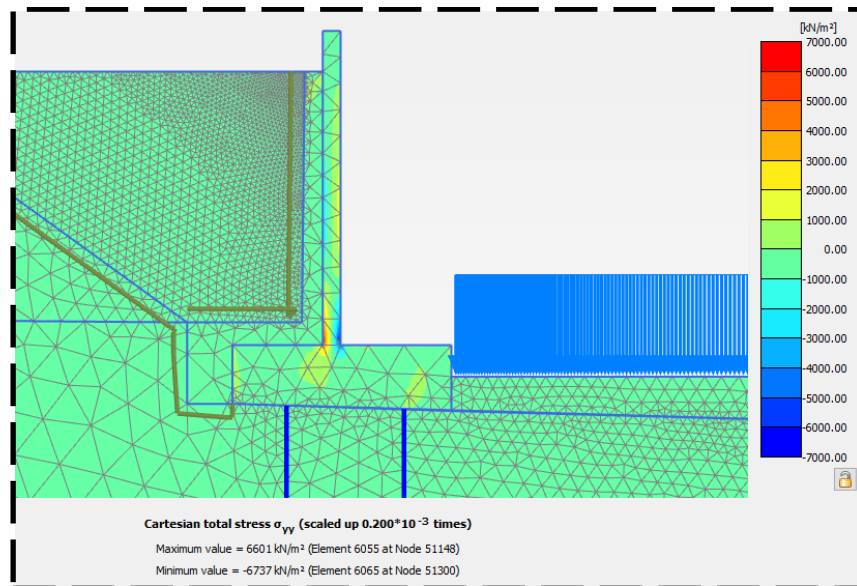


Figure IV-23 Les contraintes effectives verticaux 10mm.

Cependant, dans ce cas, les valeurs des contraintes effectives restent globalement similaires, mais les zones affectées sont nettement plus visibles, permettant une meilleure interprétation de

leur répartition.

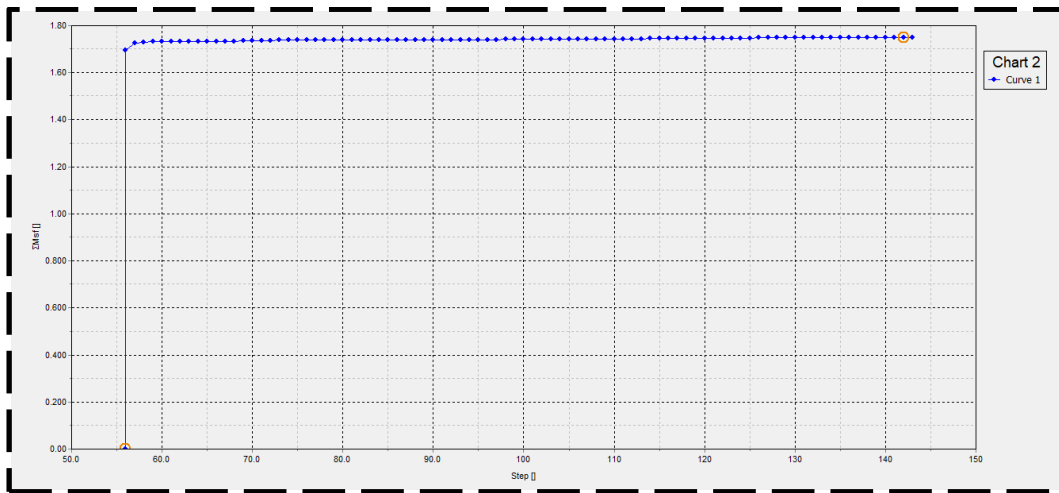


Figure IV-24 Le facteur de sécurité de 10mm

Le facteur de sécurité  $F_s$  reste acceptable avec une valeur de **(1.754)**, Une pluviométrie de 10mm peut entraîner une infiltration d'eau, modifiant la pression interstitielle et les contraintes effectives, la stabilité du talus reste favorable, comme le montre l'augmentation du  $F_s$ . Donc on peut dire que le drainage est efficace

- **40 mm**

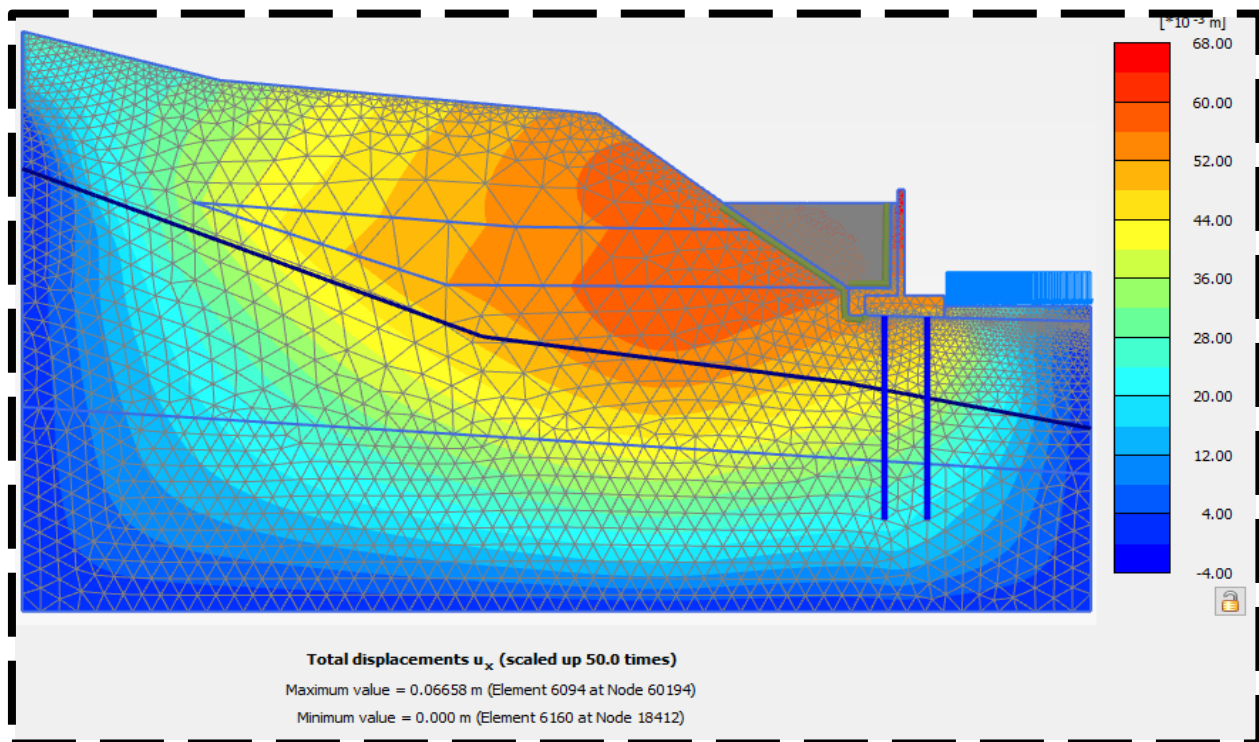


Figure IV-25 Les déplacements verticales de 40mm.

Avec **40 mm** de précipitation, des déplacements horizontaux avec une valeur de **6.65 cm** .

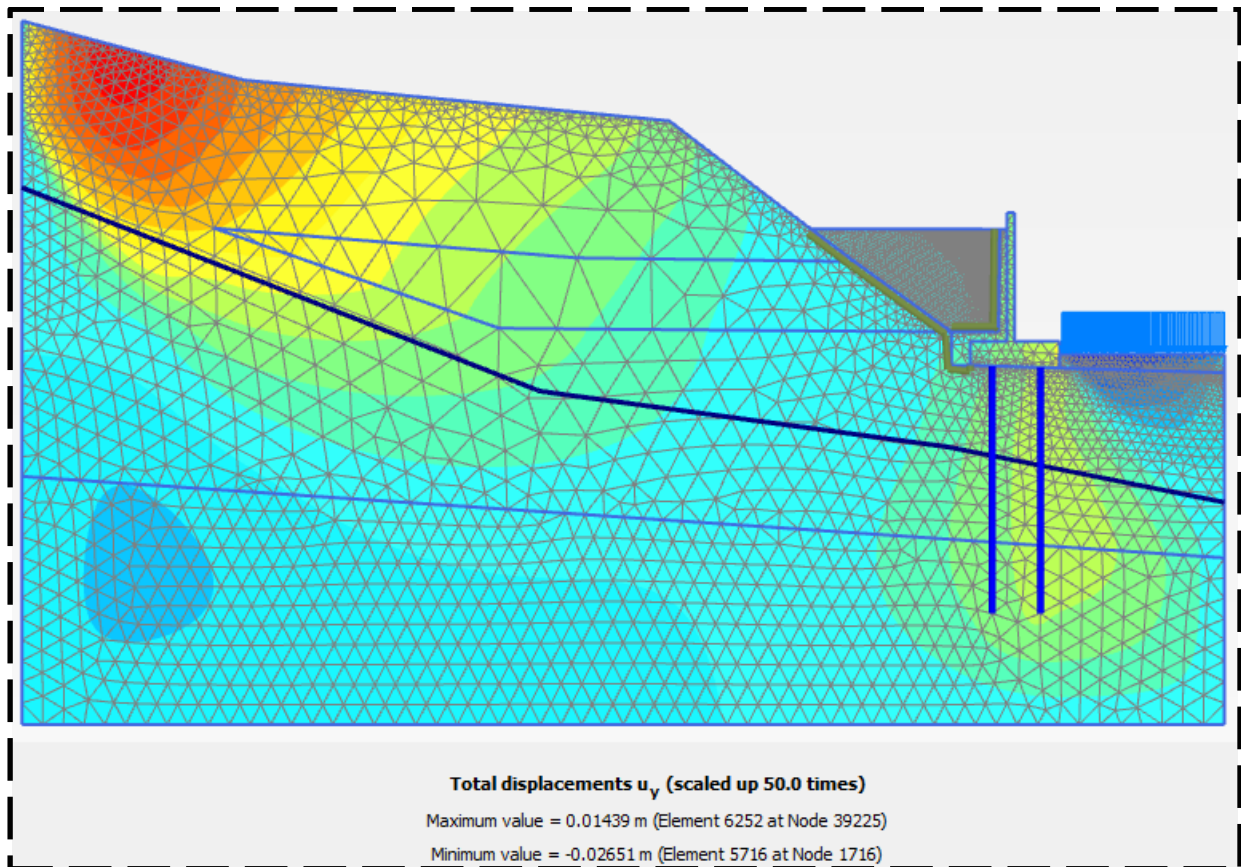


Figure IV-26 Les déplacements verticales de 40 mm

La figure IV-26 représente les déplacements verticaux au cours des étapes de calculs dans la phase plastique d'environ **1.44 cm**. Cette valeur indique une déformation relativement faible mais significative. Une pluie de 40 mm provoque une saturation temporaire du sol, réduisant la résistance mécanique et augmentant la consolidation. Et comme le sol est déjà chargé en eau, cette précipitation pourrait aggraver le tassement.

Les valeurs obtenues ne sont **pas identiques à celles du cas à 10 mm**, mais elles restent **proches de celles enregistrées sans précipitation, malgré une quantité d'eau importante** introduite dans le modèle.

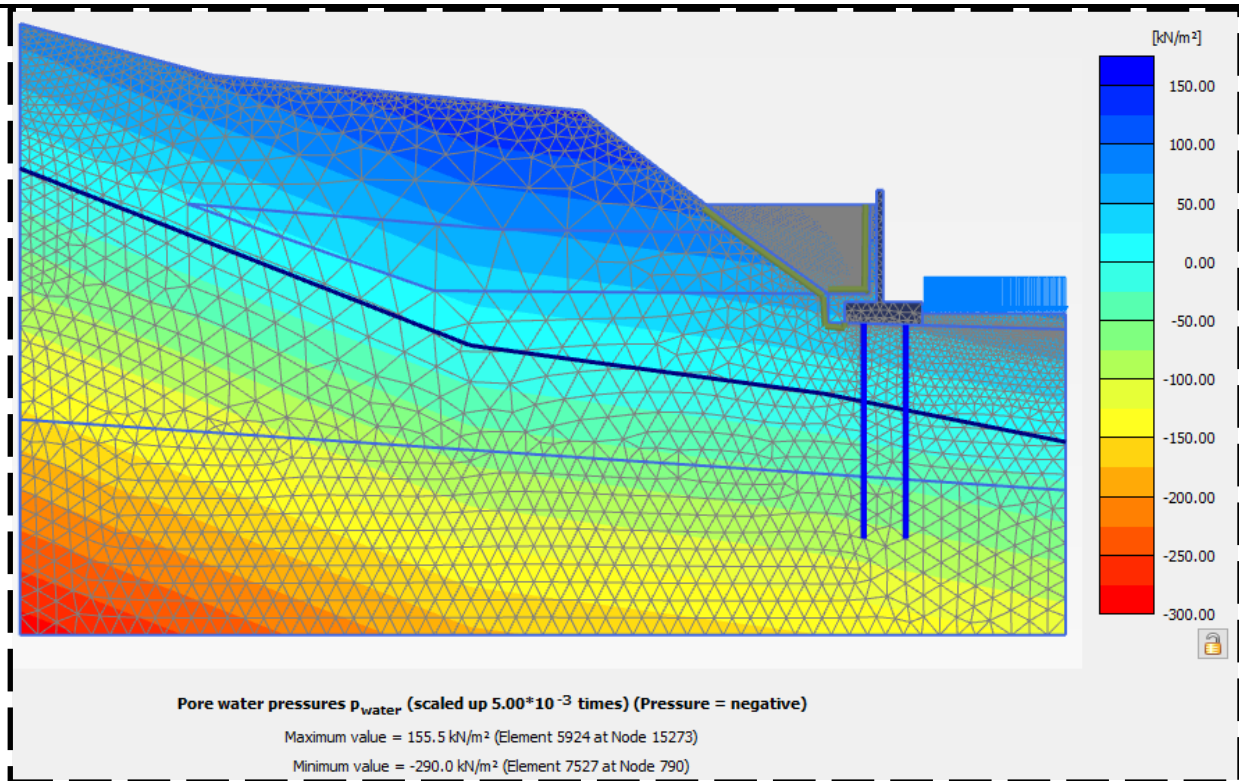


Figure IV-27 La pression interstitielle de 40mm.

La figure présente analyse la pression interstitielle de l'eau, La colorimétrie révèle des valeurs de pression allant de 300 kN/m<sup>2</sup> à 160 kN/m<sup>2</sup>, Qui est quasiment identique par rapport à la situation 10 mm de précipitation.

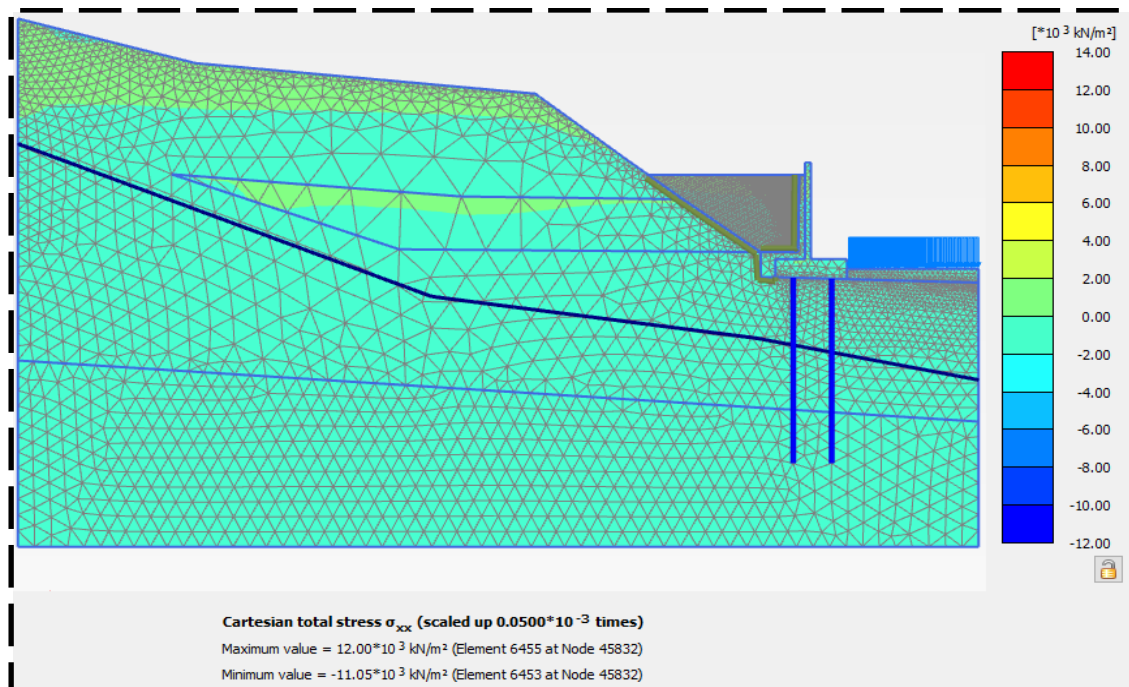


Figure IV-28 Les contraintes effectives horizontaux 40mm.

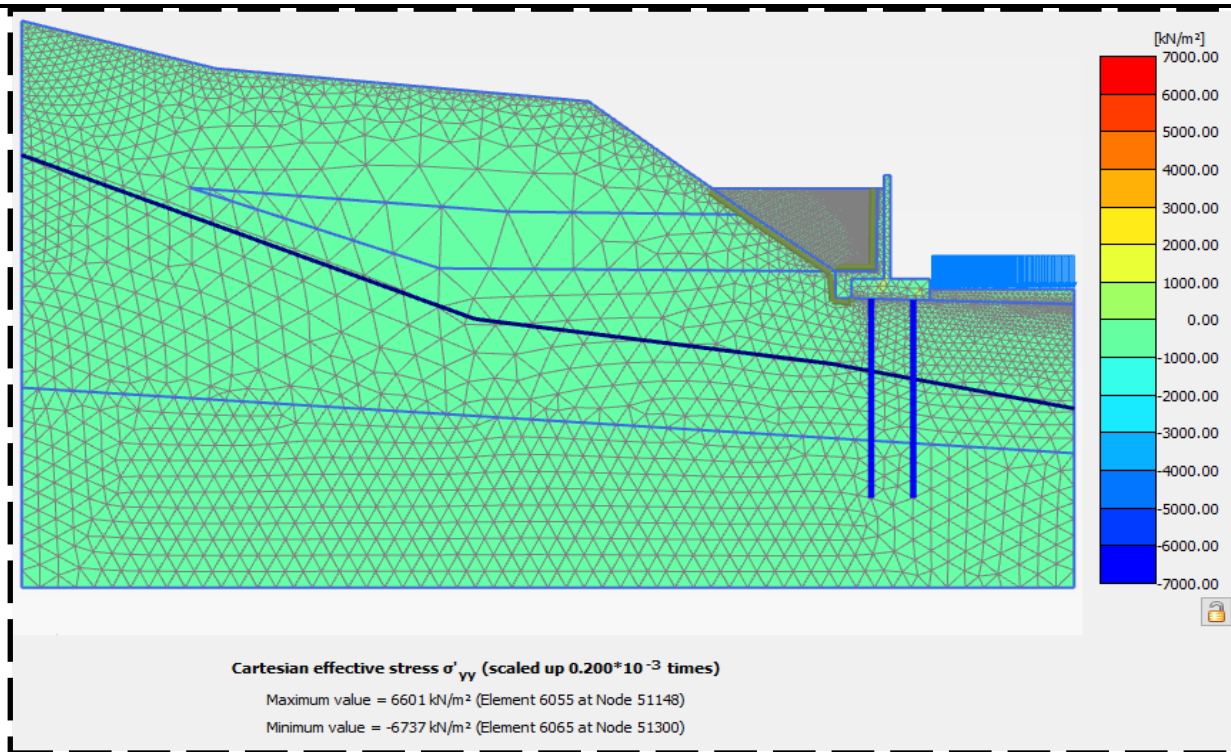


Figure IV-29 Les contraintes effectives verticales 40mm.

Avec 40 mm les valeurs des contraintes effectives selon x et y restent globalement similaires, en comparaison à celle de 10 mm

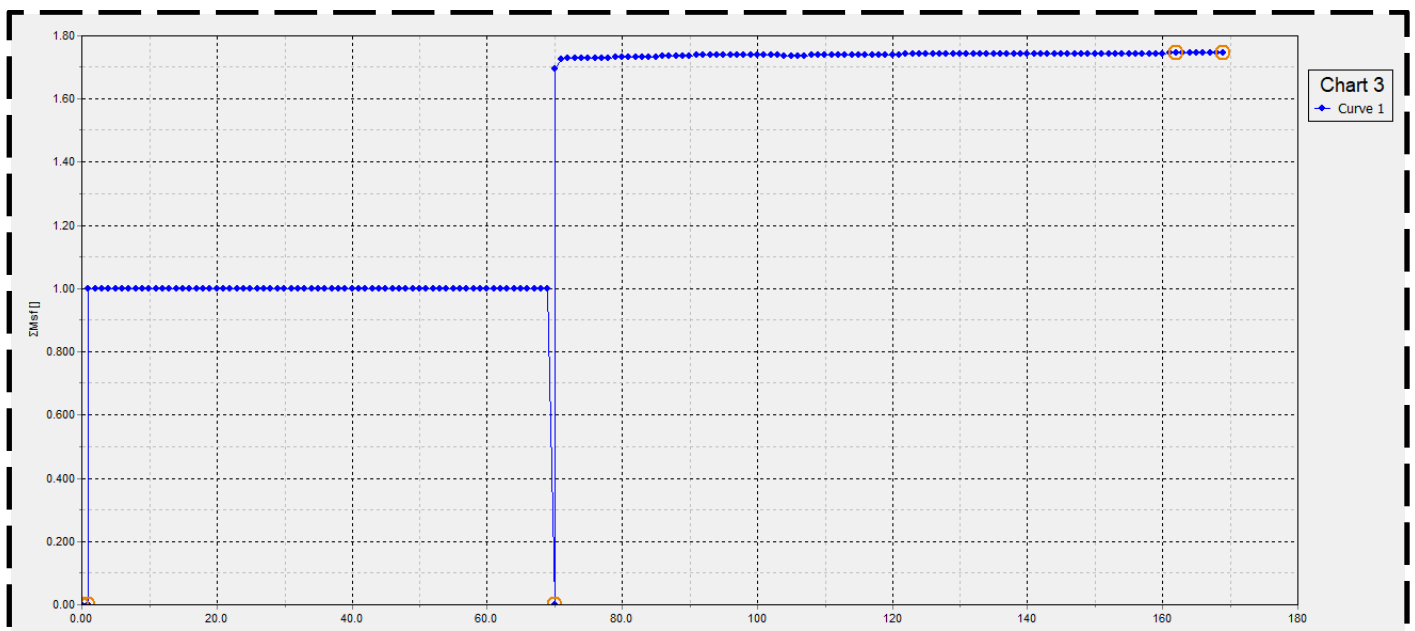


Figure IV-30 Le facteur de sécurité de 40mm

L'influence des 40 mm de précipitation n'est pas directement visible dans l'analyse, bien qu'elle entraîne une réduction du facteur de sécurité (Fs) et accentue le risque de glissement.

Pourtant, la valeur obtenue reste élevée avec un  $F_s$  de **1.8**, ce qui s'explique principalement par :

Un **drainage efficace**, qui limite l'accumulation de pressions interstitielles, même en présence de fortes précipitations.

Une **restructuration du sol** qui permet une **redistribution rapide des eaux infiltrées**, sans induire de modification significative des contraintes effectives.

Une **phase de consolidation avancée**, atténuant l'impact de l'eau supplémentaire sur la stabilité du talus.

## **4. Conclusion**

L'analyse détaillée des résultats obtenus met en évidence l'impact des différents paramètres sur la stabilité du talus étudié. Grâce aux simulations numériques effectuées avec PLAXIS 2D, il a été possible d'identifier les mécanismes de rupture et d'évaluer l'efficacité des techniques de stabilisation mises en œuvre.

Dans ce travail, nous avons pu mettre en évidence l'effet des précipitations, tandis que l'effet de la température n'a pas pu être analysé en raison des limitations méthodologiques ou techniques rencontrées.

Les résultats montrent que la pression interstitielle, les précipitations jouent un rôle déterminant dans l'évolution de l'instabilité du sol. L'analyse des effets de la pluviométrie sur le comportement géotechnique montre des variations significatives dans les paramètres clés

Sans effet de pluviométrie, Les déformations restent relativement stables, dominées par les propriétés intrinsèques du sol et les charges appliquées. Les contraintes restent équilibrées sans modification notable de la pression interstitielle. Les déplacements verticaux et horizontaux évoluent principalement sous l'effet des contraintes mécaniques sans perturbation externe. Le facteur de sécurité reste à son niveau initial, reflétant une stabilité sans influence hydrologique.

Avec une pluviométrie de 10 mm, une Augmentation légère des déformations, Diminution modérée du facteur de sécurité, liée à l'humidification du sol sans saturation totale. Augmentation de la pression interstitielle, provoquant une réduction progressive de la résistance au cisaillement. Déplacements légèrement amplifiés, notamment dans les sols sensibles à l'eau (argiles, schiste).

Avec une pluviométrie de 40 mm, Les déformations, dues à la saturation restent peu similaires. Forte augmentation du facteur de sécurité, indiquant un risque minimale accru d'instabilité, particulièrement sur les pentes. Stabilisation de la pression interstitielle, entraînant

une perte notable de résistance du sol et un accroissement des tassements. Déplacements beaucoup plus marqués, en raison du fluage et des écoulements souterrains amplifiés.

Un drainage efficace, qui limite l'accumulation de pressions interstitielles, même en présence de fortes précipitations.

Une restructuration du sol qui permet une redistribution rapide des eaux infiltrées, sans induire de modification significative des contraintes effectives.

Une phase de consolidation avancée, atténuant l'impact de l'eau supplémentaire sur la stabilité du talus.

En résumé, la pluviométrie affecte directement la stabilité géotechnique en modifiant la contrainte effective et en augmentant les déformations et déplacements.

Une pluviométrie intense peut amplifier ces variations et accentuer les risques de rupture dans les sols sensibles à l'eau.

## Conclusion générale

Un glissement de terrain est un mouvement gravitaire de masse de sol ou de roche, sous l'effet de facteurs naturels ou anthropiques. Ces phénomènes représentent un risque majeur pour les infrastructures, et ils sont très dangereux selon plusieurs normes et critères répandus dans le monde. Ce document présente une étude approfondie sur les glissements de terrain en intégrant l'analyse de l'influence des paramètres climatiques sur leur déclenchement et leur évolution. Il distingue les mouvements naturels (glissements, coulées boueuses, fluage) des instabilités d'origine anthropique (talus aménagés, remblais), à travers une analyse des causes multifactorielles qui les conditionnent, notamment d'ordre géologique (lithologie, structure), hydrologique (ruissellement, infiltration) et climatique (précipitations, cycles gel-dégel), pour ensuite nous avoir présenté les différentes méthodes d'analyse de la stabilité, discrétisant les solutions douces (drainage, végétalisation, reprofilage) et des solutions rigides (murs de soutènement, ancrages, pieux) complétées par des analyses de stabilité empiriques (méthodes limites), analytiques (équilibre des tranches) ou numériques.

La partie appliquée du travail consiste en une modélisation numérique d'un glissement réel survenu sur la rocade côtière de Ghazaouet, à l'aide du logiciel PLAXIS 2D. Cette section décrit la méthode de simulation combinant les effets d'infiltration et de pression hydraulique. Les résultats mettent en évidence l'effet déstabilisant de l'eau sur la cohésion des sols et permettent d'identifier des seuils critiques de précipitation. Ils confirment également l'efficacité de solutions combinées comme le drainage ciblé et le reprofilage du versant.

Cette étude met en lumière l'importance d'une approche intégrée combinant modélisation numérique, suivi géotechnique et prise en compte des effets de précipitation.

Enfin, certaines analyses n'ont pas pu être menées avec la profondeur souhaitée il est possible d'affirmer que les glissements de terrain naturels sont fortement influencés par les précipitations. Cependant, dans notre étude, nous n'avons pas pu mettre en évidence cet effet de manière claire et précise.

## V. Bibliographie

- Bekkouche et marouch. (2024). *Etude de stabilité d'un glissement du terrain*. tlemcen, GENIE CIVIL master voie et ouvrage d'art, algerie.
- Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Occupation du territoire,. (2017). *Glissement du terrain dans les dépôts meubles : Types et causes*. Consulté le 05 14, 2025, sur Glissement des pentes dans les depots meubles: [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement\\_territoire/orientations\\_gouvernementales/glissements\\_errains\\_types\\_causes.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_errains_types_causes.pdf)
- Belbachir et Amrani . (2020). *Développement d'un outil numérique d'aide à la décision : cas de stabilité et confortement de glissement des terrains*. Tlemcen, Département de GENIE CIVIL Master Géotechnique, Algérie.
- Blum, C. a. (2008). *Swarm intelligence in optimization,Swarm intelligence: introduction*.
- Briaud, J. (2013). *Geotechnical Engineering : Saturated Unsaturated Soil de Jean.L Briaud*. Canada: Wiley & Sons.
- Chen, W. (1975). *Limit Analysis and Soil Plasticity,Developments in geotechnical engineering, vol.7*. Amsterdam, The Netherlands.
- Cloud front. (s.d.). *Chapitre IV : Méthodes de confortement des glissement du terrain*. Consulté le 05 19, 2025, sur Cloud front: <https://d1n7iqsz6ob2ad.cloudfront.net> > pdf
- Cook, S. (.–4. (1983). “An overview of computational complexity”. *Commun ACM*, 26(6), 401–408.
- Dawson, E. M. (1999). *Slope stability analysis by strength reduction*,. *J.Geotechnique*: 49(6), 835–840.
- Drucker, D. C. (1952). *Extended limit design theorems for continuous media*. *Math*: 9, 381-389.
- Durville et Séve . (1996). *Stabilité des pentes: Glissements en terrain meuble*. France: Technique de l'ingénieur,. Récupéré sur stabilité des pente.
- Fellenius et Bength . (2025). *Basics of foundation design*. <Bengt@Fellenius.net>, 570p. Sidney, British Columbia. Récupéré sur [www.Fellenius.net](http://www.Fellenius.net)
- Glissement du pentes dans les dépôts meuble* . (2017). Consulté le 05 14, 2025, sur gouvernement du Québec: [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement\\_territoire/orientations\\_gouvernementales/glissements\\_errains\\_types\\_causes.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/glissements_errains_types_causes.pdf)
- Griffiths, D. V. (1999). *Slope stability analysis by finite elements*. *Geotechnique*, : 49(3), 387–403.
- Holland, J. (1975). ‘Adaptation in natural and artificial systems, . University of Michigan Press”, Oxford.
- Keller Group. (2025). *Drains verticaux préfabriqués*. Consulté le 05 06, 2025, sur Keller Group: <https://www.keller-algerie.com/expertise/techniques/drains-verticaux-prefabriques>
- Kezai.I. (2015, 11 25). *Analyse des glissement de terrain de grand ampleur par la methode des element finis*. 108. Tlemcen, Genie Civil Master Construction, Algérie.
- Khochni, B. (2024). *Stabilisation des Talus par nappage*. Sidi Bel Abbes, Département de Genie Civil Thèse de Doctorat Traveau Publics , Algérie.
- Lis et Jad, L. (2025, 02 26). *WEBINAR connect the content of soil moinsture derived from satelites with the power of the soil and the stability of the slope using the analysis of the limited elements*. USA: Bentley.
- LTPO. (2021). *Etude de sol : Stabilité au niveaux d'un talus faisant partie de rocade cotière lot N°1 du PK1+000 au PK1+150 a Gazaouet*. Tlemcen: Laboratoire de Traveaux Publics Ouest .
- Matsui, T. a. (1992). *Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique, Soils Found*, . 32(1), 59–70.
- Medjahdi.M, B. e. (2025, 02 24). *Photo* . Ghazaouet , Tlemcen Algérie.

## Chapitre IV Dépouillement et interprétations des résultats

---

- Philipponnat, G. (1979). *Fondation Et Ouvrage en Terre*. Paris france: EYROLLES.
- Pilot. (1973). *Stabilité des pentes: Glissement de terrain*. Paris, Paris France : Ecole nationale des pentes et chaussées: LCPC.
- Rechenberg, I. (1965). 'Cybernetic solution path of an experimental problem'. Farnborough.: Library Translation1122,Royal Aircraft Establishment.
- Reid, R. G. (1999). *Real-time monitoring of active landslides La Husen and William.L Ellis*. US Department of the interior US Géological servey .
- Sassi, K. (1996, 09 23). Contributions à l'étude des mécanismes de déformation des pentes instables. 433. Lyon, Doctorat Genie Civil : Sols Matériaux Structures Physique du bâtiment, Lyon France.
- Schlosser, F. (1988). *Element de mécanique des sols* . Paris, Algérie : Press de l'ecole nationale des ponts et chaussées.
- Sobhan, k. B. (2012). *Principles of geotechnical engineering*. Florida, United State America : Cenrage Learning.
- Société d'étude technique de sétif. (2022). *Projet : suivi technique des travaux d'achèvement du Lot n°01 réalisation de l'évitement de Ghazaouet sur 16km: Glissement du terrain apparu au PK 01+000*. Sétif: Set Sétif. Consulté le 04 20, 2025
- Soliman, M. .. (2014). Bio-inspiring techniques in watermarking medical images: a review. Springer, Berlin, 70, 93–114. Récupéré sur <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43616-5>.
- Talfumière, V. (2019, 05 16). 40 ANS de retour d'expérience sur les ouvrage en terre des LGV . *Journée technique CFBR – CFMS –SPTF FNTP du 16 mai 2019*. 40 ANS de retour d'expérience. Consulté le 05 10, 2025, sur Comité française de mécanique des sols: <https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/journee-20190516/09.pdf>
- Zheng, H. S. (2009 ). *A practical procedure for searching critical slip surfaces of slopes based on the strength reduction technique*. J Comput, Geotech : 36(1–2), 1–5.
- Zheng, H. T. (2006). *On two definitions of the factor of safety commonly used in the finite element slope stability analysis*. J Comput, Geotech,: 33(3), 188–195.
- Zienkiewicz. (1975). Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics". Genie Géotechnique.