



**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL



MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie Civil SPECIALITE : Géotechnique

Par :

BECHICHE Fatma Zohra & HADJI Warda

THEME

AMELIORATION DE LA STABILITE DES SOLS DU PARC LES

GRANDS VENTS A ALGER

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

MENASRI Abderrazek, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

AISSI Adel, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Examineur

SEDDIKI Ahmed, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Co-Encadreur

KHEMISSA Mohamed, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Encadreur

Promotion : 2024/2025

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier, mon directeur de mémoire **M. KHEMISSA Mohamed**, professeur à l'université Mohamed Boudiaf de Msila, pour ses conseils avisés, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

- Mon co-encadrant, M. SEDDIKI Ahmed, maitre de conférence à l'université de Msila, qui m'a beaucoup appris sur les défis auxquels sont confrontés le domaine des digues et de la simulation numérique. Il a partagé ses connaissances et son expérience dans le domaine tout en me donnant confiance et une grande indépendance dans la réalisation de tâches valorisantes.
- Toute l'équipe pédagogique de l'Université de Msila, responsable de ma formation.
- Mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.
- Au président et aux membres du jury, qui ont accepté d'examiner mon travail, me corriger et m'orienter

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

FZ Bechiche & Warda Hadji

Résumé

Le **glissement** de terrain représente un risque naturel majeur en raison des pertes humaines et matérielles qu'il peut causer, d'où la nécessité de mettre en place des mesures préventives et des solutions techniques adaptées.

Dans cette étude, la **stabilité** d'un **talus** situé dans le site d'un Parc à Alger a été analysée à l'aide du logiciel Geoslope, en explorant plusieurs méthodes de calcul du facteur de sécurité et différentes techniques de **renforcement**.

- Sous séisme, le facteur de sécurité atteint 1,097, valeur inférieure au seuil requis.
- Le **clouage** a permis une augmentation de 5 % du facteur de sécurité, et la construction d'un mur de soutènement, une hausse de 8 %.

Mots clés : glissement - stabilité – talus - renforcement - clouage.

Abstract

Landslides represent a major natural hazard due to the significant human and material losses they can cause, highlighting the need for preventive measures and appropriate technical solutions.

In this study, the stability of a slope located in a public garden in Algiers was analysed using the Geoslope software, exploring several methods for calculating the factor of safety and different reinforcement techniques.

- Under seismic conditions, the factor of safety was 1.097, which is below the required threshold.
- Nail reinforcement increased the factor of safety by 5%, while the construction of a retaining wall increased it by 8%.

Keywords: landslide - stability - slope - reinforcement - nail reinforcement.

خلاصة

يمثل الانزلاق الأرضي خطراً طبيعياً كبيراً بسبب الخسائر البشرية والمادية التي قد يتسبب بها، مما يبرز ضرورة وضع تدابير وقائية وحلول تقنية مناسبة. في هذه الدراسة، تم تحليل استقرار منحدر يقع في حديقة بالجزائر العاصمة باستخدام برنامج جيوسلوب مع دراسة عدة طرق لحساب معامل الأمان وتقنيات تدعيم مختلفة. تحت تأثير الزلازل، بلغ معامل الأمان 1,097 وهي قيمة أقل من العتبة المطلوبة. أدى التدعيم بالمسامير إلى زيادة بنسبة 5% في معامل الأمان، بينما أدى بناء جدار دعم إلى ارتفاع بنسبة 8%.

الكلمات المفتاحية: الانزلاق - الاستقرار - المنحدر - التدعيم - المسامير.

SOMMAIRE

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE PREMIER	3
Problématique des glissements de terrain et méthodes de confortement	3
I.1 Introduction.....	3
I.2. Implications géotechniques.....	4
I.3. Les glissements de terrain.....	4
I.4. Mécanismes des glissements de terrain	5
I.5. Facteurs influençant les glissements de terrain.....	5
I.6. Analyse de la stabilité	6
I.7. Méthodes de confortement.....	7
I.8. Considérations pratiques	10
I.9. Conclusion	10
CHAPITRE DEUXIEME.....	15
Techniques d’analyse de la stabilité des pentes	15
II.1. Introduction	15
II.2. Principales techniques d’analyse de la stabilité des pentes	15
II.3. Analyse d’équilibre limite	16
II.4. Analyse des éléments finis	19
II.5. Analyse de réduction de la résistance au cisaillement.....	20
II.6. Analyse probabiliste	21
II.7. Méthodes empiriques.....	21
II.8. Conclusion	22
TROISIEME CHAPITRE	26
Outils numérique de simulation	26
III.1. Le logiciel Geostudio	26
III.2. Le module SLOPE/W.....	27
III.3. L’action sismique	32
III.4. Affichage des résultats des analyses	33
QUATRIEME CHAPITRE	37
Stabilité et stabilisation du talus "les grands vents"	37
IV.1. Introduction.....	37
IV.2. Présentation du projet.....	37
IV.3. Analyse de la stabilité d'un talus ayant glissé	40
IV.4. Confortement d'un talus ayant glissé	45
IV.5. Synthèse	49
Conclusion Générale	50

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1. Quelques types de mouvement de terrains</i>	<i>3</i>
<i>Figure I.2. Glissement de terrain au niveau d'une route.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.3. Effets favorables et défavorables des forces envers le glissement.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4. Facteurs intrinsèques et extrinsèques à l'origine des glissements de terrain</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.5. Méthodes d'analyse de la stabilité des talus.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.6. Renforcement du sol par colonnes ballastées.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.7. Renforcement par clouage.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.8. Renforcement par géotextile.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.9. Renforcement par végétalisation.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure II.1. Surface de rupture circulaire, division de la masse glissante en tranches.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.2. Diagramme des forces - méthode de Spencer.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.3. Analyse par éléments finis.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure III.1. Interface graphique du logiciel Geostudio ver 2012.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure III.2. Méthode des tranches.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure III.3. Définition de la surface de glissement par la méthode de la grille et du rayon.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.4. Toutes les surfaces de glissement passant par un point.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.5. Schéma de la surface de glissement d'entrée et de sortie</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.6. Boite d'introduction des coefficients d'accélération sismique</i>	<i>33</i>
<i>Figure III.7. Surface de glissement critique et facteur de sécurité minimum.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure IV. 1. Situation géographique de la zone d'étude.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure IV. 2. Extrait de la carte géologique de Chéraga.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure IV. 3. Plan d'implantation des essais in situ et du profil.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV. 4. Profil géotechnique retenu.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure IV. 5. Valeur du Facteur de sécurité du talus sous poids propre - méthode de Fellenius.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV. 6. Coefficients pseudo-statiques horizontal et vertical pris en compte.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV. 7. FS du talus en présence du séisme de zone par la méthode de Bishop.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV. 8. FS du talus en présence d'une nappe phréatique prédéfinie (méthode de Bishop).....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV. 9. Valeur du facteur de sécurité du talus totalement saturé (méthode de Spencer).....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV. 10. Valeur du FS du talus totalement saturé et sous séisme (méthode de Spencer).....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV. 11. FS du talus en présence du séisme après renforcement par clou.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV.12. FS du talus en présence du séisme après renforcement par mur de soutènement.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV.13. Coupe transversale d'un mur de soutènement</i>	<i>47</i>
<i>Figure IV.14. Le schéma d'armature d'un mur de soutènement.....</i>	<i>48</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau III.1 Équations de statique satisfaites.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau III.2 Caractéristiques et relations des forces inter-tranches.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau IV. 1. Valeurs des coefficients sismiques adoptés.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau IV. 2. Caractéristiques mécaniques des couches de sols.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau IV. 3. Valeurs du facteur de sécurité sous Poids propre.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau IV. 4. Coordonnée de la nappe phréatique.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau IV. 5. Récapitulation des valeurs du facteur de sécurité pour différents cas de charge.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau IV. 6. Récapitulation des valeurs du facteur de sécurité pour différents cas de charge après renforcement.....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau IV. 7. Valeurs du Coefficient de sécurité sans et avec séisme.....</i>	<i>48</i>

Introduction Générale

La stabilité des pentes constitue une problématique géotechnique complexe qui suscite un large intérêt parmi les ingénieurs, les praticiens et les chercheurs. En effet, l'instabilité des pentes peut entraîner d'importants dommages aux infrastructures, voire des pertes humaines dans certains cas, en plus de lourdes conséquences économiques.

Les causes de l'instabilité sont variées, incluant des facteurs naturels tels que les fortes précipitations ou les séismes, ainsi que des interventions humaines comme les travaux de terrassement ou le changement d'affectation des sols. Pour évaluer la stabilité d'une pente, les ingénieurs se basent sur le calcul du facteur de sécurité, lequel peut être déterminé par différentes méthodes selon le cas étudié.

L'analyse de la stabilité des pentes repose de plus en plus sur des approches numériques offrant une grande précision. Ces analyses sont réalisées à l'aide de logiciels spécialisés tels que GeoSlope, qui permettent de modéliser efficacement les conditions d'instabilité.

Par ailleurs, l'amélioration des sols constitue un levier essentiel dans la prévention des glissements. Les avancées technologiques actuelles tendent vers des solutions à la fois plus économiques et respectueuses de l'environnement.

Dans ce cadre, notre travail vise à réaliser une étude numérique de la stabilité d'un talus situé au Parc Grands Vents dans la wilaya d'Alger, en s'appuyant sur un modèle de référence élaboré à l'aide du logiciel GeoSlope 2024, dans le but de mieux comprendre les phénomènes en jeu et de proposer des solutions adaptées.

Pour atteindre l'objectif, le travail est divisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Problématique des glissements de terrain et méthodes de confortement ; Les glissements de terrain ; Analyse de la stabilité ; Méthodes de confortement.

Chapitre 2 : Techniques d'analyse de la stabilité des pentes ; Principales techniques d'analyse de la stabilité des pentes ; Analyse des éléments finis ; Analyse de réduction de la résistance au cisaillement ; Analyse probabiliste ; Méthodes empiriques.

Chapitre 3 : Outils numérique de simulation ; présentation du logiciel GeoStudio : le module SLOPE/W ; Formes de surface de glissement ; L'action sismique ; Affichage des résultats des analyses.

Chapitre 4 : Stabilité et stabilisation du talus "les grands vents" ; Présentation du projet ; Analyse de la stabilité d'un talus ayant glissé ; Confortement d'un talus ayant glissé.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROBLEMATIQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN ET

METHODES DE CONFORTEMENT

Problématique des glissements de terrain et méthodes de confortement

I.1 Introduction

Les instabilités des terrains se manifestent sous des formes variées tel que les chutes soudaines, les glissements, les écoulements, les basculements et les affaissements.



Figure I.1. Quelques types de mouvement de terrains

Chaque type reflète une interaction spécifique entre le matériau, la pente et les conditions environnementales.

Leur compréhension approfondie est la première étape pour prévenir les risques et protéger les zones vulnérables, en s'appuyant sur des approches géotechniques adaptées à chaque situation.

I.2. Implications géotechniques

Identifier le type d'instabilité est déterminant pour choisir une réponse adaptée :

- les chutes nécessitent des protections contre les impacts (filets, enceintes) ;
- les glissements demandent des renforcements ou des drainages.
- Les écoulements exigent une gestion de l'eau en amont ;
- et les affaissements une stabilisation des vides souterrains.

Une analyse préalable du terrain, combinant observations visuelles et études techniques, permet de classer l'instabilité et d'anticiper son évolution.

I.3. Les glissements de terrain

Les glissements de terrain, mouvements de masse affectant les pentes naturelles ou artificielles, représentent un défi géotechnique majeur en raison de leur impact sur les infrastructures, les populations et l'environnement. Ces phénomènes surviennent lorsque les forces déstabilisantes dépassent les forces résistantes, un équilibre mesuré par le facteur de sécurité (rapport des forces résistantes et motrices).



Figure I.2. Glissement de terrain au niveau d'une route

Ce chapitre explore les mécanismes théoriques à l'origine des glissements, leurs facteurs déclenchants, et les approches de confortement pour restaurer la stabilité.

I.4. Mécanismes des glissements de terrain

Les glissements de terrain sont régis par les principes de la mécanique des sols. La résistance au cisaillement (τ) le long d'une surface potentielle de rupture est exprimée par la loi de Coulomb :

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

Où c est la cohésion, $\sigma' = \sigma - u$ la contrainte effective (avec σ : contrainte totale, u : pression interstitielle), et ϕ l'angle de frottement interne.

- Forces motrices : Elles proviennent principalement de la composante gravitationnelle parallèle à la pente, donnée par $F_m = W \cdot \sin \alpha$, où $W = \gamma V$ est le poids du matériau (γ : poids volumique, V : volume) et α l'inclinaison.
- Forces résistantes : Elles dépendent de la résistance au cisaillement mobilisée sur la surface de rupture : $F_r = \tau \cdot A = (c + (\gamma \cdot h \cdot \cos \alpha - u) \tan \phi) \cdot A$, où h est l'épaisseur de la masse mobilisée et A la surface.

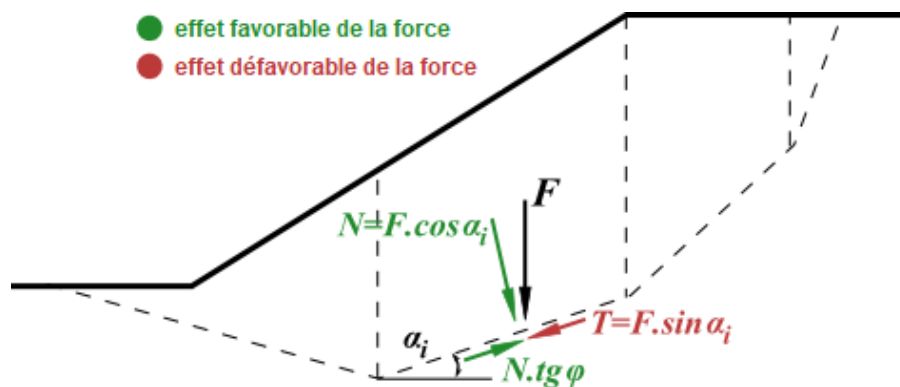


Figure I.3. Effets favorables et défavorables des forces envers le glissement

Un glissement se produit si $F_m > F_r$, soit $FS < 1$. Les variations de u (par saturation) ou de α (par érosion) sont des facteurs clés de déstabilisation.

I.5. Facteurs influençant les glissements de terrain

La problématique des glissements repose sur des facteurs intrinsèques et extrinsèques :

I.5.1. Facteurs intrinsèques

- Propriétés géotechniques : Les sols à faible c ou ϕ (argiles saturées, sables lâches) offrent une résistance limitée. Une diminution de σ' par augmentation de u réduit τ .
- Géométrie : 1 pente raide augmente $\sin\alpha$, donc F_m , et une épaisseur h importante accroît W .
- Structure géologique : Les discontinuités créent des plans de faiblesse est minimale.

I.5.2. Facteurs extrinsèques

- Hydrologie : L'infiltration d'eau élève $u = \gamma_w h_w$ (γ_w : poids volumique de l'eau, h_w : hauteur d'eau), diminuant σ' .
- Dynamique externe : Les séismes introduisent une force horizontale $F_s = m \cdot a$ (a : accélération), tandis que les surcharges ou excavations modifient σ .

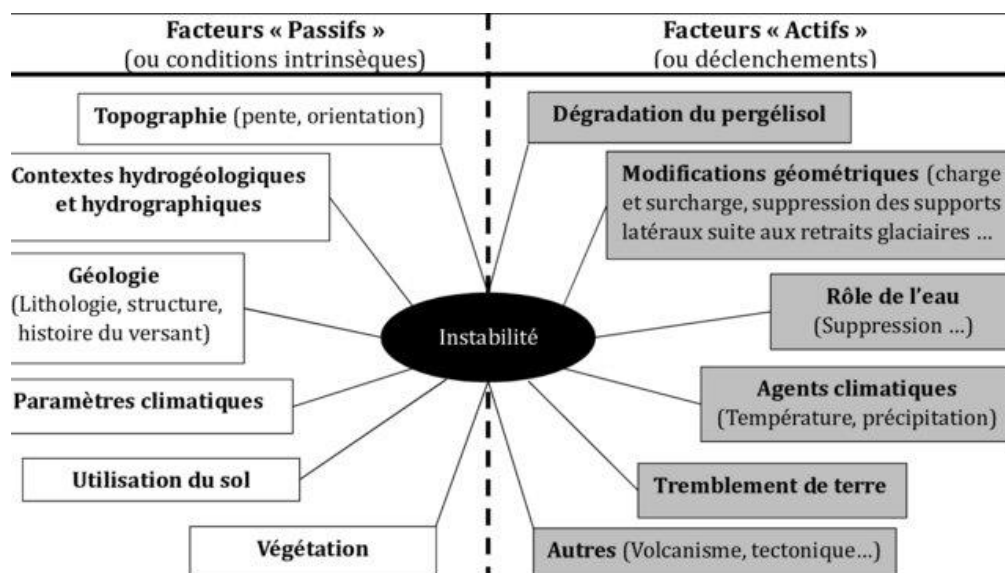


Figure I.4. Facteurs intrinsèques et extrinsèques à l'origine des glissements de terrain

I.6. Analyse de la stabilité

Pour comprendre et prévenir les glissements, une analyse géotechnique est essentielle. Elle repose sur des méthodes qui évaluent les conditions de stabilité d'une pente. Les approches traditionnelles divisent la pente en sections et comparent les forces en jeu pour déterminer si un risque existe. Les outils modernes, comme les logiciels de modélisation, permettent une analyse plus fine en prenant

en compte les variations dans le sol, l'eau et les charges appliquées.



Figure I.5. Méthodes d'analyse de la stabilité des talus

I.7. Méthodes de confortement

Le confortement vise à augmenter FS au-dessus d'une valeur cible (souvent 1,3 à 1,5) en modifiant les forces en jeu. Les approches théoriques incluent :

I.7.1. Drainage

Principe : Réduire u pour augmenter σ' , donc τ . La relation devient $\tau = c + \gamma h * \cos \alpha * \tan \phi$ si $u \rightarrow 0$.

Techniques : Drains horizontaux, tranchées drainantes, ou puits verticaux modifient les écoulements et abaissent hw .

I.7.2. Ouvrages rigides

Principe : Ajouter une force stabilisante externe F_{ouvrage} pour contrer F_m . Par exemple, un mur de soutènement génère une poussée passive $F_p = 0.5k_p\gamma h^2$ (k_p : coefficient de poussée passive).

Techniques : Murs, pieux, ou ancrages augmentent F_r via des interactions sol-structure.



Figure I.6. Renforcement du sol par colonnes ballastées

I.7.3. Reprofilage

Principe : Réduire α diminue $F_m = W \sin \alpha$, tandis qu'un remblai en pied accroît $W \cos \alpha$, donc σ' .

Application : Aplanissement ou terrassement pour ajuster la géométrie.

I.7.3. Renforcement interne

Principe : Augmenter c ou ϕ par des matériaux artificiels (géotextiles, clous) intégrés dans le sol.

Effet : La résistance devient $\tau_{\text{renforcé}} = c + c_{\text{add}} + \sigma' (\tan \phi + \tan \phi_{\text{add}})$.



Figure I.7. Renforcement par clouage



Figure I.8. Renforcement par géotextile

I.7.4. Végétalisation

Principe : Les racines augmentent c dans les couches superficielles et réduisent u par évapotranspiration.

Limite : Efficace pour les glissements peu profonds.



Figure I.9. Renforcement par végétalisation

I.8. Considérations pratiques

Chaque méthode doit être adaptée au contexte géotechnique (type de sol, profondeur du glissement, conditions hydrologiques). Une analyse préalable via *FS* pré- et post-intervention valide l'efficacité. Par exemple, un drainage seul peut suffire si u est le facteur dominant, tandis qu'un mur est nécessaire si α ou h prédomine. Les coûts, l'accessibilité et l'impact environnemental guident également le choix.

I.9. Conclusion

Les glissements de terrain émergent d'une interaction complexe entre les propriétés du sol, la géométrie des pentes et les conditions externes. Leur confortement repose sur des stratégies variées, allant de la gestion de l'eau à l'ajout de structures ou à la modification du terrain. Une approche géotechnique bien pensée, adaptée au contexte spécifique, permet de maîtriser ces phénomènes et de protéger durablement les zones à risque.

CHAPITRE DEUXIEME

TECHNIQUES D'ANALYSE DE LA STABILITE DES PENTES

Techniques d'analyse de la stabilité des pentes

II.1. Introduction

Pour évaluer le risque d'instabilité des pentes et de glissements de terrain, les géologues et ingénieurs s'appuient sur diverses approches, telles que la cartographie et les observations directes sur le terrain, les levés géophysiques, les forages accompagnés d'échantillonnages, ainsi que des essais in situ comme le test de pénétration standard (SPT) et le test de pénétration au cône (CPT). Ils utilisent également des outils de modélisation et de simulation numérique pour anticiper le comportement des pentes et identifier les mécanismes potentiels de rupture dans différentes situations.

En somme, l'analyse de la stabilité des pentes et des glissements de terrain constitue un domaine clé de l'ingénierie géotechnique, contribuant à garantir la sécurité et la pérennité des projets d'infrastructure et des communautés humaines dans les régions exposées aux aléas naturels.

II.2. Principales techniques d'analyse de la stabilité des pentes

Plusieurs méthodes sont employées pour étudier la stabilité des pentes, parmi lesquelles :

1. **Analyse d'équilibre limite** : Cette approche repose sur l'hypothèse qu'une pente cède le long d'une surface de rupture définie, et elle évalue la stabilité en comparant les forces qui résistent au mouvement à celles qui le provoquent le long de cette surface. Différentes variantes existent, telles que les méthodes de Bishop, de Janbu ou de Spencer.
2. **Analyse par éléments finis** : Cette technique divise la pente en une multitude de petits éléments pour analyser leur comportement individuel, permettant ainsi de considérer des géométries complexes, des propriétés variées du sol et des conditions de charge diversifiées.
3. **Analyse de réduction de la résistance au cisaillement** : Elle consiste à diminuer progressivement la résistance du sol jusqu'à ce que la pente atteigne un état de rupture, offrant une mesure de la stabilité sous diverses sollicitations.

4. **Analyse probabiliste** : Cette méthode utilise des modèles statistiques pour estimer la probabilité d'une rupture en tenant compte des incertitudes liées aux paramètres comme les caractéristiques du sol ou les conditions de charge.
5. **Méthodes empiriques** : Fondées sur l'expérience et les observations passées, ces approches servent souvent à une évaluation initiale. Parmi elles, on peut citer la méthode du nombre de stabilité ou la méthode du cercle suédois.

Chaque technique présente des atouts et des limites, et leur pertinence dépend du type de pente, des données disponibles et du degré de précision recherché.

II.3. Principales techniques d'analyse de la stabilité des pentes

L'analyse d'équilibre limite est une méthode fréquemment utilisée pour examiner la stabilité des pentes. Elle se base sur le principe selon lequel une pente reste stable lorsque les forces qui s'y exercent sont en équilibre. Pour cela, la pente est divisée en plusieurs segments, et la stabilité de chacun est étudiée séparément.

Le facteur de sécurité (FS) sert d'indicateur principal dans cette analyse : il correspond au rapport entre les forces qui empêchent le mouvement et celles qui le favorisent. Une valeur supérieure à 1 indique une pente stable, tandis qu'une valeur inférieure à 1 signale une instabilité.

Différentes approches d'analyse d'équilibre limite sont disponibles :

1. **Méthode de Bishop** : Très répandue, elle suppose que la résistance au cisaillement du sol croît linéairement avec la profondeur et décompose les forces en deux directions perpendiculaires.
2. **Méthode de Janbu** : Similaire à celle de Bishop, elle intègre la possibilité de surfaces de rupture circulaires.
3. **Méthode de Spencer** : Adaptée aux pentes complexes ou irrégulières, elle examine la répartition des forces et utilise une méthode graphique pour établir le facteur de sécurité.

Largement adoptée, l'analyse d'équilibre limite a ses limites. Elle suppose des sols homogènes et isotropes, ce qui n'est pas toujours réaliste, et ne prend pas en compte les effets de la pression interstitielle, qui peuvent fortement influencer la stabilité. Ainsi, des méthodes complémentaires, comme l'analyse par éléments finis peuvent être nécessaires pour affiner les résultats.

II.3.1. La méthode de Bishop

La méthode de Bishop est une technique d'analyse de la stabilité des pentes visant à calculer le facteur de sécurité (FS) dans diverses conditions de charge. Développée par Bishop dans les années 1950, elle est largement reconnue en ingénierie géotechnique.

Elle suppose que la surface de rupture est circulaire ou partiellement circulaire. La pente est divisée en **tranches** considérées comme des blocs rigides, et les forces agissant sur chacune sont décomposés en composantes verticale et horizontale. La stabilité de chaque tranche est évaluée à partir d'une équation d'équilibre des forces, et le facteur de sécurité global est obtenu en comparant la résistance totale disponible à la force motrice totale.

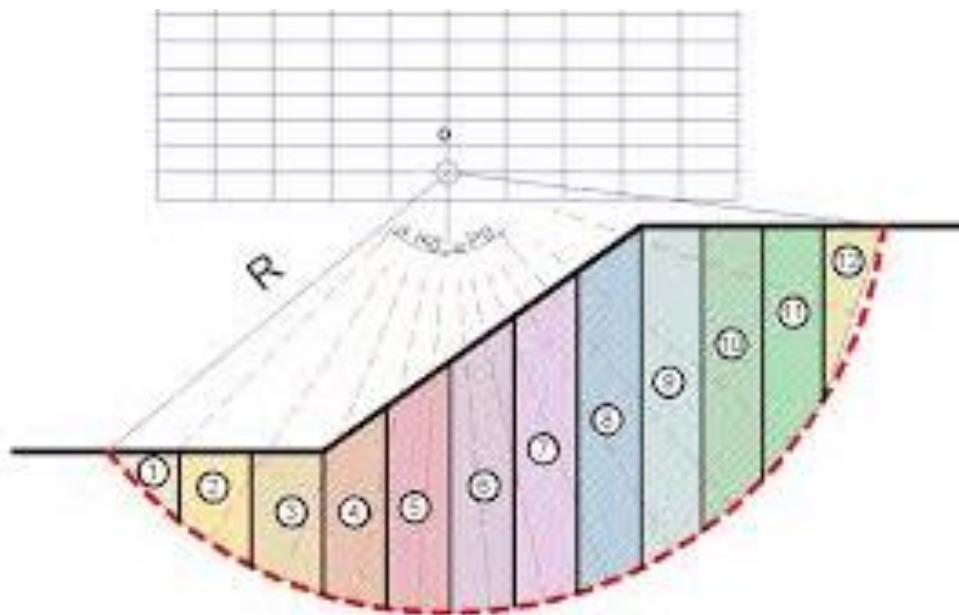


Figure II.1. Surface de rupture circulaire, division de la masse glissante en tranches

Cette méthode prend en considération la résistance au cisaillement du sol, son poids et la pression interstitielle de l'eau. Elle peut être appliquée selon une approche en contraintes totales ou en

contraintes effectives, en fonction des propriétés du sol et des conditions de la pente. Simple et pratique, elle est toutefois limitée par certaines hypothèses qui doivent être prises en compte dans des cas réels.

II.3.2. La méthode de Janbu

La méthode de Janbu est une approche courante en géotechnique pour analyser la stabilité des pentes.

Basée sur l'équilibre limite, elle repose sur l'hypothèse de surfaces de rupture circulaires.

Elle divise la pente en **tranches** verticales et examine les forces en jeu selon les principes de la statique.

Cette méthode intègre les variations des propriétés du sol avec la profondeur et les effets de la pression interstitielle sur la stabilité. Le facteur de sécurité est calculé comme le rapport entre les forces résistantes et motrices, une valeur supérieure à 1 indiquant une pente stable, et inférieure à 1 une pente instable.

Facile à appliquer et adaptée à une large gamme de géométries et de conditions de sol, la méthode de Janbu présente néanmoins des limites, notamment l'hypothèse de surfaces circulaires et l'absence de prise en compte des phénomènes d'adoucissement ou d'écrouissage du sol.

II.3.3. La méthode de Spencer

La méthode de Spencer est une approche générale des tranches, fondée sur le principe de l'équilibre limite. Elle exige que les forces et les moments exerçant une action sur chaque bloc soient en équilibre de manière satisfaisante. Ces blocs sont obtenus en divisant le sol situé au-dessus de la surface de glissement. Les forces qui s'appliquent sur chacun des blocs sont illustrées dans la figure qui suit.

Particulièrement adaptée aux pentes complexes avec plusieurs surfaces de rupture ou des géométries irrégulières, cette méthode reste toutefois limitée par son approche bidimensionnelle et l'hypothèse de propriétés uniformes du sol le long de la surface de rupture.

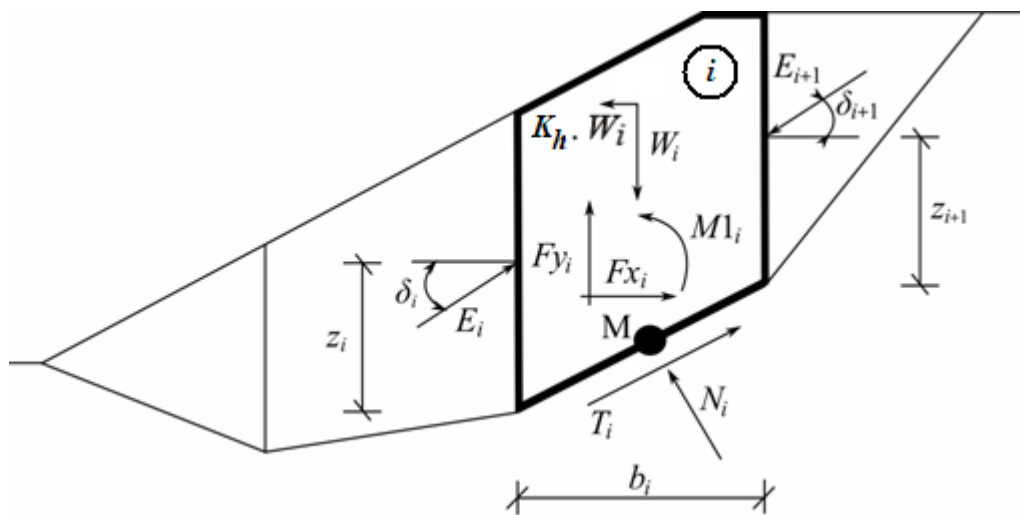


Figure II.2. Diagramme des forces - méthode de Spencer.

II.3.4. La méthode de Morgenstern-Price

La méthode Morgenstern-Price, mise au point dans les années 1960 par les ingénieurs canadiens Morgenstern et Price, est une technique d'analyse qui intègre les effets de la pression interstitielle due à l'infiltration d'eau.

Elle divise la pente en **tranches**, chacune associée à un facteur de sécurité spécifique. Elle calcule les contraintes effectives (contraintes totales moins la pression interstitielle) dans chaque tranche, puis compare la résistance au cisaillement du sol à la contrainte de cisaillement exercée.

Applicable à des pentes de formes variées, y compris celles à géométries complexes, cette méthode est intégrée dans de nombreux logiciels d'analyse. Elle suppose toutefois des propriétés de sol et une pression interstitielle uniformes, ce qui peut ne pas refléter certaines conditions réelles.

II.4. Analyse des éléments finis

L'analyse par éléments finis (FEA) est une méthode numérique permettant d'étudier le comportement de systèmes complexes en ingénierie. Elle consiste à diviser un système en petits éléments interconnectés, à modéliser leur comportement à l'aide d'équations mathématiques, puis à résoudre ces équations pour l'ensemble du système.

En géotechnique, la FEA est utilisée pour analyser les sols et les roches dans des contextes géologiques complexes, comme la stabilité des pentes, le comportement des fondations ou les problématiques liées aux tunnels et excavations.

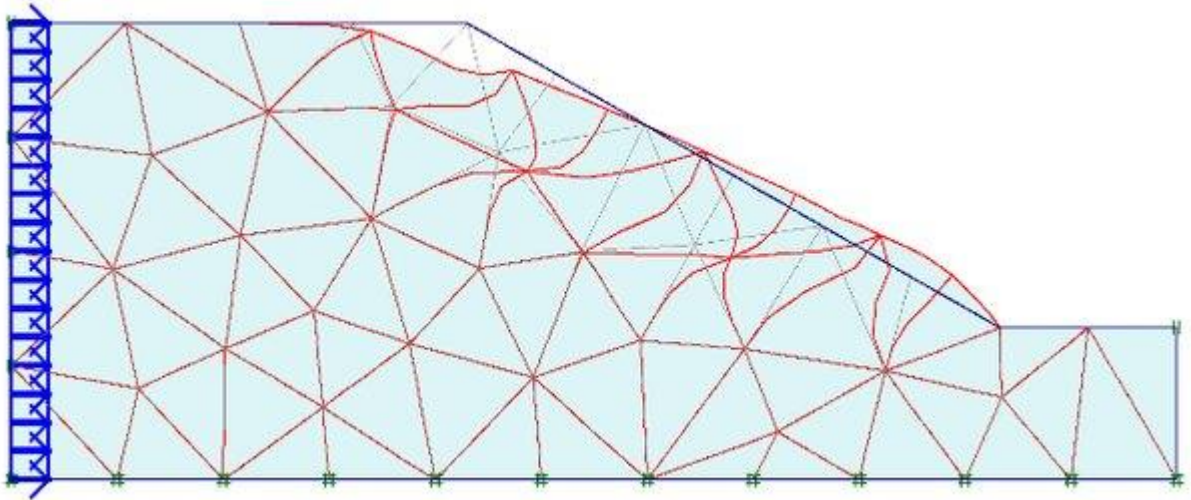


Figure II.3. Analyse par éléments finis.

Cette méthode exige une connaissance précise de la géométrie, des conditions aux limites, des propriétés des matériaux et des charges appliquées. Sa précision dépend de la qualité des données d'entrée et de la complexité du modèle. Bien qu'efficace, elle nécessite des ressources informatiques importantes, des logiciels spécialisés et une expertise en calcul numérique.

II.5. Analyse de réduction de la résistance au cisaillement

L'analyse de réduction de la résistance au cisaillement (SSRA), également appelée méthode de réduction de la stabilité ou méthode c, est une approche numérique pour évaluer la stabilité des talus et remblais.

Elle consiste à diminuer progressivement la résistance au cisaillement du sol jusqu'à provoquer une rupture, le facteur de sécurité (FS) étant déterminé au point où la contrainte de cisaillement maximale égale la résistance disponible.

Particulièrement utile pour les pentes à géométries ou propriétés de sol complexes, où les méthodes traditionnelles sont difficiles à appliquer, la SSRA demande des logiciels avancés et une puissance de calcul élevée. Elle est utilisée dans des domaines comme l'exploitation minière, les barrages ou les autoroutes, et permet d'étudier l'impact de facteurs environnementaux tels que les pluies, les séismes ou le changement climatique.

II.6. Analyse probabiliste

L'analyse probabiliste évalue la probabilité de rupture d'une pente en considérant les incertitudes liées aux facteurs influençant sa stabilité, (résistance du sol, la géométrie ou les conditions de charge. Plutôt que d'utiliser des valeurs fixes, elle attribue une plage de valeurs à chaque paramètre, reflétant ainsi la variabilité réelle. La simulation de Monte Carlo, fréquemment employée, génère de nombreuses simulations avec des valeurs d'entrée aléatoires tirées de distributions de probabilité, permettant de calculer la probabilité de rupture et d'identifier les paramètres les plus influents.

II.7. Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques s'appuient sur le comportement observé des pentes dans des cas passés, sans recourir à des modèles mathématiques complexes. Elles utilisent des relations dérivées de l'expérience pour évaluer la stabilité, ce qui les rend utiles lorsque les données sont rares ou les conditions géotechniques difficiles à modéliser.

II.7.1. La méthode du « nombre de stabilité »

Utilisée pour les pentes à surfaces de rupture planes. Elle évalue la stabilité en fonction de l'angle de la pente, du poids du sol, de sa cohésion et de son frottement interne, considérant une pente stable si l'indice dépasse 1, et instable sinon.

II.7.2. Utilité des méthodes empiriques

Souvent combinées à d'autres techniques, les méthodes empiriques apportent un complément précieux dans les contextes complexes ou à données limitées.

II.8. Conclusion

L'objectif est de prévenir les risques de glissements de terrain et d'assurer la sécurité des infrastructures et de la population. Les techniques d'analyse telles que l'analyse à l'équilibre limite (méthodes Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price), l'analyse par éléments finis, la réduction de la résistance au cisaillement, l'analyse probabiliste et les méthodes empiriques fournissent une gamme d'outils adaptés à différents contextes géotechniques.

Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients et son choix dépend de la complexité de la pente, des données disponibles et du niveau de précision requis. L'utilisation combinée de ces approches permet une évaluation plus robuste et fiable de la stabilité des pentes, contribuant ainsi à la gestion des risques naturels et à la durabilité des projets d'aménagement.

TROISIEME CHAPITRE

OUTIL NUMERIQUES DE SIMULATION

Outils numérique de simulation

III.1. Le logiciel GeoStudio

GeoStudio est un logiciel de calcul permettant le traitement de différents problèmes de sols tel que les glissements des terrains, les tassements, la consolidation, les infiltrations dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique.



C'est un ensemble de plusieurs modules :



Seep/w : modélisation des infiltrations (la stabilité hydraulique).

Slope/w : calcul de la stabilité mécanique des talus.

Sigma/w : analyse la relation contrainte -déformations.

Quake/w : comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme.

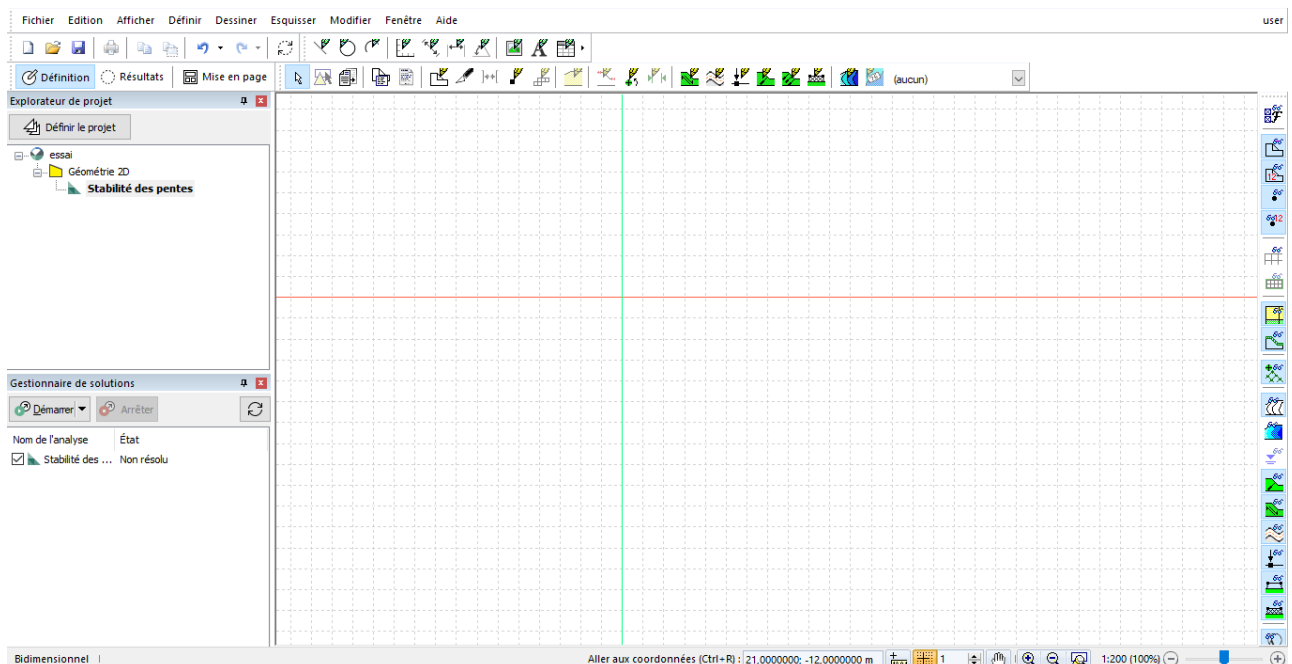


Figure III.1. Interface graphique du logiciel GeoStudio ver 2024

III.2. Le module SLOPE/W

Le module de calcul **SLOPE** est un programme d'analyse de la stabilité des pentes, basée sur de nombreuses méthodes d'analyse différentes :

- Equilibre limite ;
- Contrainte ;
- Contrainte ;
- Déformation de Newmark

III.2.1. Méthode d'analyse en Equilibre limite :

Lors du développement d'une analyse d'équilibre limite, on doit penser en termes de quatre composants principaux :

- Méthode d'analyse ;

Propriétés des matériaux ;

- Modèles de comportement ;
- Géométrie et définition de la surface de glissement.

En outre, le problème peut également inclure des composants secondaires tels que : les pressions interstitielles ; fissures de tension ; Renforcement et autre chargement externe.

A. Pressions interstitielles

Plusieurs options de pression interstitielle peuvent être utilisées dans SLOPE/W (par exemple, ligne piézométrique, têtes d'éléments finis, etc.). Si on prévoit d'inclure les pressions interstitielles dans notre analyse, on doit identifier l'option qui sera utilisée dans l'onglet PWP des analyses.

B. Définition de la surface de glissement

Plusieurs options sont disponibles nous aider à définir la forme et la position des surfaces de glissement de piste. On doit définir l'approche qu'on va utiliser dans l'onglet Surface de glissement des analyses avant de pouvoir l'utiliser dans le modèle.

C. Répartition du facteur de sécurité (FOS)

On peut effectuer une analyse de sensibilité ou exécuter une analyse probabiliste de Monte Carlo dans l'onglet FOS Distribution des analyses.

Le tableau III.1 répertorie les méthodes disponibles dans SLOPE/W et indique quelles équations de statique sont satisfaites pour chacune des méthodes.

Tableau III.1 Équations de statique satisfaites

Méthode	Équilibre des moments	Équilibre des forces
Ordinaire ou Fellenius	Oui	Non
Bishop simplifiée	Oui	Non
Janbu simplifiée	Non	Oui
Spencer	Oui	Oui
Morgenstern-Price	Oui	Non
Janbu généralisée	Oui (par tranches)	Non
Sarma tranches Verticales	Oui	Non

Le tableau III.2 donne un résumé des forces entre les tranches incluses et les hypothèses relations entre le cisaillement inter-tranche et les forces normales.

Tableau III.2 Caractéristiques et relations des forces inter-tranches

Méthode	Équilibre des moments	Équilibre des forces	Forces inter-tranches
Ordinaire ou Fellenius	Non	Non	Aucune force n'inter-tranche
Bishop simplifiée	Oui	Non	Horizontaux
Janbu simplifiée	Oui	Oui	Horizontaux
Spencer	Oui	Oui	Constantes
Morgenstern-Price	Oui	Oui	Variables selon la fonction
Janbu généralisée	Oui	Oui	Ligne de poussée appliquée et équilibre des moments de la tranche
Sarma tranches verticales	Oui	Oui	$X=C+E \cdot \tan \phi$

III.2.2. Méthode ordinaire ou Fellenius

Cette méthode est aussi parfois appelée la méthode suédoise des tranches. Il s'agit de la première méthode de tranches développée et présentée dans la littérature. La simplicité de la méthode a permis de calculer des facteurs de sécurité à l'aide de calculs manuels.

Dans cette méthode, toutes les forces inter-tranches sont ignorées. Le poids de la tranche est résolu en forces parallèles et perpendiculaire à la base de la tranche. La force perpendiculaire à la base de

la tranche est la force normale de base, qui est utilisé pour calculer la résistance au cisaillement disponible. La composante de poids parallèle à la base de la tranche est la force motrice gravitationnelle. La sommation des moments autour d'un point utilisé pour décrire la surface de glissement d'essai est également utilisée pour calculer le facteur de sécurité.

Le facteur de sécurité est la résistance totale au cisaillement disponible le long la surface de glissement divisée par la somme des forces motrices gravitationnelles (cisaillement mobilisé). La forme la plus simple de l'équation du facteur de sécurité ordinaire en l'absence de toute pression interstitielle pour une surface de glissement circulaire est :

$$FS = \frac{\sum [c \beta + N \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} = \frac{\sum S_{resistance}}{\sum S_{mobilized}}$$

Ou c = cohésion, β = longueur de la base de la tranche, N = normale de la base ($W \cos \alpha$), ϕ = angle de frottement, W = poids de la tranche et α = inclinaison de la base de la tranche.

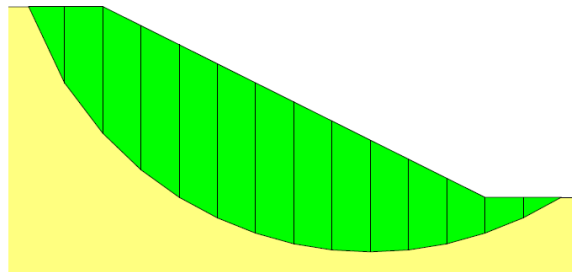


Figure III.2. Méthode des tranches

III.2.3. Méthode simplifiée de Bishop

Dans les années 1950, le professeur Bishop a mis au point une méthode qui comprenait les forces normales, mais a ignoré les forces de cisaillement inter-tranches. Bishop a développé une équation pour la normale a la base de tranche en additionnant les forces de tranche dans la direction verticale. La conséquence de ceci est que la normale de base devient une fonction du facteur de sécurité. Cela rend à son tour l'équation du facteur de sécurité non linéaire (c'est-à-dire que FS apparaît des deux côtés de l'équation) et une procédure itérative est par conséquent nécessaire pour calculer le facteur de sécurité.

Une forme simple de l'équation simplifiée du facteur de sécurité de Bishop en l'absence de pression interstitielle la pression est :

$$FS = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[\frac{c\beta + W \tan \phi - \frac{c\beta}{FS} \sin \alpha \tan \phi}{m_\alpha} \right]$$

FS est des deux côtés de l'équation comme indiqué ci-dessus. L'équation n'est pas différente de l'équation du facteur de sécurité ordinaire, à l'exception du terme m_α , qui est défini comme :

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS}$$

III.2.4. Formes de surface de glissement

La détermination de la position de la surface de glissement critique avec le facteur de sécurité le plus faible reste l'un des problèmes clés dans une analyse de stabilité. Comme cela est bien connu, trouver la surface de glissement critique implique une procédure d'essai.

Une surface de glissement possible est créée et le facteur de sécurité associé est calculé. Ceci est répété pour de nombreuses surfaces de glissement possibles et, à la fin, la surface de glissement d'essai avec le facteur de sécurité le plus faible est considérée la surface de glissement déterminante ou critique.

Il existe de nombreuses façons de définir la forme et les positions des surfaces de glissement d'essai. Ce chapitre explique trois procédures disponibles dans SLOPE/W.

A. Grille et rayon pour les glissements circulaires

Les surfaces de glissement d'essai circulaires étaient inhérentes aux premières formulations d'équilibre limite et aux techniques de spécifier des surfaces de glissement circulaires est devenue ancrée dans ces types d'analyses. La surface de glissement d'essai est un arc de cercle. L'arc est la partie d'un cercle qui coupe la pente. Un cercle peut être défini par en spécifiant la coordonnée x-y du centre et du rayon. Une grande variété de surfaces de glissement d'essai peut être spécifiée avec

une grille définie de centres de cercle et une plage de rayons définis. En SLOPE/W, cette procédure est appelée la méthode Grid and Radius. La figure III.3 montre un exemple typique.

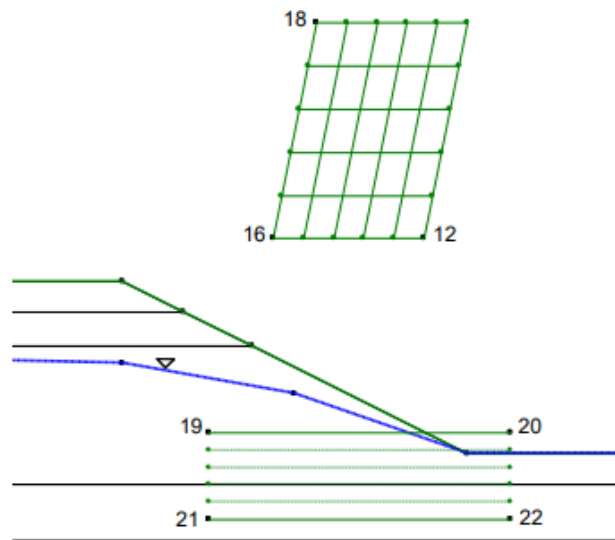


Figure III.3. Définition de la surface de glissement par la méthode de la grille et du rayon
B. Point à rayon unique

La zone de ligne de rayon peut être réduite à un point. Les quatre coins peuvent avoir le même point ou le même x-y coordonner. Si tel est le cas, toutes les surfaces de glissement d'essai passeront par un seul point (Figure III.4). Cette technique est utile lorsqu'on souhaite étudier un mode de rupture particulier, tel que la rupture potentielle par le pied d'un mur.

La grille des centres peut également être réduite à un seul point. Cela permet d'analyser un seul feuillet surface, ce qui peut être très utile pour faire des comparaisons de diverses fonctionnalités ou options.

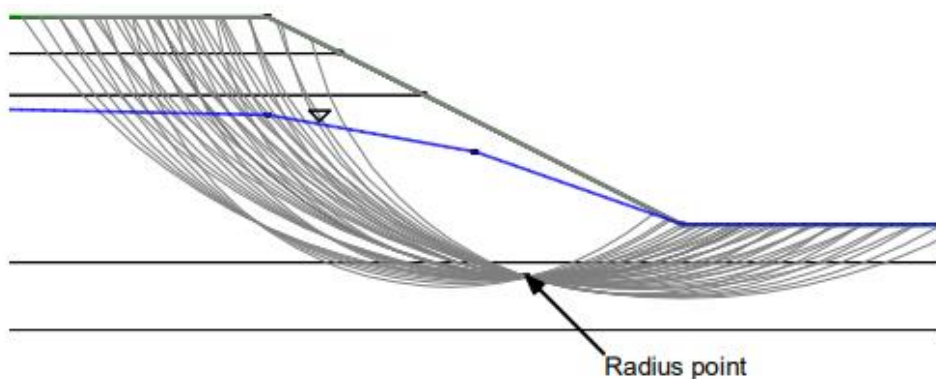


Figure III.4. Toutes les surfaces de glissement passant par un point

C. Spécification d'entrée et de sortie « Entry Exit »

L'une des difficultés de la méthode historique Grid and Radius est qu'il est difficile de visualiser l'étendue et/ou la gamme des surfaces de glissement d'essai. Cette limitation peut être surmontée en spécifiant l'emplacement où les surfaces de glissement d'essai entreraient probablement dans la surface du sol et où elles sortiraient. Cette technique est appelée méthode d'entrée et de sortie dans SLOPE/W. Dans la Figure III.5, il y a deux lignes épaisses (rouges) le long de la surface du sol. Ce sont les domaines où les surfaces de glissement entreraient et sortiraient. Le nombre d'entrées et de sorties peut être spécifié comme le nombre de incréments le long de ces deux lignes.

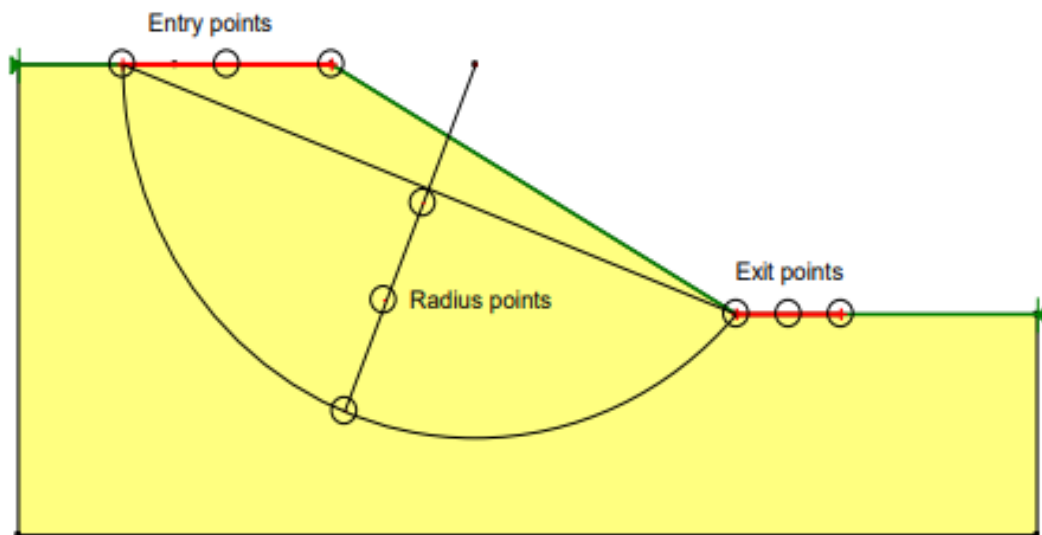


Figure III.5. Schéma de la surface de glissement d'entrée et de sortie

III.3. L'action sismique

On définit des coefficients horizontaux et verticaux représentant une force créée par des accélérations sismiques ou sismiques. SLOPE/W applique les forces sismiques au centre de gravité de chaque tranche égales au poids de la tranche multipliée par les coefficients sismiques.

Figure III.6. Boite d'introduction des coefficients d'accélération sismique

III.4. Affichage des résultats des analyses

Slope/w

On peut visualiser graphiquement les résultats du problème en affichant n'importe laquelle des surfaces de glissement analysées, ainsi que les facteurs de sécurité associés. Par exemple la surface de glissement critique et facteur de sécurité correspondant sont affichés sur la figure III.7.

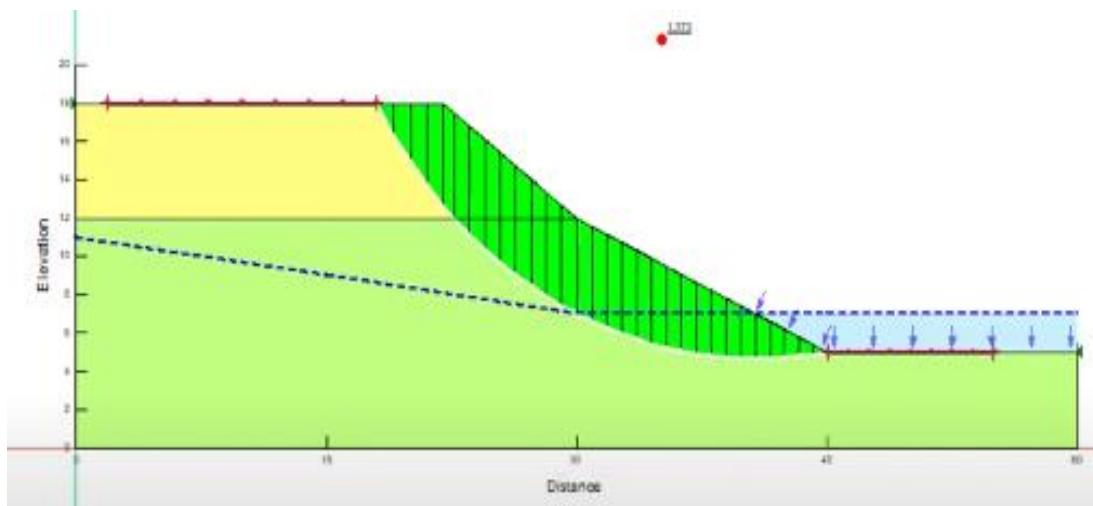


Figure III.7. Surface de glissement critique et facteur de sécurité minimum

SIMULATION NUMERIQUE

QUATRIEME CHAPITRE

MODELISATION NUMERIQUE : STABILITE ET STABILISATION DU TALUS "LES GRANDS VENTS"

Stabilité et stabilisation du talus "les grands vents"

IV.1. Introduction

Notre but est d'examiner les facteurs déclencheurs d'un glissement de terrain survenu dans le parc "les grands vents" à Dely Brahim, wilaya d'Alger. La zone d'étude, présentant des pentes inclinées (10° à 40°), est vulnérable aux instabilités du sol en raison de conditions géologiques (marnes, sensibles à l'hydratation), morphologiques (topographie), climatiques (pluviométrie élevée, activité sismique) et anthropiques (eaux de ruissellement et usées non canalisées). Ces éléments concourent à la saturation des terrains, augmentant le risque de glissement.

IV.2. Présentation du projet

IV.2.1. Situation géographique de la région d'étude

Le terrain étudié est situé selon les coordonnées géographiques repérées sur la figure IV.1.

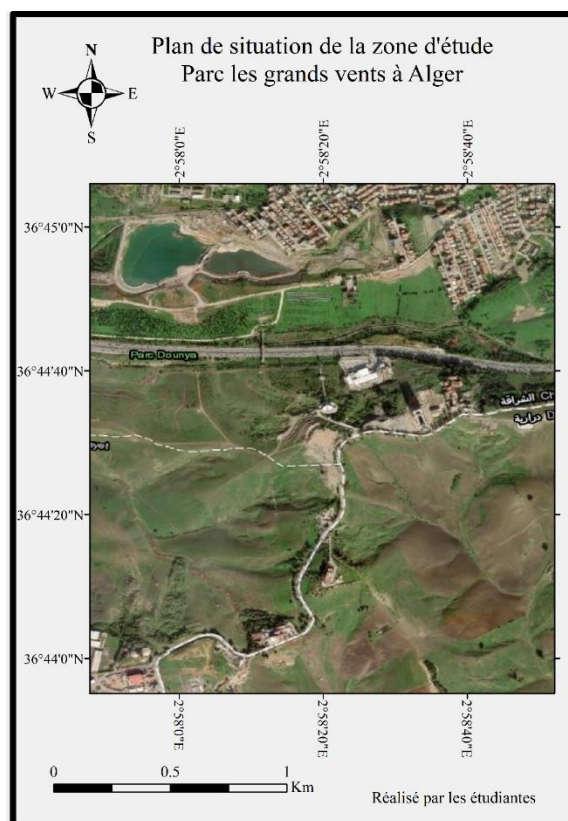


Figure IV. 1. Situation géographique de la zone d'étude

IV.2.2. Cadre géologique

La zone repose sur des **marnes**, très sensibles à l'eau et sujettes à l'altération. En surface, ces marnes sont friables et terreuses, tandis qu'en profondeur (à partir de 10 m), elles deviennent compactes et stables.

Les glissements se produisent principalement dans les couches altérées, surtout lorsque les pentes dépassent 10 %.

La figure IV.2, extraite de la carte géologique de Chéraga, schématise les glissements dans le sahel.

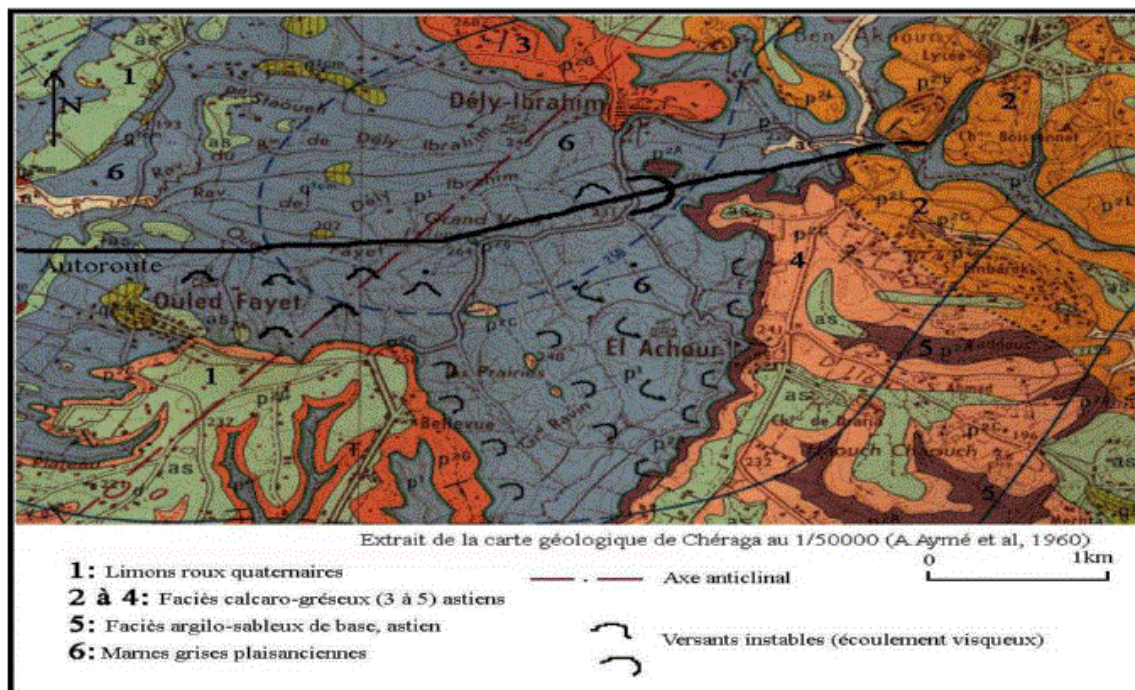


Figure IV. 2. Extrait de la carte géologique de Chéraga

IV.2.3. Cadre hydrogéologique

1. Les eaux souterraines et de surface contribuent à la saturation des sols, surtout après des pluies torrentielles.
2. Les eaux de ruissellement et les eaux usées, non drainées, s'infiltrent dans les talus marneux, augmentant leur instabilité.

IV.2.4. Aperçu climatologique

La région connaît une **forte pluviométrie**, avec des précipitations mensuelles allant jusqu'à 160 mm en novembre (période 2001-2010). Ces pluies intensifient l'érosion et la saturation des sols.

IV.2.5. Aperçu sismique

La zone est classée en **Zone VI** selon les règles parasismiques algériennes (RPA2024), avec un coefficient d'accélération de **0,30 g**. Cette activité sismique accroît les risques d'instabilité.

Les analyses les plus fiables sont effectuées en contraintes effectives, c'est-à-dire en prenant comme caractéristiques de résistance des sols les propriétés intrinsèques obtenues avec des essais drainés. Les coefficients sismiques horizontal (k_h) et vertical (k_v) correspondants sont définis dans le tableau IV.1.

Tableau IV. 1. Valeurs des coefficients sismiques adoptés

A	I	S	K_h	K_v
0,3000	1,40	1,35	0,1890	0,0945

IV.2.6. Etats des lieux

Observations sur le terrain :

- **Affaissements** et **fissures** sur les routes et les talus.
- **Déformation** et **arrachement** des couches de remblai.
- **Rupture** des ouvrages de soutènement existants.
- Présence de **bourrelets de glissement** et de marnes altérées en surface.

IV.2.7. Causes probables du glissement

Causes principales du glissement :

- **Géotechniques** : Sensibilité des marnes à l'eau.
- **Morphologiques** : Pentes importantes favorisant les mouvements de terrain.
- **Climatiques** : Fortes précipitations et saturation des sols.
- **Anthropiques** : Absence de drainage et déversement sauvage des eaux usées.

IV.3. Analyse de la stabilité d'un talus ayant glissé

L'étude géotechnique du site de Dounia Park a combiné des investigations bibliographiques, des essais in situ (sondages, préssiométriques, pénétration dynamique) implantés comme le montre la figure IV.5.

- 8 essais de pénétration dynamique.
- 3 sondages préssiométriques (12–14 m).
- 11 sondages carottés (10–20 m), dont 7 équipés de piézomètres.
- 5 puits de reconnaissance (jusqu'à 4 m).

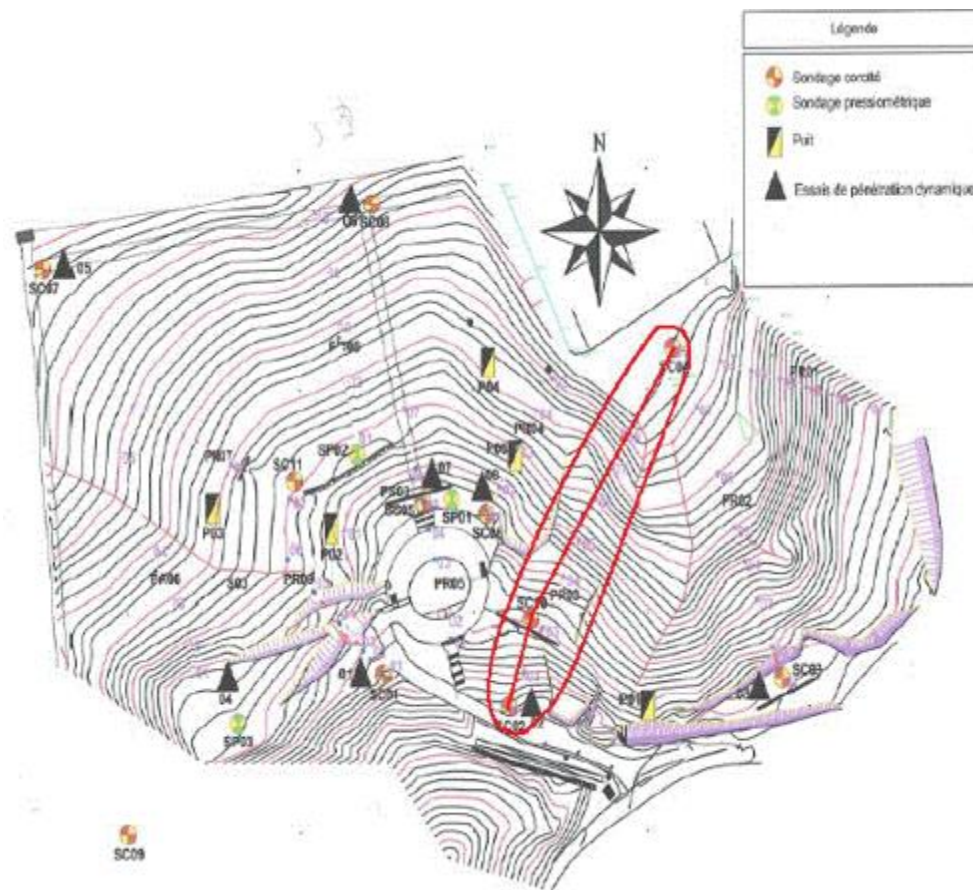


Tableau IV. 2. Caractéristiques mécaniques des couches de sols

Couche	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Remblai	16.5	22	8
Argile marneuse altérée	20.47	32	11
Argile marneuse compacte	20.08	126.4	14

Piézométrie

Niveau d'eau saturée à 0,3–0,5 m, sauf dans SC02 (10 m), probablement dû à des fissures dans la marne altérée.

IV.3.1. Profil géotechnique retenu

Le profil géotechnique retenu pour notre étude, obtenu à partir des sondages SC2, SC10 et SC4 (pente de 19,22°, Fig. IV.6), est composé de trois formations : une couche supérieure de remblai, une couche intermédiaire d'argile marneuse altérée et une couche inférieure d'argile marneuse compacte (dont les caractéristiques de cisaillement sont détaillées au tableau IV.1).

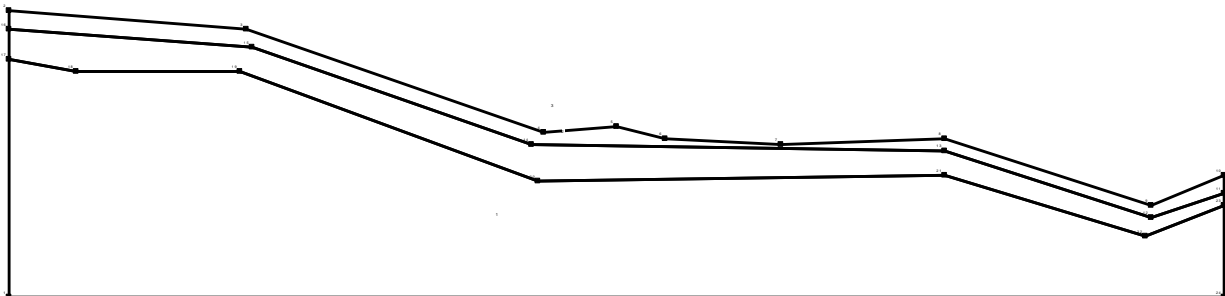


Figure IV. 4. Profil géotechnique retenu

Analyse de la stabilité par le logiciel Slope

Quatre analyses de stabilité du versant ont été menées à l'aide du module Slope/W de GeoStudio et des méthodes des tranches (Fellenius, Bishop, Spencer) :

- (1) talus naturel (poids propre) ;
- (2) talus naturel + séisme ;
- (3) talus naturel + nappe d'eau ;
- Et (4) talus naturel saturé.

IV.3.2. Calcul de la stabilité du talus sous l'effet du poids propre

À titre d'exemple pour le premier calcul, la valeur du facteur de sécurité selon la méthode de Fellenius est de 1,794.

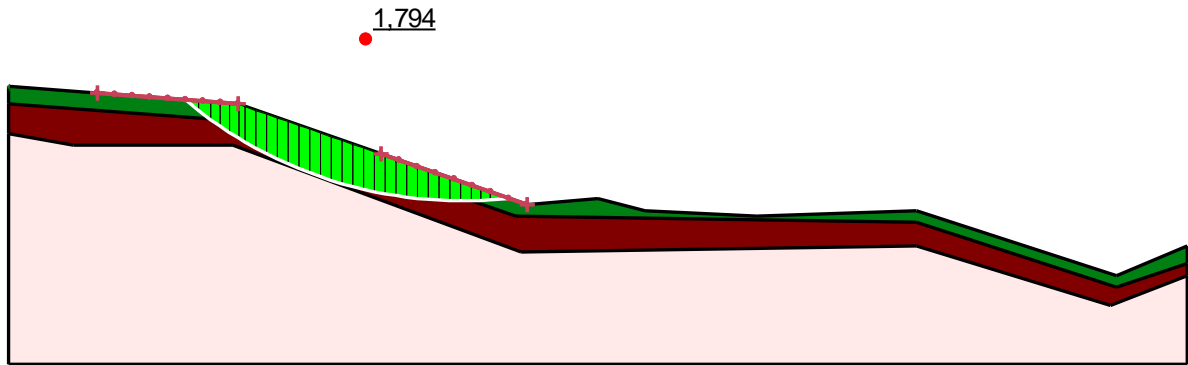


Figure IV. 5. Valeur du Facteur de sécurité du talus sous poids propre - méthode de Fellenius
Sous Poids propre le talus est stable selon les trois méthodes implémentées dans le logiciel GeoSlope à savoir Fellenius, Bishop et Spencer, comme encadré dans le tableau IV.3.

Tableau IV. 3. Valeurs du facteur de sécurité sous Poids propre.

Méthode	Fellenius	Bishop	Spencer
Valeur de FS	1,794	1,816	1,814

IV.3.3. Calcul de la stabilité du talus sous l'effet du poids propre et du séisme de zone

Les coefficients pseudo-statiques horizontal et vertical pris en compte dans le calcul de stabilité sont données sur la fenêtre suivante (figure IV.6).

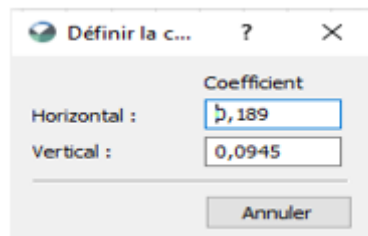


Figure IV. 6. Coefficients pseudo-statiques horizontal et vertical pris en compte

La figure IV.7 présente la valeur du facteur de sécurité du talus naturel sous séisme, calculée par la méthode de Spencer.

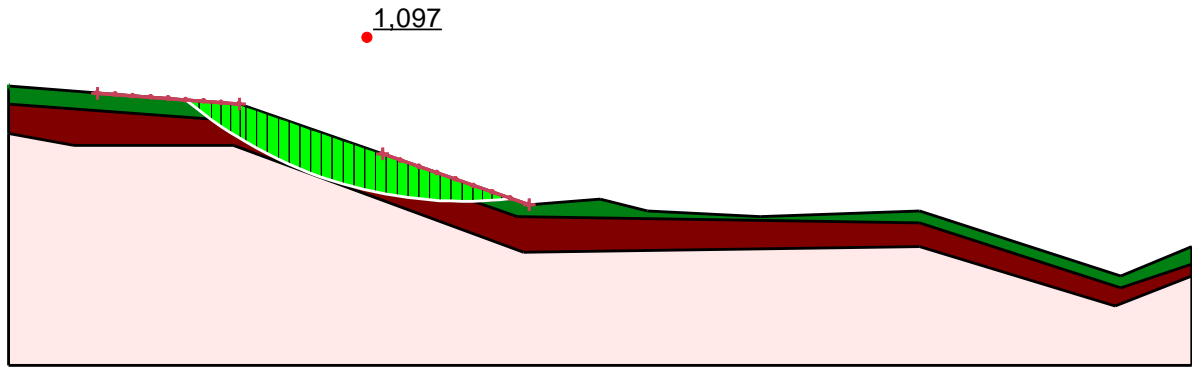


Figure IV. 7. FS du talus en présence du séisme de zone par la méthode de Spencer

IV.3.4. Calcul de la stabilité du talus sous l'effet d'une nappe

Nous avons défini une nappe phréatique par 3 points dont les coordonnées sont encadrées dans le tableau IV.4.

Tableau IV. 4. Coordonnée de la nappe phréatique

Points	X(m)	Y(m)
1	0	41
2	39	39
3	88	22
4	154	21
5	187	11
6	200	10

La figure IV.8 présente la valeur du facteur de sécurité du talus naturel sous la nappe définie précédemment, calculée par la méthode de Spencer.

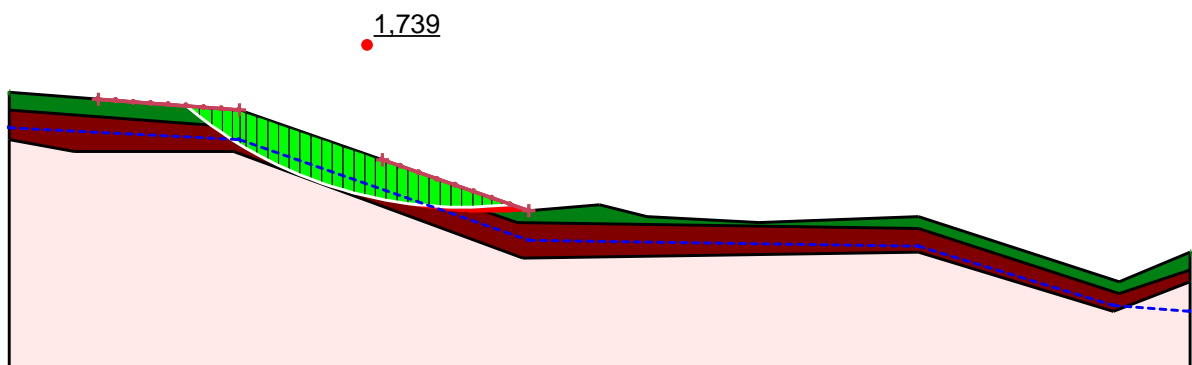


Figure IV. 8. FS du talus en présence d'une nappe phréatique prédéfinie (méthode de Spencer)

IV.3.5. Analyse de la stabilité d'un talus en condition de saturation totale.

Compte tenu de la localisation de la région au nord de l'Algérie, à proximité de la mer Méditerranée, et des fortes précipitations ayant précédé le glissement, l'effet de la nappe phréatique est fortement suspecté d'être le facteur déclenchant principal.

La figure IV.9 présente la valeur du facteur de sécurité du talus totalement saturé, calculée par la méthode de Spencer.

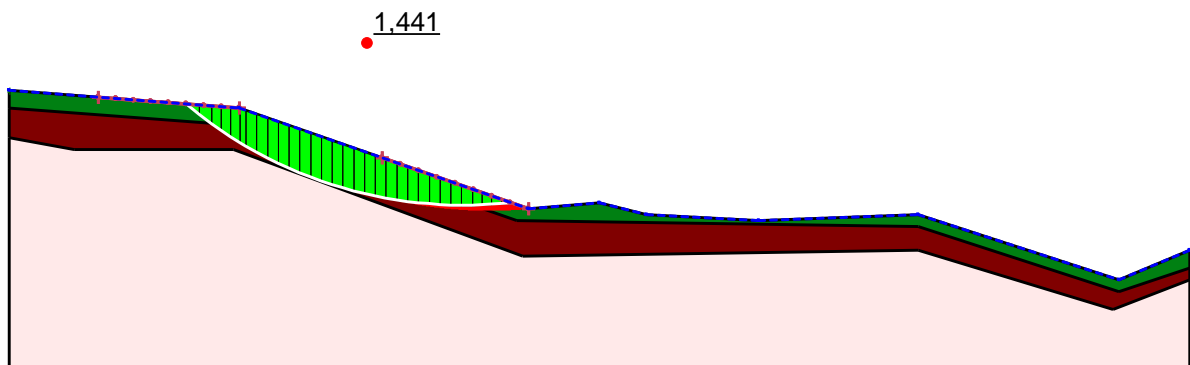


Figure IV. 9. Valeur du facteur de sécurité du talus totalement saturé (méthode de Spencer)
Afin d'observer l'effet d'une saturation totale simultanée à un événement accidentel tel qu'un séisme, un calcul a été réalisé, malgré la rareté de cette situation. La valeur du facteur de sécurité dans ce cas est de 0,874, donc le talus devient instable (figure IV.10).

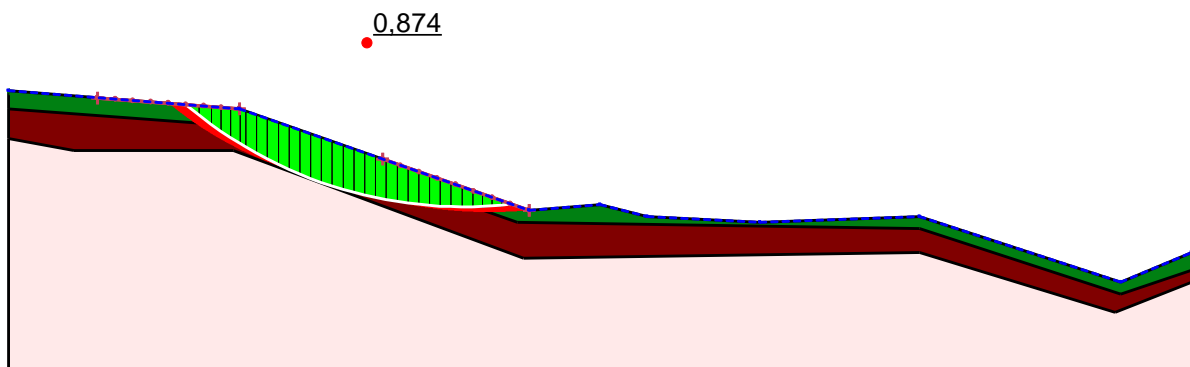


Figure IV. 10. Valeur du FS du talus totalement saturé et sous séisme (méthode de Spencer)
Les facteurs de sécurité du talus analysé sous différentes charges, calculés par trois méthodes d'équilibre limite, sont synthétisés dans le tableau IV.5.

Tableau IV. 5. Récapitulation des valeurs du facteur de sécurité pour différents cas de charge

Type de Chargement	Méthode de calcul		
	Fellenius	Bishop	Spencer
Poids propre G	1,794	1,816	1,814
G + séisme	1 ,083	1,099	1,097
G + Nappe d'eau	1,727	1,720	1,739
G + Saturation totale	1.464	1.442	1.441
G + Saturation totale +séisme	0,886	0.877	0.874

Sur la base des valeurs des facteurs de sécurité obtenus pour le talus analysé sous diverses charges à l'aide de trois méthodes d'équilibre limite, il est constaté que l'effet des vibrations, qu'elles soient d'origine sismique ou dues à d'importants travaux à proximité, constitue le principal facteur déclencheur du glissement de terrain observé au parc les grands vents.

IV.4. Confortement d'un talus ayant glissé

Notre étude a révélé que le talus se situe à la limite de la stabilité sous l'effet d'un séisme, rendant un renforcement indispensable. Dans cette optique, et afin de mettre en œuvre les principes de la géotechnique appris à l'université de Msila, tout en utilisant les ressources logicielles du CTC de Msila, nous avons retenu deux solutions de renforcement : le clouage et la réalisation d'un mur de soutènement.

IV.4.1. Confortement du talus par clouage

La figure IV.11 présente les caractéristiques techniques et les paramètres utilisés

Renforcement affecté		New Reinforcen	
Nom		New Reinforcen	
Couleur			
Type		Clou	
Résistance à l'arrachement		100 kPa	
Facteur de réduction de la résistance à l'arrachement	1,5		
Capacité en traction		400 kN	
Facteur de réduction de la capacité en traction	2		
Force de cisaillement		0 kN	
Facteur de réduction de la force de cisaillement	1		
Option de cisaillement		Parallèlement à	
Dépendant du FS		Non	
Répartition de la force		Distribué	
Diamètre de liaison		0,31831 m	
Espacement hors-plan		2 m	
Ancrage de face		Oui	
Résistance à l'arrachement pondérée		33,333 kN/m/n	

Force de cisaillement	0 kN
Facteur de réduction de la force de 1	
Option de cisaillement	Parallèlement à la surface de gliss
Dépendant du FS	Non
Répartition de la force	Distribué
Diamètre de liaison	0,31831 m
Espacement hors-plan	2 m
Ancrage de face	Oui
Résistance à l'arrachement pondérée	33,333 kN/m/m
Force de cisaillement appliquée	0 kN
Capacité en traction pondérée	100 kN/m
Verouiller à la surface du sol	Non
Point extérieur	(18,5; 18) m
Point intérieur	(10,5; 16) m
Longueur	8,2462113 m
Orientation	-165,96 °
Force d'arrachement max.	100 kN

Figure IV. 11. les caractéristiques techniques

La figure IV.12 présente la valeur du facteur de sécurité du talus naturel sous séisme, après renforcement avec des clous, calculée par la méthode de Spencer.

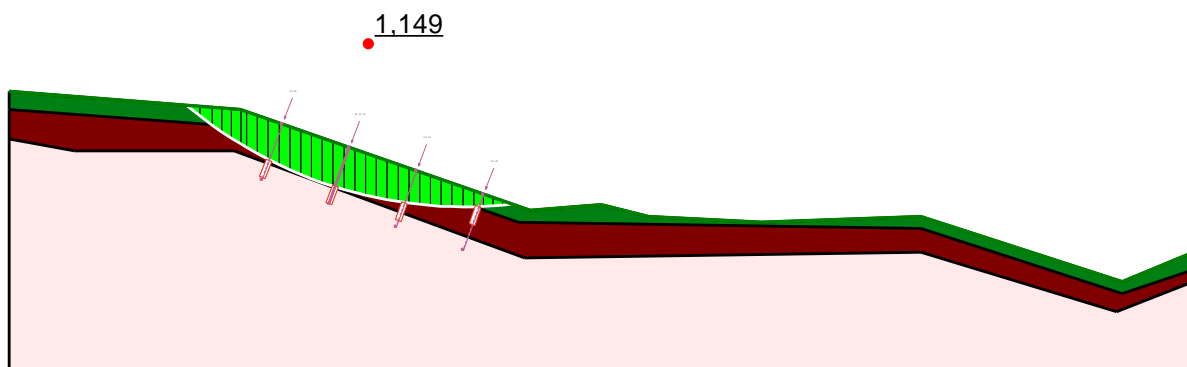


Figure IV. 12. FS du talus en présence du séisme après renforcement par clous

IV.4.3. Confortement du talus mur de soutènement

La figure IV.13 présente la valeur du facteur de sécurité du talus naturel sous séisme, après renforcement avec mur de soutènement, calculée par la méthode de Spencer

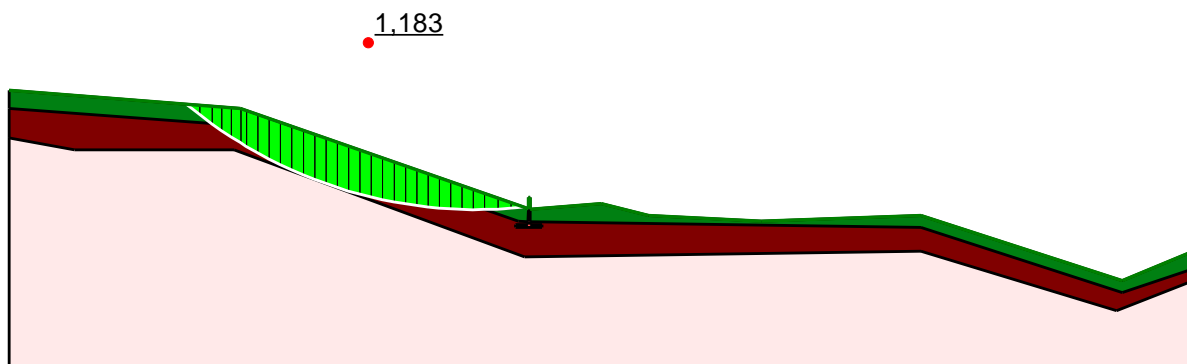


Figure IV.13. FS du talus en présence du séisme après renforcement par mur

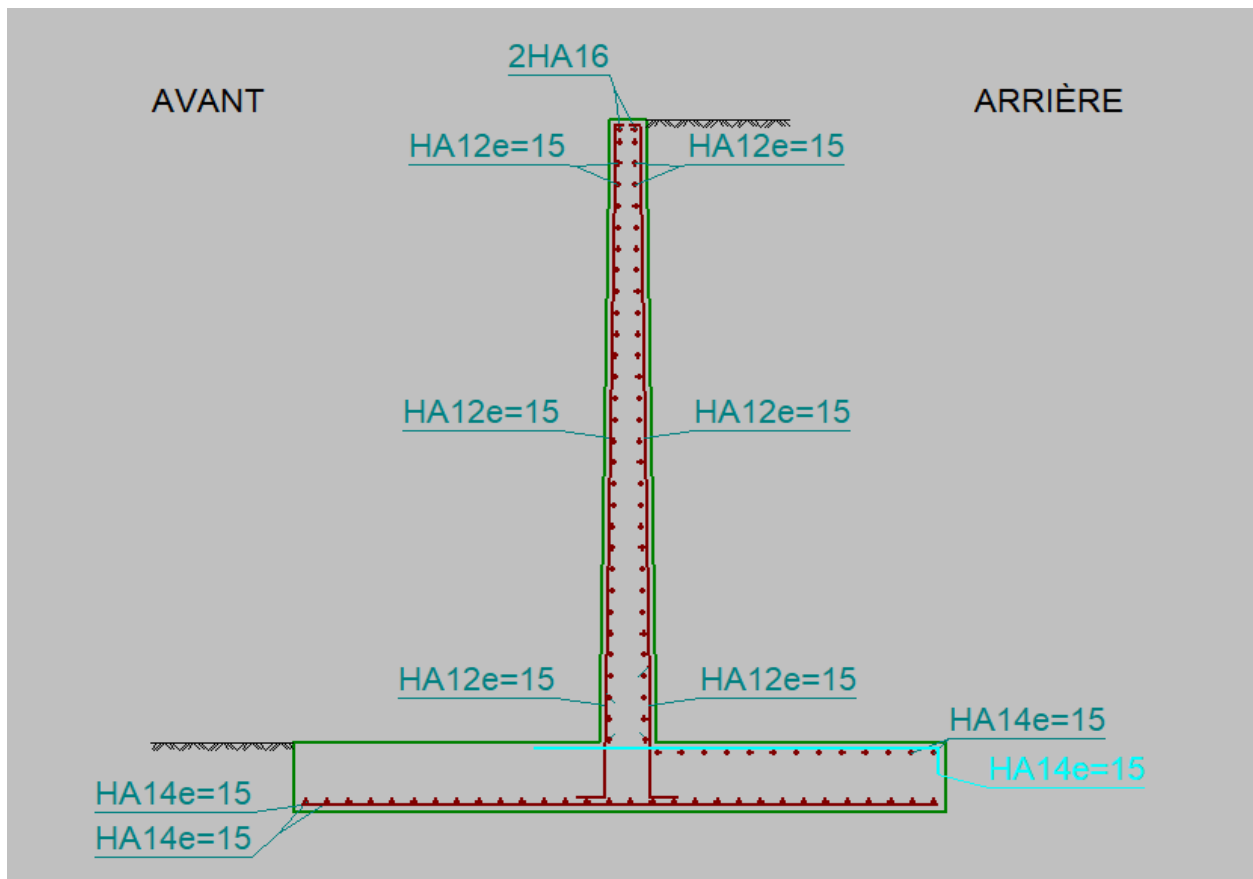


Figure IV.15. Le schéma d'armature d'un mur de soutènement

IV.4.4. Vérification de la stabilité du mur de soutènement

Coefficient de sécurité au renversement : Est représenté la résistance du mur contre la rotation autour de sa base.

Coefficient de sécurité au glissement : Ce coefficient évalue la capacité du mur à résister aux forces horizontales sans se déplacer.

Tableau IV. 7. Valeurs du Coefficient de sécurité sans et avec séisme

Coefficient de sécurité	Sans séisme	Avec séisme
Renversement	1,8	1,2
Glissement	1,5	1,2

Après calcul, le mur est stable avec une sécurité supérieure à celle autorisée.

IV.4.5. Comparaison des deux solutions de confortement du talus

Le clouage a permis une amélioration du facteur de sécurité au glissement de 5 %, tandis que le mur de soutènement, a amélioré de 8% le FS.

IV.5. Synthèse

Le Parc Dounia est menacé par des glissements de terrain dus à des sols marneux instables, aux pluies abondantes et à l'activité sismique. Le facteur de sécurité sismique ($FS = 1,097$) est insuffisant. Le clouage a permis une amélioration de 5 % du FS, et un mur de soutènement, de 8%.

Conclusion Générale

La stabilité des talus et leur risque de rupture deviennent préoccupants lorsque les mouvements de terrain menacent les populations et les infrastructures. Pour y remédier, il est indispensable de trouver des systèmes de prévention adaptés.

Les méthodes traditionnelles de traitement de la stabilité des talus reposent sur des approches statiques simples, qui ne tiennent pas compte des discontinuités ni de l'hétérogénéité du sol. Les progrès récents en informatique et calcul numérique (calcul en équilibre limite, méthodes des différences finies et des éléments finis) permettent une meilleure compréhension du problème et fournissent des résultats plus précis.

Ce mémoire présente un travail modeste sur les glissements de terrain, offrant un aperçu des méthodes d'analyse et des systèmes de prévention existants.

La classification des glissements et leurs méthodes d'analyse ont suscité de nombreuses réflexions, aboutissant à une diversité de critères et hypothèses. Cependant, l'objectif reste unique : trouver la meilleure solution adaptée à chaque cas.

Cette étude porte sur la stabilité d'un glissement au parc « Les Grands Vents » à Delly Brahim, Wilaya d'Alger. Elle comprend plusieurs étapes :

- Étude géologique et géotechnique,
- Étude de stabilité.

Étant donné la complexité de la stabilité des pentes, l'usage d'outils numériques de simulation est nécessaire. Pour notre étude, nous avons utilisé GEOSLOPE 2024, basé sur la méthode d'équilibre limite.

Les résultats de la modélisation montrent que :

- Sous séisme, le facteur de sécurité (FS) est de 1,097, inférieur à la valeur requise ;
- La stabilisation par clouage a permis d'augmenter le FS de 5 % ;
- La construction d'un mur de soutènement a permis une augmentation de 8 %.

Références Bibliographique

- Amali, A. (2016). *Contribution à l'étude numérique de la stabilité des barrages en remblai renforcés par des géosynthétiques cas du barrage Ouled Abdelouahab, Sidi Aissa, M'sila.*
- Amirouche, C. (2015). *Analyse fiabiliste de la stabilité au glissement d'une digue de retenue collinaire, mémoire de master en géotechnique et environnement.* UMMTO.
- Bachir, B. (2017). *GeoStudio, Vérification de la Stabilité du Terrain de POS Serkina–Constantine (Méthodes Analytiques) Code*.*
- Bonelli, S. (2021). *Ouvrages hydrauliques en remblai: un regard transversal sur l'action de l'eau. Ingénieries eau-agriculture-territoires.*
- Castanier, G. (2010). Le glissement de Vajont, ses enseignements et ses retombées pour EDF et les exploitants de barrages. *Revue française de Géotechnique*, (131-132), 53-63.
- Charrier, G. (2015). *Etude expérimentale des ruptures de digues fluviales par surverse (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).*
- Chourouk, S. (2022, Ammar, Leila., & Filali Marzouk Modélisation d'une digue en terre avec le logiciel, FLAC 2D, Sous Différents Paramètres Influent, 2020). *Etude D'une Retenue Collinaire sur Oued Maghraoua Commune L'outaya wilaya de BISKRA-Etudes des variantes des digues.*
- Degoutt, G. (2002). *Petits barrages, Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi.* Cemagref.
- Fouad, B. &. (2018). *ANALYSE DE L'EFFET DES INFILTRATIONS SUR LA STABILITE D'UN BARRAGE EN TERRE (Application au cas du barrage de Soubella-wilaya de Msila).* Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
- Hariz, Y. &. (2022). *Effet des drains sur la stabilité des barrages en terre cas des barrages Boubrik et El-haïmeur (wilaya de Ghardaïa) (Doctoral dissertation, université Ghardaïa).*
- <http://www.geo-slope.com/>. (s.d.).
- <https://www.planete-tp.com/barrages-r12.html>. (s.d.).
- <https://www.universalis.fr/encyclopedie/barrages/5-les-barrages-en-materiaux-meubles-ou-semi-rigides/>. (s.d.). Récupéré sur <https://www.universalis.fr/encyclopedie/barrages/5-les-barrages-en-materiaux-meubles-ou-semi-rigides/>
- LAOUEDJ, S. (2002). *ANALYSE DES DEFORMATIONS DES BARRAGES A NOYAU CENTRALE (Doctoral dissertation).*
- Larouzée, J. D. (2014). La catastrophe du barrage de Malpasset à l'épreuve des facteurs organisationnel et humain. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014*, (pp. (pp. 10-pages)).

- Le Delliou, P. (2003). *Les barrages: conception et maintenance*. Presses Universitaires Lyon.
- Le Delliou, P. (2003). *Les barrages: conception et maintenance*. Presses Universitaires Lyon.
- LEHBAB. (s.d.). *Polycopié de cours, Les barrages en remblai de terre*. USTO Mohamed BOUDIAF, oran.
- LEHBAB, Z. (2019). *Les barrages en remblai de terre*. USTO Mohamed Boudiaf Oran.
- LHC, unité Djelfa. (2006). *Etude de sol d'une retenue collinaire sur oued Abdelouahab*.
- Lino, M. M. (1970). *Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne*.
- Megoura A. et Mekki Y. (2009). *Etude de faisabilité et d'exécution d'un petit barrage Ouled Abdelouahab*. université de Msila.
- MEKERBI, M. &. (2009). *liquéfaction des sols*. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Messaoud, B. (2016). *Etude de stabilité d'un barrage en terre à zones Cas barrage AIN ZADA, BB Arreridj*. (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- P, D. (2003). *Les barrages : Conception et maintenance*. Presses.
- PNUD/OPE. (1987). *Guide maghrébin pour l'exécution des études et travaux de retenues collinaires, Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord (projet RAB/80/011)*.
- RECKING, A. &. (2002). *MODELISATION DE LA RUPTURE DES DIGUES ET BARRAGES EN TERRE Approche théorique et étude d'un cas test*.
- Riffon, O. (2005). *Étude en laboratoire sur la migration des particules fines lors d'essais de perméabilité sur des sables et des silts*. École Polytechnique de Montréal.
- Rodríguez, B. A. (2004). *Manuel de conception et projets typiques des digues en terre*.
- Rodriguez, B. A. (2004). *Manuel de conception et projets typiques des digues en terre, Procédures méthodologiques pour l'exécution des études des retenues collinaires et petits barrages*.
- Seddiki, A. &. (2021). Analyse des effets d'infiltrations sur la stabilité des barrages en terre (Cas du barrage Soubella, commune de Magra, wilaya de M'sila). *The Second International Conference on Civil Engineering ICCE'2020*.
- SEDDIKI, A. (2020). *Prise en compte de l'action sismique dans les études de stabilité et de renforcement des pentes* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- SERIFEG Fella, L. K. (2020). *Etude du Bilan hydrologique du barrage Ain Zada–Bordj Bou Arreridj* (Doctoral dissertation).

