Khaled Taghouti and Arbi Chafai
Stabilité d'une retenue collinaire en terre : équilibre limite (SLOPE/W) et éléments finis (SIGMA/W). Cas de l'oued Souani (Siliana, Tunisie)
International Journal Water Sciences and Environment Technologies
Vol. (xi), Issue 3, December 2026, pp. 6-11
e-ISSN: 1737-9350 p-ISSN: 1737-6688, | Open Access Journal |
www.jiste.org
Scientific Press International Limited
Received: June 2026 / Revised: August 2026 / Accepted: October 2026 / Published: December 2026

Stabilité d'une retenue collinaire en terre : équilibre limite (SLOPE/W) et éléments finis (SIGMA/W). Cas de l'oued Souani (Siliana, Tunisie)

Khaled Taghouti [1] and Arbi Chafai

1 Département de Génie Civil, Institut Supérieur des Études Technologiques de Siliana, Tunisie. Tél. : +216 97 519 101, E-mail :

2 Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 2092, Tunisie.

Résumé

La stabilité des talus d'une retenue collinaire en terre de 8 m de hauteur (oued Souani, Rouhia, Siliana) est étudiée dans GeoStudio par l'équilibre limite (SLOPE/W : Bishop, Morgenstern-Price) et par les éléments finis (SIGMA/W : facteur de sécurité par les contraintes, puis réduction de résistance). Deux modèles de même géométrie sont comparés : court terme (c' = 51 kPa, φ' = 15°) et long terme (c' = 33 kPa, φ' = 11°) pour le corps de digue. Tous les facteurs de sécurité dépassent les seuils usuels ; le minimum (2,02) correspond à un glissement superficiel de 1 m³/m à l'amont. À l'aval, les deux méthodes concordent à 2–3 % (3,56 contre 3,68 à court terme ; 2,52 contre 2,57 à long terme). À l'amont, l'écart apparent tient à des surfaces critiques différentes : sur la même surface, l'équilibre limite s'écarte des éléments finis de 3 % (court terme) et 10 % (long terme). Le long terme coûte environ 30 % de facteur de sécurité à l'aval.

Mots clés : retenue collinaire, stabilité des talus, équilibre limite, éléments finis, SLOPE/W, SIGMA/W, vidange rapide

Stability of an earth hill-lake dam: limit equilibrium (SLOPE/W) versus finite elements (SIGMA/W). Case of the Souani wadi (Siliana, Tunisia)

Abstract

The slope stability of an 8 m high earth hill-lake dam (Souani wadi, Rouhia, Siliana) is investigated in GeoStudio with limit equilibrium (SLOPE/W: Bishop, Morgenstern-Price) and finite elements (SIGMA/W: stress-based factor of safety, then strength reduction). Two models with the same geometry are compared: short-term (c' = 51 kPa, φ' = 15°) and long-term (c' = 33 kPa, φ' = 11°) strength of the embankment body. All factors of safety exceed the usual thresholds; the minimum (2.02) is a shallow 1 m³/m slide on the upstream face. Downstream, the two methods agree within 2–3% (3.56 vs 3.68 short-term; 2.52 vs 2.57 long-term). Upstream, the apparent gap results from different critical surfaces: on the same surface, limit equilibrium differs from finite elements by 3% (short-term) and 10% (long-term). Long-term parameters cost about 30% of the downstream factor of safety.

Keywords: hill-lake dam, slope stability, limit equilibrium, finite elements, SLOPE/W, SIGMA/W, rapid drawdown

1 Corresponding author: Khaltag@hotmail.fr

1. INTRODUCTION

Les lacs collinaires sont devenus en Tunisie un outil courant de mobilisation des eaux de ruissellement et de conservation des eaux et du sol : on en dénombrait 607 en 2000, avec des digues en terre d'une dizaine de mètres de hauteur [1]. Leur sécurité repose en grande partie sur la stabilité des talus, vérifiée dans la pratique par l'équilibre limite (méthode des tranches), avec les méthodes de Bishop [2] et de Morgenstern et Price [3].
Cette approche impose la surface de rupture et des hypothèses sur les forces entre tranches, et ignore les déformations [4,5]. Les éléments finis lèvent ces limites : le facteur de sécurité est calculé à partir des contraintes [5] ou obtenu par réduction progressive de la résistance jusqu'à la rupture [6–8]. Peu d'études comparent ces approches sur de petites digues zonées, soumises au régime permanent et à la vidange.
Cet article compare les deux approches sur la digue de l'oued Souani, pour deux jeux de paramètres de résistance du corps de digue (court et long terme), et pose trois questions : (i) les méthodes donnent-elles le même facteur de sécurité ? (ii) que coûte la baisse de résistance du court au long terme ? (iii) que faut-il rapporter dans une note de calcul ?

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. *Site d'étude*

La retenue du lac collinaire de l'Oued Souani est située dans la zone de Martoum, relevant du secteur d'Esmirat-Nord, dans la délégation de Rouhia, gouvernorat de Siliana. Elle se trouve à environ 15 km du chef-lieu de la délégation (Figure 3.2). Le bassin versant de l'Oued Souani présente une forme allongée, orientée globalement selon une direction Est–Ouest, et couvre une superficie totale de 1,96 km².
La digue du lac collinaire est localisée aux coordonnées projetées suivantes : X = 512 895,06 m et Y = 3 952 030,62 m, relevées sur la carte topographique de Djebel Barbrou à l'échelle du 1/50 000

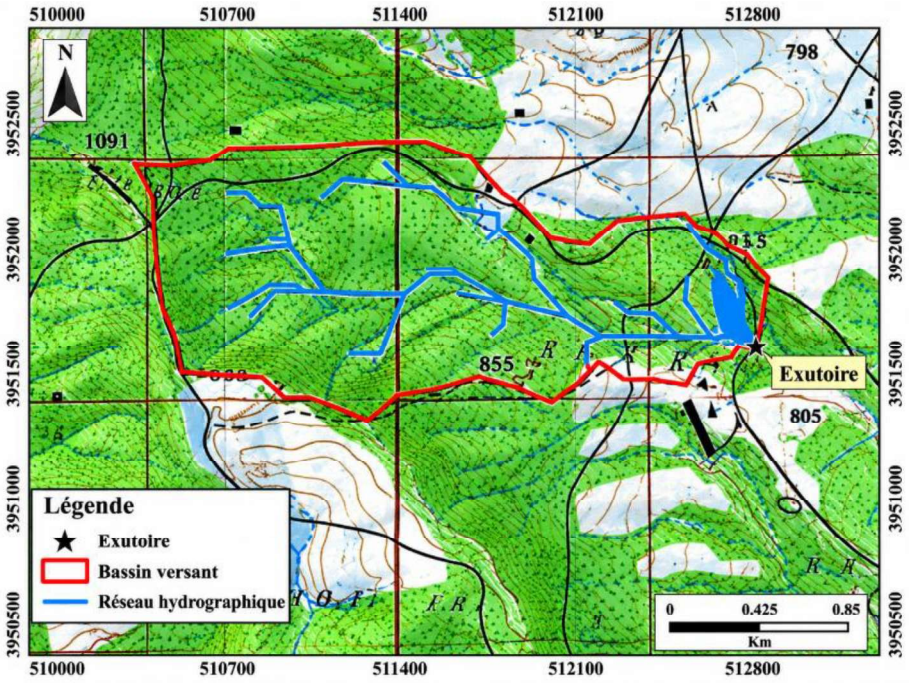

Fig. 1 – Localisation du bassin versant de l'oued Souani

Dans ce bassin, nous avons pu identifier quatre unités lithologiques présentées sur la carte géologique du bassin d'oued Souani (Fig.2). Il est formé dans sa quasi-totalité de matériaux du Crétacé. Ces séries géologiques sont recoupées par une série des failles de direction NW-SE et N-S. En effet, on distingue, respectivement du plus ancien au plus récent:

- Cce : Cénomanien : formé par des marnes vertes à intercalations calcaires.
- Ct : Cénomanien supérieur-Turonien basal : formé par des calcaires feuilletés riches en matière organique de la formation Bahloul.

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

- Ct-Co : Turonien-coniacien : formé par des marnes et des calcaires de la formation Kef inférieur couvrant 58 % de la superficie du bassin versant.
- El : Lutétien inferieur à moyen : formé par des argiles lumachelliques et des calcaires.

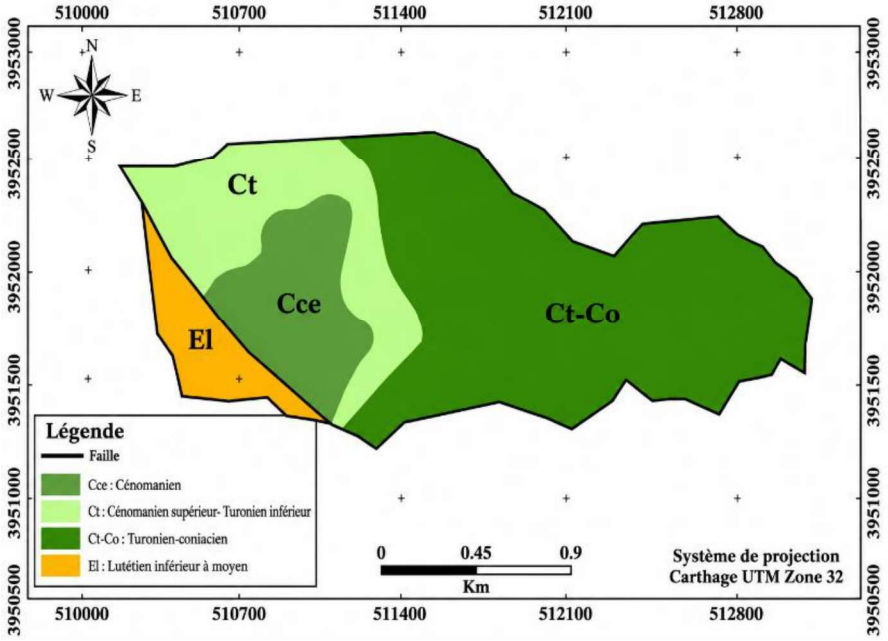

Fig. 2 – Carte géologique du basin versant d'oued Souani

La digue modélisée mesure 8 m de hauteur (cotes 790 à 798 m) et 4 m en crête ; le plan d'eau normal est à 796,5 m (revanche de 1,5 m). Les pentes sont d'environ 3H/1V à l'amont, protégé par une couche granulaire, et 2,5H/1V à l'aval, qui comporte un drain de pied. Une clé d'étanchéité de 3 m traverse la fondation (Fig. 3), modélisée jusqu'à la cote 775 m. Le maillage compte environ 2 650 nœuds. Les matériaux suivent le critère de Mohr-Coulomb en contraintes effectives (Tableau 1) ; les fonctions hydrauliques de la fondation et du corps sont de type Van Genuchten [9].

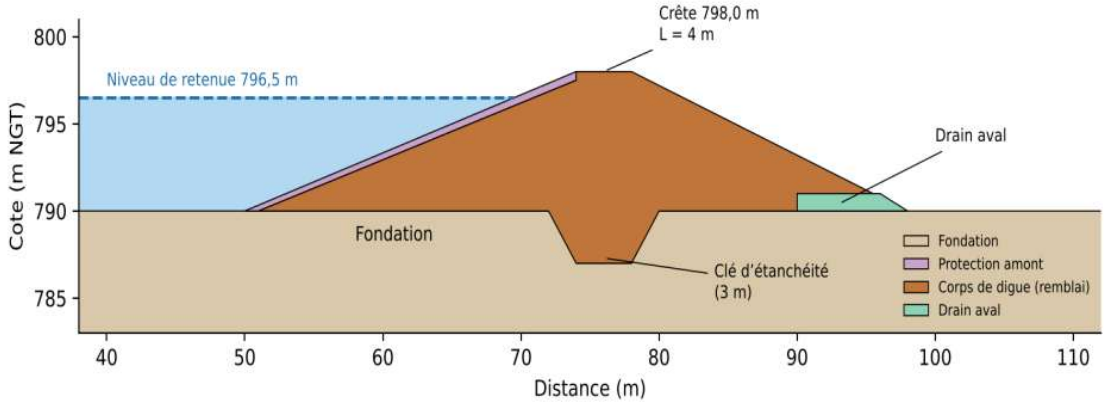

Fig. 3 – Coupe de la digue modélisée (cotes en m).

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

Tableau 1 – Paramètres des matériaux. Seul le corps de digue diffère entre les modèles court terme (CT) et long terme (LT).

Matériau	□(kN/m³)	c□(kPa)	□□(°)	E□(kPa)	□□	k sat (m/s)
Fondation	18	29,5	40	100 000	0,30	1×10□□
Corps de digue, CT	17,2	51	15	5 000	0,33	1×10□□
Corps de digue, LT	17,2	33	11	5 000	0,33	1×10□□
Protection amont	19,5	0	37	30 000	0,30	1×10□
Drain aval	19,5	0	37	30 000	0,30	1×10□

2.3. *Analyses réalisées*

Pour chacun des deux modèles, la chaîne de calcul de GeoStudio est la même : (1) écoulement permanent (SEEP/W), retenue à 796,5 m ; (2) contraintes in situ puis redistribution des contraintes (SIGMA/W) ; (3) équilibre limite (SLOPE/W) par Bishop et Morgenstern-Price, talus amont et aval, en fin de construction (sans eau) et en régime permanent ; (4) facteur de sécurité par éléments finis, calculé par SLOPE/W à partir des contraintes de SIGMA/W ; (5) réduction de résistance (SRF de 1,0 à 1,5) dans SIGMA/W ; (6) trois vidanges rapides de 6,5 m (796,5 à 790 m) en 1, 3 et 10 jours (V1, V2, V3), suivies pendant 16, 18 et 25 jours. Les surfaces critiques sont recherchées par entrée-sortie avec optimisation. Les seuils de l'USACE sont 1,3 en fin de construction, 1,5 à long terme et 1,1 à 1,3 en vidange rapide [10].

Pour séparer l'effet de la méthode de celui de la surface, l'équilibre limite a été recalculé (Bishop simplifié) sur les tranches de la surface critique des éléments finis, avec les poids, pressions interstitielles et résistances exportés de SLOPE/W. Cette procédure reproduit le facteur de sécurité de Bishop de SLOPE/W à 1–3 % près à l'aval.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. *Écoulement permanent*

La ligne phréatique reste dans le corps de digue et aboutit au drain de pied (Fig. 4). La pression maximale en pied de fondation (211 kPa) correspond à 21,5 m d'eau (796,5 − 775), ce qui valide la charge imposée. Les deux écoulements sont très proches : la ligne phréatique du modèle LT est de 0,3 à 0,6 m plus haute entre x = 70 et 85 m, et la succion atteint −44 kPa (CT) et −40 kPa (LT), sans effet sur la stabilité calculée en contraintes effectives.

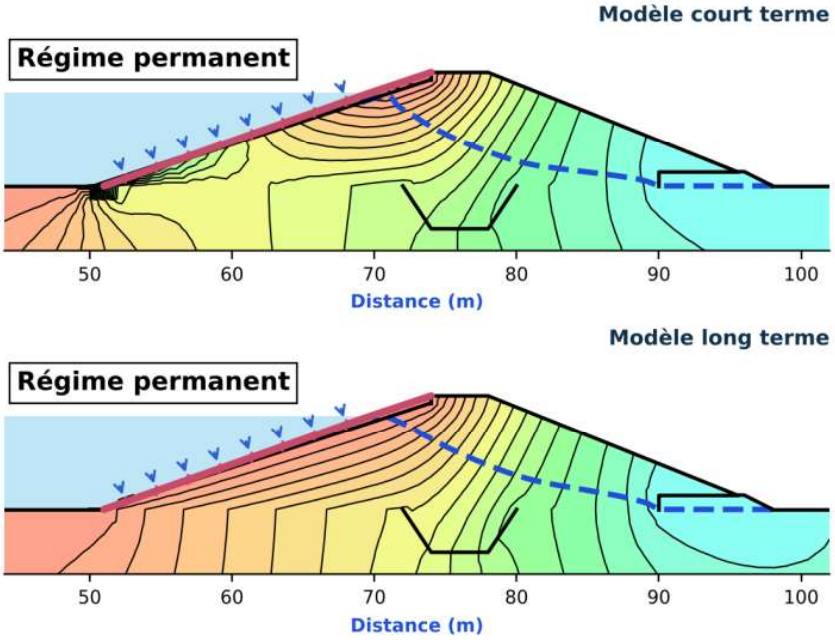

Fig. 4 – Charge hydraulique totale en régime permanent (modèle CT en haut, LT en bas). Tirets bleus : ligne phréatique.

3.2. *Équilibre limite et vidange rapide*

Le Tableau 2 donne les facteurs de sécurité minimaux (fin de construction : amont 2,26 ; aval 3,68 en CT et 2,62 en LT). À l'aval, la surface critique est profonde (environ 80 m³/m) et Bishop et Morgenstern-Price donnent la

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

même valeur : 3,56 (CT) et 2,52 (LT), soit une perte de 29 %. À l'amont, le minimum (2,33 en CT, 2,02 en LT) correspond à un glissement superficiel d'environ 1 m³/m près de la crête ; en fin de construction, la valeur de 2,26 est la pente infinie de la couche granulaire sans eau : tan 37°/tan 18,4° = 2,26. Les trois vidanges ne font baisser le facteur de sécurité amont que de 0,1 au plus en CT (2,23 minimum, V3) ; en LT, le minimum (2,02) est la valeur de départ et n'est jamais dépassé vers le bas. La vidange n'est donc pas le cas dimensionnant : la surface critique reste superficielle, et les creux réguliers des séries temporelles relèvent de la recherche de surface, non de la physique.

Tableau 2 – Facteurs de sécurité minimaux. LEM : équilibre limite ; EF : éléments finis (contraintes) ; entre parenthèses, volume de la surface critique (m³/m).

Cas	CT	LT
Talus amont		
LEM Bishop / Morgenstern-Price	2,35 / 2,33 (1,0)	2,03 / 2,02 (1,0)
LEM, surfaces ≥ 10 m³/m (M-P)	8,46 (71)	5,31 (71)
EF, contraintes SIGMA/W	3,69 (112)	3,15 (80)
LEM recalculé sur la surface EF	3,56	2,85
Talus aval		
LEM Bishop = Morgenstern-Price	3,56 (81)	2,52 (83)
EF, contraintes SIGMA/W	3,68 (81)	2,57 (87)
LEM recalculé sur la surface EF	3,72	2,63

3.3. *Éléments finis et réduction de résistance*

Les éléments finis donnent 3,68 (CT) et 2,57 (LT) à l'aval, et 3,69 (CT) et 3,15 (LT) à l'amont, sur des surfaces profondes (Fig. 5). La réduction de résistance, menée de SRF = 1,0 à 1,5, n'atteint pas la rupture : la norme des déplacements n'augmente que de 0,9 % (CT) et 6,4 % (LT). Seul FS(SRF) > 1,5 peut donc être affirmé. Le modèle LT se déforme environ sept fois plus vite : sa marge est plus faible. Le calcul de redistribution des contraintes a toutefois atteint 300 itérations avec un résidu de 3×10^{-3} pour une tolérance de 10^{-5} (CT et LT) ; les facteurs de sécurité par éléments finis sont donc à confirmer par un calcul plus convergé.

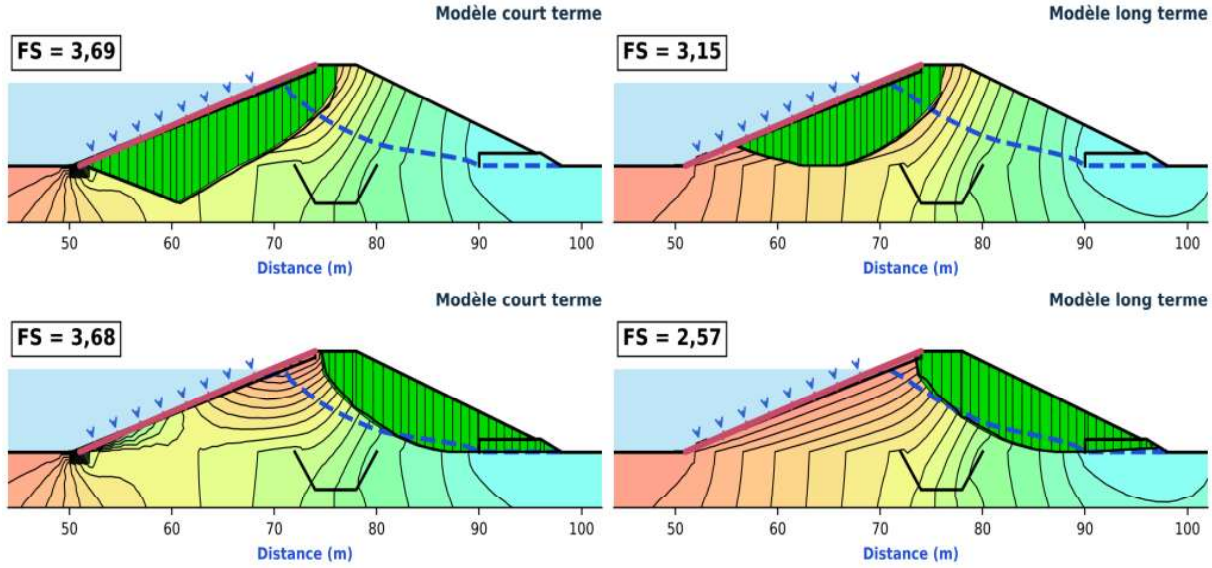

Fig. 5 – Surfaces critiques par éléments finis. En haut, talus amont ; en bas, talus aval ; à gauche CT, à droite LT.

3.4. *Comparaison des deux méthodes*

À l'aval, les deux méthodes trouvent la même surface (même centre) et concordent à 3 % (CT) et 2 % (LT) (Fig. 6). À l'amont, la comparaison directe est trompeuse : l'équilibre limite annonce 2,33 sur 1 m³/m, les éléments finis 3,69 sur 112 m³/m. Parmi les surfaces d'au moins 10 m³/m testées en équilibre limite, le minimum est 8,46 (CT) et 5,31 (LT), bien au-dessus des éléments finis. Pourtant, recalculé sur la surface des éléments finis, l'équilibre limite donne 3,56 (CT) et 2,85 (LT), soit −3 % et −10 %. L'écart vient donc d'abord de la surface : celle des éléments finis, qui atteint la cote 787 m dans la fondation, ne figure pas parmi les surfaces explorées en équilibre limite. Le

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688

fichier indique une limite inférieure de recherche à 790 m, à confirmer en relançant l'équilibre limite avec les mêmes paramètres de recherche.

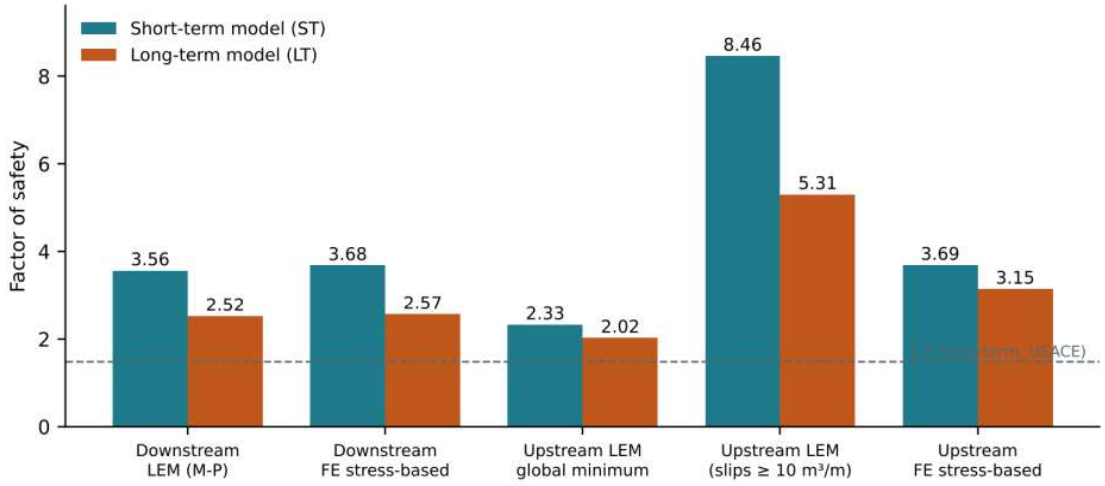

Fig. 6 – Facteurs de sécurité selon la méthode et la taille de la surface (CT: court terme; LT: long terme).

Du court au long terme, la résistance du corps perd 35 % (c') et 27 % (φ'). Le facteur de sécurité aval baisse de 29 % (LEM) et 30 % (EF), c'est-à-dire dans la même proportion. Sur les surfaces critiques fixées, une variation de 10 kPa de cohésion modifie le facteur de sécurité de 0,26 (amont) à 0,48 (aval), contre 0,02 à 0,05 pour 1° de frottement : à cette hauteur de digue, la stabilité est gouvernée par la cohésion plus que par le frottement.

CONCLUSION

Sur la digue de l'oued Souani, tous les facteurs de sécurité dépassent les seuils usuels, même à long terme (minimum 2,02 sur une surface superficielle ; 2,5 à 3,7 sur les surfaces profondes). À l'aval, l'équilibre limite et les éléments finis concordent à 2–3 %. À l'amont, l'écart apparent tient à des surfaces critiques différentes : sur la même surface, les méthodes s'écartent de 3 à 10 %. Le long terme coûte environ 30 % de facteur de sécurité à l'aval. Un facteur de sécurité doit donc être rapporté avec sa surface critique et, pour les éléments finis, la convergence du calcul. Suites prévues : calcul plus convergé, réduction de résistance jusqu'à la rupture, sensibilité à c', φ' et E'.

Références

[1] M. Boufaroua, Envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne, 14th International Soil Conservation Organization Conference, Marrakech, 14–19 mai (2006).
[2] A.W. Bishop, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Géotechnique, 5 (1955) 7-17. https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7
[3] N.R. Morgenstern, V.E. Price, The analysis of the stability of general slip surfaces, Géotechnique, 15 (1965) 79-93. https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79
[4] J.M. Duncan, State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes, Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), 122 (1996) 577-596. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577)
[5] J. Krahn, The 2001 R.M. Hardy Lecture: the limits of limit equilibrium analyses, Canadian Geotechnical Journal, 40 (2003) 643-660. https://doi.org/10.1139/t03-024
[6] D.V. Griffiths, P.A. Lane, Slope stability analysis by finite elements, Géotechnique, 49 (1999) 387-403. https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387
[7] E.M. Dawson, W.H. Roth, A. Drescher, Slope stability analysis by strength reduction, Géotechnique, 49 (1999) 835-840. https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835
[8] Y.M. Cheng, T. Lansivaara, W.B. Wei, Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods, Computers and Geotechnics, 34 (2007) 137-150. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.011
[9] M.Th. van Genuchten, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44 (1980) 892-898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
[10] U.S. Army Corps of Engineers, Slope Stability, Engineer Manual EM 1110-2-1902, Washington D.C. (2003).

©2026 by the authors | Open Access Journal | ISSN Online: 1737-9350, ISSN Print: 1737-6688