



Analyse de cinq cas de glissements au Liban : Causes, effets et mesures correctives

Emile Youssef

Université Libanaise, Faculté de génie 1, Tripoli, Liban

Rouba El Dalati, Yusam Kazan et Pierre Matar

Département de génie civil, Université Libanaise, Faculté de génie 2, Roumieh, Liban

ABSTRACT

It concerns the study of five cases of sliding which had happened in Lebanon. We present the factors which were on the origin of these instabilities and their effects. We present also the failure mechanisms with the retaining solutions for each case. In addition, a numerical modeling was done for a real case of sliding which had provoked disorders while making excavation works. The modeling validates the reality and proposes the adequate solutions.

RÉSUMÉ

Il s'agit de l'étude de cinq cas de glissements ayant eu lieu au Liban. On présente les facteurs déclenchants à l'origine de ces instabilités et leurs effets, ainsi que les mécanismes de rupture avec les solutions de confortement pour chaque cas. En outre, une modélisation numérique est faite pour un cas réel de glissement ayant causé des désordres lors de travaux d'excavation. La modélisation valide la réalité et propose les solutions adéquates.

1. INTRODUCTION

Au Liban, les problèmes de stabilité des pentes se répètent tous les ans. Ceci est dû au relief montagnard de la topographie libanaise lequel est donc appelé à toujours être sujet à des mouvements de versants. De plus, ces risques ont augmenté en raison de l'urbanisation croissante, le développement dans les zones à forte pente ainsi que la déforestation des versants et l'augmentation des précipitations régionales causées par les changements climatiques.

Cette étude présente d'abord les cinq plus grands mouvements de terrains qui ont eu lieu au Liban durant les vingt dernières années avec leurs causes, leurs effets et les solutions adéquates. Elle consiste aussi à faire une analyse de ces incidents, déterminer le mécanisme de rupture derrière chaque cas, proposer des moyens de protection compatibles avec les techniques existantes au Liban et enfin à effectuer un calcul numérique d'un glissement réel avec une étude paramétrique, et en déduire des recommandations.

2. NOMENCLATURE

c est la cohésion du sol, ϕ est l'angle de frottement interne, γ est le poids volumique, et z est la hauteur de la surface de rupture.

3. ETUDE DES GLISSEMENTS DE TERRAINS AU LIBAN

L'examen visuel des différents glissements qui ont eu lieu au Liban ces vingt dernières années montre que la majorité des mouvements de terrain correspondent aux parois très escarpées des grands cours d'eau encaissés (Dar, 2004). Cette étude s'est centrée sur les cinq plus grands glissements (au Kfarfakoud, Daher-El Baydar, Es-sfireh, Bécharreh-Cèdres et Akoura) (Figure 1). Elle est faite en se basant sur les données géotechniques fournies par Nini, (2002). Des solutions de confortement relatives à chaque cas sont proposées mais qui n'ont pas été réalisées faute de moyens. Puis un calcul analytique des surfaces de rupture et des facteurs de sécurité est effectué pour quatre de ces cas.

3.1 Glissement de Kfarfakoud en hiver 2002

Durant l'hiver 2002, un glissement a été repéré à Kfarfakoud, qui est situé au Sud Est de Beyrouth. Cette zone est séparée de la plaine de la Bekaa par la faille majeure de Yammouneh, qui est la continuité de la fosse de la mer morte, responsable de la majorité de l'activité sismique au Liban. Le glissement se trouve entre 660m et 840m d'altitude. Le sol présente une couche de dépôts superficiels fortement hétérogène, d'épaisseur allant jusqu'à 16 m ($c=14$ kPa, $\phi=14^\circ$, $\gamma=18$ kN/m³). Cette couche est formée d'une séquence d'argile sableuse et sable argileux. Elle repose sur une formation rocheuse composée de roches calcaires fortement fracturées (Figure 1) ($c=50$ kPa, $\phi=40^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³).



Figure 1. Schéma des cinq glissements étudiés au Liban

Le niveau de l'eau varie entre 12 et 17 mètres par rapport à la surface du sol. À côté du glissement se trouve une fontaine naturelle avec un débit variable entre l'été et l'hiver.

En se basant sur les résultats des études géologiques et géotechniques, la surface de rupture est probablement située à la limite entre la couche des dépôts superficiels et la formation rocheuse fracturée. Le mécanisme de rupture est vraisemblablement celui d'un glissement rotationnel. Mais le glissement est probablement plus compliqué que ce qu'il paraît. En fait, la forme des matériaux déplacés et l'existence d'une zone très fracturée en bas du glissement peuvent donner la possibilité d'existence de plus d'une surface de rupture. On pense aux glissements rotationnels connus sous le nom de glissement emboîtés ou glissement de chaînes. La zone glissée s'étend à plus de 500 m d'environ. Le pied du glissement touche une pente plus dure et des affleurements de roches calcaires. La surface de rupture est située donc sous la nappe.

La solution proposée est d'utiliser une paroi moulée autostable ou munie de tirants d'ancrage qui doivent être scellés dans la zone stable du sol. Il faut surtout assurer le drainage moyennant des tubes d'évacuation.

3.2 Glissement de Daher-El Baydar

Ce glissement est localisé à l'Est de Beyrouth au centre du Liban. Il s'étend entre 1320 et 1365 m d'altitude sur une longueur de 195 m. La route internationale qui relie Beyrouth à Damas, est affectée par ce glissement. Le sol

présente une première couche de dépôts superficiels fortement hétérogène, d'épaisseur allant jusqu'à 2 m formée de graviers argileux et d'argile sableuse ($c=25$ kPa, $\phi=26^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³). Elle repose sur une couche d'argile sableuse silteuse ($c=85$ kPa, $\phi=14^\circ$, $\gamma=22$ kN/m³). Le tout repose sur une formation rocheuse de calcaire fracturée ($c=92$ kPa, $\phi=14^\circ$, $\gamma=19.7$ kN/m³). Le niveau de la nappe est situé entre 11 et 19 mètres de profondeur.

Il y a affleurements des roches calcaires avec des faces quasi-verticales. La surface de rupture est probablement située entre la couche sableuse et silteuse, et la formation rocheuse. La forme de la surface de séparation entre la formation rocheuse en bas et la couche d'argile en haut montre que la surface de rupture n'est ni circulaire ni plane, elle est quelconque. La nappe se trouve au dessous de la surface de rupture. L'évolution du glissement est très lente ; après chaque forte pluviométrie, de nouvelles fissures apparaissent à travers l'asphalte de la route internationale.

La solution proposée consiste à protéger le secteur instable et empêcher les affleurements des roches calcaires. On peut alors ancrer soit des barres passives, soit des tirants précontraints qui permettent le serrage du milieu par l'application d'un effort. Ce serrage redonne au milieu une cohésion artificielle importante et garantit l'efficacité du traitement par injection. En effet, les fissures comprimées ne pourront pas s'ouvrir ultérieurement sous l'effet d'une traction gravitaire.

3.3 Glissement de Es-sfireh en mars 1998

Durant la nuit de 19 Mars 1998, le sol à Es-Sfireh a glissé suite à la fonte de la neige accumulée. La zone glissée s'étend entre deux cotes, 997m et 1165m. Elle a 70m de largeur et 835m de longueur en forme de cuvette entre deux collines s'élevant jusqu'à 1346m et 1260m. Le volume des matériaux déplacés est estimé à 27000 mètres cubes. Le sol est formé d'une couche d'argile sableuse avec graviers ($c=29$ kPa, $\phi=20.5^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³) reposant sur une couche mince d'argile marneuse ($c=25$ kPa, $\phi=21.5^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³), le tout reposant sur une couche de calcaire stratifiée et fracturée ($c=200$ kPa, $\phi=30^\circ$, $\gamma=22$ kN/m³). Le dernier mètre de la couche d'argile marneuse molle sous saturation joue le rôle d'une couche savon ($c=120$ kPa, $\phi=0^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³) en faisant glisser les formations du sol argileux sous l'effet de la réduction de sa contrainte de cisaillement et de la pente.

Ce glissement ressemble à un glissement plan à pente infinie vu sa géométrie et sa longueur de 835 m. Il est caractérisé par un escarpement principal de plus de 10m de hauteur. La réduction de la résistance de la couche d'argile marneuse est causée par l'augmentation de l'humidité du sol suite à la fonte de la neige accumulée. La position probable de la surface de rupture est en bas de la couche d'argile dans sa partie molle saturée qui joue le rôle d'une couche savon. À noter que l'évolution du glissement est très rapide. En effet, le déplacement total des matériaux d'une cinquantaine de mètres s'est produit seulement pendant un jour.

La solution proposée consiste à diminuer l'effet de la fusion de la neige. On peut ainsi obturer les fissures

superficielles qui favorisent l'infiltration en profondeur. La technique la plus efficace consiste à mater les fissures en y bourrant de l'argile plastique fortement damée. Ce matériau étanche et souple suit le trajet inévitable des fissures et garantit donc la bonne efficacité du traitement. Le travail est à recommencer périodiquement. D'autre part, pour diminuer la saturation de la couche d'argile, on peut réaliser des drains verticaux. Le problème essentiel réside dans l'évacuation de l'eau recueillie. La meilleure solution consiste, lorsque la géologie le permet, à rechercher à une profondeur un horizon perméable dans lequel s'effectuera la vidange des drains verticaux.

3.4 Glissement de Bécharreh-Cèdres

Le glissement a eu lieu entre le village de Bécharreh et la région de Cèdres. La zone glissée est caractérisée par une pente variant 5 à 45 degrés. Le sol est constitué d'une couche de silt argileux, de sable et de cailloutis d'épaisseur variant entre 5 et 15 m ($c'=159$ kPa, $\phi'=21^\circ$, $\gamma=19$ kN/m³). Le tout repose sur une formation rocheuse basaltique noire fissurée et fracturée ($c=200$ kPa, $\phi=30^\circ$, $\gamma=22$ kN/m³). Le niveau de l'eau varie entre 3 et 10 mètres par rapport à la surface du sol. Ces valeurs ne sont pas constantes, elles peuvent varier durant une journée et suivant la saison.

La surface de rupture est probablement située dans les dépôts quaternaires composés du silt argilo-sableux, en haut des roches basaltiques. Le glissement est assimilable à un simple glissement rotationnel. La saturation du sol est la cause principale de la réduction de sa résistance, causée par la fusion de la neige et la haute pluviométrie de la région.

Le drainage de la pente de Bécharreh-Cèdres constitue la solution majeure pour sa stabilisation. La méthodologie de drainage et de soutènement proposée consiste à exécuter des tranchées drainantes le long de la route, ainsi que des puits de drainage profonds sous les tranchées, destinés à capter les eaux d'infiltration.

3.5 Glissement de Akoura en avril 2002

A une altitude de 1400m, le village de Akoura est situé à 80 km de Beyrouth. Cette région reçoit la plus forte pluviométrie du Liban entre 1500mm et 1700mm. En Avril 2002, des fissures de plus de 30cm de largeur, apparaissent dans le sol du village. Le sol est composé de coulées de terre argileuse de 20m d'épaisseur reposant sur des roches calcaires. Le sol est fortement hétérogène dû à l'accumulation des différents matériaux. Il y a des piscines d'eau qui sont implantées tout au long de la partie cultivée (en tête de la zone de glissement) d'où une augmentation de la saturation du sol. En plus, c'est une région à forte précipitation où la fonte de neige est importante.

Le mécanisme de la rupture, vu l'uniformité du sol glisse et la longueur du glissement dépassant 3500m, est plan à pente infinie. Vu la longueur du glissement et la profondeur de la surface de glissement, le volume des matériaux déplacés est énorme, ce qui fait de ce glissement le plus énorme au Liban. La surface de rupture est localisée à 3 m de profondeur. La cause est la

réduction de la résistance du sol due à la saturation par l'eau de pluie, la fonte de la neige ou l'écoulement de l'eau des piscines.

La solution proposée est la mise en place d'un masque drainant. Il s'agit d'un revêtement perméable réalisé en tout-venant, d'épaisseur croissante du haut vers le bas, et appliqué sur la pente.

Enfin, les quatre glissements de Kfarfaquod, Daher-El Baydar, Es-Sfireh et de Bécharreh-Cèdres sont dus à des problèmes d'interface et une alternance des différentes formations qui conduit à des discontinuités horizontales ou obliques. Nous remarquons que la majorité des sols de ces régions est constituée par une couche profonde de formation rocheuse de bonne qualité puis une couche de l'argile qui est cohésive. L'origine de l'accident est un glissement sur l'interface de la couche superficielle qui est en général une couche d'argile.

4. CALCUL ANALYTIQUE

Un calcul analytique est effectué pour quatre cas de ces glissements. L'étude est basée sur le modèle par blocs (Kazan, 2002 ; Khemissa, 2006) et consiste à déterminer les surfaces de glissement et les facteurs de sécurité. Le modèle traite de la détermination de la valeur critique des pendages θ_c (Eq.1) des formations géologiques pour l'amorcement des incidents d'instabilité par glissement.

La méthodologie de prévention consiste à vérifier la présence et les conditions des interfaces dans la zone de l'angle critique calculé. La démarche à suivre est la suivante:

- Etablir la morphologie des massifs rocheux. Ceci se fait lors de la campagne de reconnaissance du sol en précisant les conditions des interfaces et en favorisant les plans de faiblesse.
- Fixer le paramètre méca-métrique du sol $p=2c/\gamma z$.
- Déterminer l'intervalle critique de l'angle de la surface de rupture, c.à.d la valeur de :

$$\theta_c = \text{Arctg} \left[\sqrt{1 + \frac{\gamma z}{2c} \text{tg} \varphi} \right] \quad [1]$$

où z est la hauteur de la surface glissée.

- Vérifier la présence de faiblesses réelles dans le massif autour de cet angle critique. Le cas échéant, on le note et on étudie le facteur de sécurité correspondant au bloc qui passe par ce plan de faiblesse.

- Evaluer la valeur du facteur de sécurité (F) correspondant (le seuil étant égal à 1.5)

Dans le cas où ces démarches montrent qu'un plan de rupture peut amorcer un tel mécanisme, des études sérieuses doivent être concentrées sur les interfaces pour évaluer exactement les valeurs mécaniques et conditions de l'interface.

Les surfaces de rupture sont illustrées dans les figures 2, 3, 4 et 5. Le tableau 1 récapitule les données de calcul

ainsi que les caractéristiques relatives pour chaque glissement. On voit que les divers facteurs de sécurité sont inférieurs à 1.5 d'où la présence des glissements.

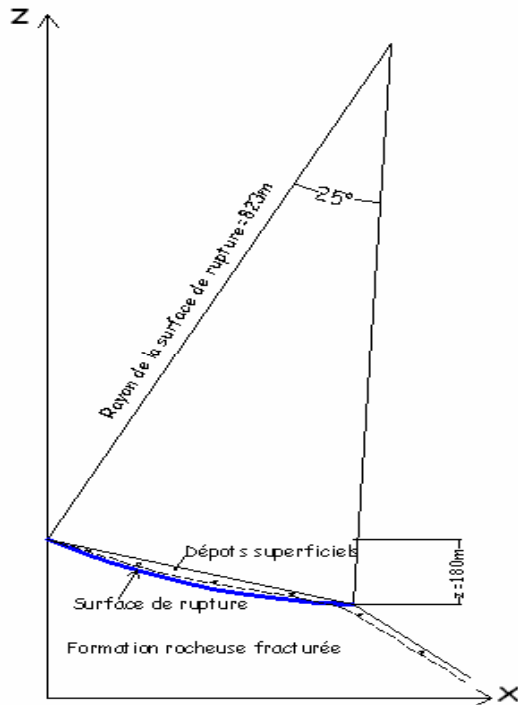


Figure 2 : surface de glissement de Kfarfakoud

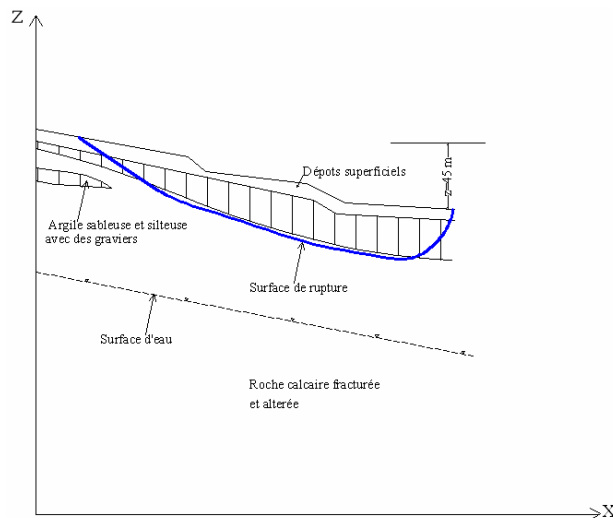


Figure 3 : surface de glissement de Daher el baydar

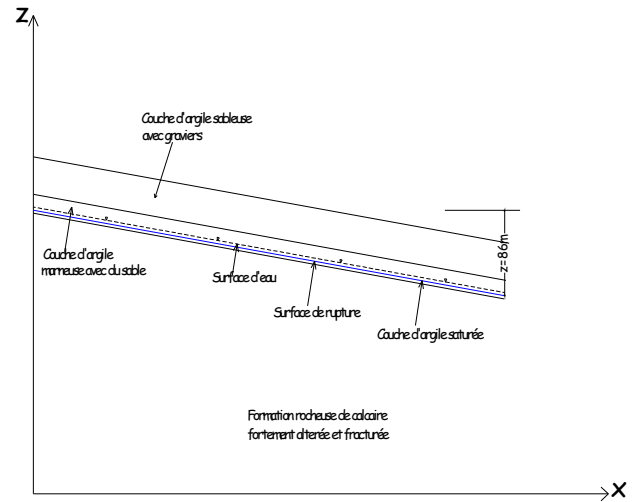


Figure 4 : surface de glissement de Es-sfireh

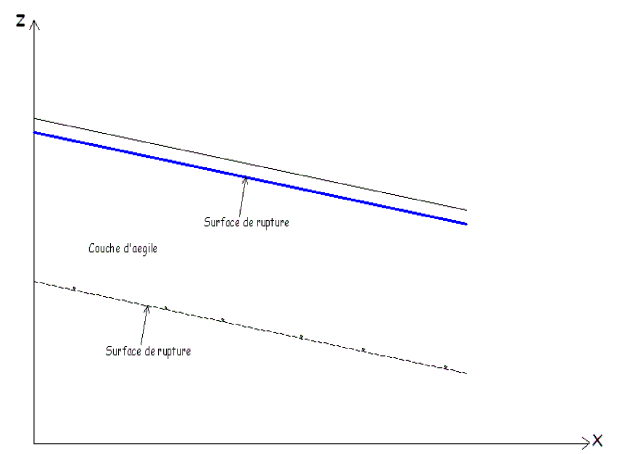


Figure 5 : surface de glissement de Akoura

Tableau 1. Caractéristiques pour chaque glissement.

Lieu	Z(m)	γ kN/m ³	C (kPa)	Φ (°)	θ_c	F
kfarfakoud	180	18	14	14	80	<0.5
Dahr el baydar	45	22	85	14	57	0.7
Es sfire	86	20	25	0	45	0.5
becharre	130	19	159	21	63	0.7

5. MODELISATION NUMERIQUE

La modélisation par éléments finis est faite en utilisant le logiciel PLAXIS pour une excavation qui a été exécutée dans un sol de pente 2/1. L'excavation est de 20 m de longueur et 10 m de hauteur, et le sol est formé d'une couche lâche peu cohésive de 6m d'épaisseur ($\gamma_d = 17$

kN/m^3 , $\gamma_{\text{sat}} = 19 \text{ kN/m}^3$, $E = 15 \text{ MPa}$, $c = 5 \text{ kPa}$ et $\phi = 21^\circ$ surmontant une autre raide ($\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}} = 19 \text{ kN/m}^3$, $E = 60 \text{ MPa}$, $c = 50 \text{ kPa}$ et $\phi = 30^\circ$). Lors de l'arrivée à la deuxième couche raide, un problème s'est apparu dans le sol lâche qui a une épaisseur de 6m, où des fissures horizontales et verticales de grandes épaisseurs ont été détectées visuellement. Il s'agit d'un glissement en chaîne ayant plusieurs surfaces de rupture car le processus des ruptures en chaîne permet d'expliquer l'aggravation rapide qui fait suite à un premier glissement peu important : amorce du processus par le pied du versant puis progression vers l'amont. Ce glissement est surtout dû à l'excavation à angle droit.

Pour éviter le déplacement de l'excavation, on a proposé trois solutions :

- Excavation à angle incliné $\alpha < \phi$ (solution 1). C'est la solution la plus évidente. Elle consiste à respecter l'angle limite d'excavation, c'est-à-dire excaver avec un angle égale à celui de l'angle de frottement.
- Excavation avec talutage (solution 2). Cette solution a été adoptée par l'entrepreneur pour limiter la propagation des fissures verticales qui ont été déjà apparues et qui peuvent provoquer la rupture.
- Excavation avec mur de soutènement et tirants (solution 3). Les tirants sont placés respectivement à 1.5m et 4.5m à partir de la surface du sol avec un angle d'inclinaison de 30 degré. Le tirant le plus haut supporte un effort de traction de 250 kN/m, celui le plus bas de 400kN/m.

Le but de la modélisation des solutions mentionnées ci-dessus est de faire une étude paramétrique afin d'élaborer la solution la plus appropriée en se basant sur les valeurs des déplacements obtenus. Les figures 6, 7, 8 et 9 montrent les résultats de la modélisation après excavation pour le cas initial et les solutions proposées. Le tableau 2 présente les valeurs des déplacements horizontaux, verticaux et totaux ainsi que les corrections par rapport au cas initial.

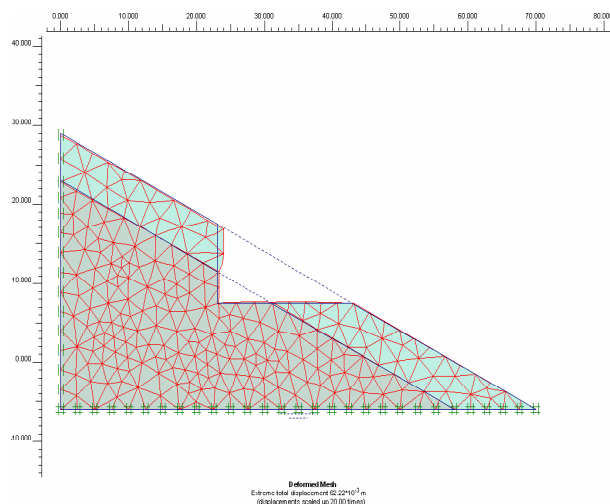


Figure 6. Cas initial

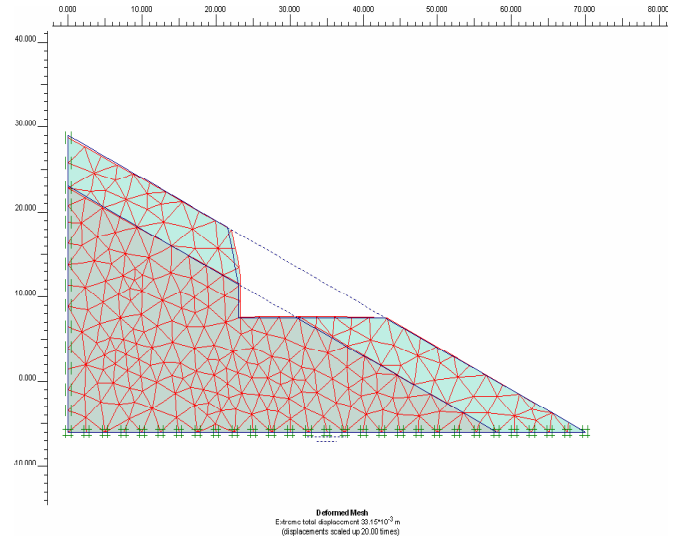


Figure 7. Solution 1, excavation avec angle incliné

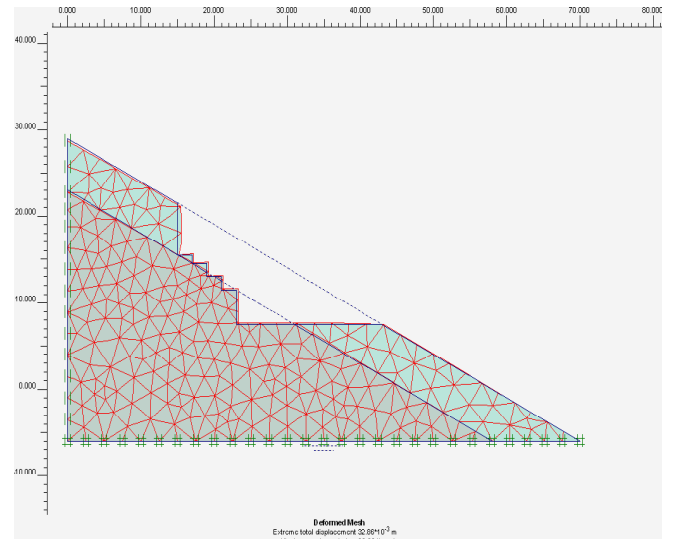


Figure 8. Solution 2, excavation avec talutage.

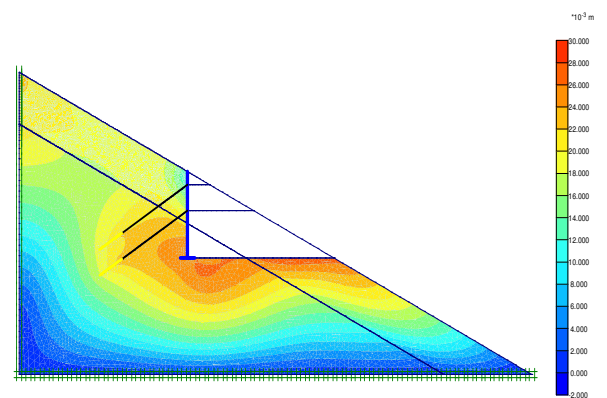


Figure 9. Solution 3, excavation avec soutènement.

Tableau 2. Valeurs des déplacements obtenus par la modélisation

Cas considéré	Dép. horizontal (mm)	Dép. vertical (mm)	Dép. total (mm)	Correction (%)
Cas initial	50.20	37.36	62.22	0
Solution 1	31.14	16.07	33.15	46.72
Solution 2	25.98	20.99	32.86	47.18
Solution 3	27.25	22.35	28.03	54.95

D'après le pourcentage de correction (Tableau 2), on peut conclure que la meilleure solution est de réaliser un soutènement (solution 3). Par ailleurs, la solution du talutage (solution 2) donne des valeurs de déplacements acceptables et rend l'excavation stable et diminue le danger de glissement en chaîne. La solution 1 donne les valeurs de déplacements les plus grandes mais elle a une valeur de correction très proche de la solution de talutage. Enfin, tenant compte du coût et de la durée d'exécution, la solution 2 (talutage) s'avère la meilleure.

6. CONCLUSION

Les cinq plus grands glissements qui ont eu lieu au Liban pendant les 20 dernières années ont été étudiés. Leurs causes et leurs effets ont été passés en revue et les solutions correspondantes ont été proposées selon le budget et les techniques existantes.

L'étude a montré une grande ressemblance entre les différents cas : On remarque que quatre parmi eux ont le même type de glissement plan. Ceci est dû à la même formation géologique. D'autre part, on remarque que les facteurs déclenchants sont semblables et sont principalement dus aux raisons climatiques. Le surplus de pluviométrie reste la cause principale pour le déclenchement des glissements au Liban. Par conséquent, les solutions proposées consistent à assurer en premier lieu le drainage notamment les puits verticaux. Pour d'autres types de mouvements de la terre comme l'effondrement ou l'éboulement, ils sont dus, en général, au manque d'éléments de soutènement, et sont particulièrement mobilisés dans la saison d'hiver. La solution à préconiser pour ce type de mouvement est, soit l'application des filets métalliques, soit le béton projeté ou les murs de soutènement au bord des routes montagneuses pour les talus artificiels. Par ailleurs, lors de l'excavation dans les montagnes libanaises, la modélisation numérique a montré que la méthode de talutage, pour prévenir contre le glissement, est la solution la plus adéquate de point de vue qualité - prix.

REFERENCES

- Dar A. (2004) Schéma d'Aménagement du Territoire Libanais : Les réalités physiques incontournables. L0215-RPT-10 REV A, Liban.
- Kazan Y. (2002) Mécanisme de rupture dû à un problème d'interfaces. *Journées Nationales de Géotechniques et Géologie de l'Ingénieur -JNGG'2002*, Nancy, France.
- Khemissa M. (2006) Méthode d'analyse de la stabilité et techniques de stabilisation des pentes. *Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur -JNGG'2006*, Lyon France.
- Nini R. (2002) Cartographie de la susceptibilité aux grands glissements de terrain au Liban. Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Paris.