



## Comprendre le comportement d'une couche savon dans un glissement de terrain

Muhsin Elie Rahhal, Nicolas Masaad et Johnny Rizkala  
*École Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth ESIB – Université Saint Joseph, Beyrouth, LIBAN*

### ABSTRACT

Ground motions may have devastating consequences both on the human as well as economic levels. This paper presents an analysis of a landslide case study that occurred in the village of Essfiré in northern Lebanon Mountains. Geotechnical, geological, tectonic, hydrogeologic and climatic data were deeply studied. The slope stability was evaluated according to different methods. The analysis shows that the role of water is prevailing in determining the soil slope stability. The study focused particularly on the behavior of a marly clay layer in contact with water. The loss of cohesion due to saturation is thought to be behind the detected failure. To avoid a possible recurrence of the observed problem, special drainage techniques are recommended.

### RÉSUMÉ

Les mouvements de sol peuvent avoir des conséquences dévastatrices tant au niveau humain qu'au niveau économique. Cet article présente une étude d'un cas de glissement de terrain qui a eu lieu dans le village d'Essfiré dans les montagnes du nord du Liban. Les données géotechniques, géologiques, tectoniques, hydrogéologiques et climatiques ont été profondément étudiées. La stabilité de la pente a été évaluée suivant différentes méthodes. L'analyse démontre que le rôle de l'eau est primordial dans la détermination de la stabilité de la pente. L'étude a porté en particulier sur le comportement d'une couche d'argile marneuse au contact de l'eau. La perte de la cohésion due à la saturation serait à l'origine de la rupture détectée. Pour éviter la récurrence du problème observé, des techniques spéciales pour le drainage sont recommandées.

### 1 INTRODUCTION

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées boueuses, effondrements de cavités, affaissements, gonflement ou retrait des sols) et par leur grandeur (certains glissements peuvent atteindre plusieurs millions de m<sup>3</sup>). La répartition spatiale des mouvements relève de la topographie et de la géologie (Carrara et al. 1995). Leur occurrence est très marquée par les variations climatiques (périodes de fortes pluies, fonte des neiges, sécheresse) mais peut aussi être liée à des secousses sismiques ou encore être induite par les activités humaines. Les mouvements de terrain surviennent lorsque la résistance du sol devient inférieure aux contraintes causées par la gravité, l'eau souterraine, et toute autre sollicitation ou facteur parfois dus aux projets conçus par les êtres humains.

Le glissement est un déplacement généralement lent. Il est défini par le déplacement d'une masse de terrains meubles ou rocheux le long d'une surface de rupture. Selon la géométrie de cette surface de rupture, deux types principaux de glissements sont distingués. D'abord, il y a le glissement plan où la ligne de rupture suit généralement une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée couche savon. La ligne de rupture dans ce genre de glissement est prédéfinie, et constitue une ligne de discontinuité. Ensuite il y a le glissement circulaire ou rotationnel où la surface de glissement est plus ou moins circulaire; ce mouvement est caractérisé par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal

assez marqué. Les profondeurs des surfaces de glissement sont variables: de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres, voire une centaine de mètres pour certains glissements de versant (Abramson et al. 1996).

Le passage de l'état de stabilité à l'état d'instabilité (Dikau et al. 1996) relève de causes nombreuses: externes (l'érosion, les séismes, les surcharges d'un ouvrage); et internes (l'augmentation de la pression interstitielle, l'altération d'une roche). Souvent aussi, les causes sont conjuguées. La nature géologique des terrains est un des principaux facteurs d'apparition de ces phénomènes tout comme l'eau et la pente. Les matériaux affectés sont très variés (Fletcher et al. 2002), mais globalement la présence d'argile en forte proportion est toujours un élément défavorable compte tenu de ses mauvaises caractéristiques mécaniques. La saturation des terrains en eau (présences de sources, fortes précipitations, fonte des neiges brutales, changements dans le patron de drainage) joue aussi un rôle moteur dans le déclenchement de ces phénomènes.

Beaucoup de techniques ont été développées afin de minimiser l'impact des glissements de terrains (Popescu 2002). Une analyse des facteurs causant les instabilités de pentes au Liban a déjà été réalisée (Rahhal et al. 2003). Un travail de cartographie des mouvements de terrains a aussi été entrepris (Rahhal et al. 2004). Le présent article aborde le cas particulier d'un grand glissement causé par le comportement d'une couche d'argile marneuse qui perd sa cohésion sous l'effet de la saturation et agit donc comme une couche savon.

## 2 LE GLISSEMENT DE TERRAIN

### 2.1 Localisation

Essfiré est un village au nord du Liban, d'altitude moyenne 1100 mètres. Il est situé à 120 km de la ville de Beyrouth, 42 km de la ville de Tripoli, et à 2,5 km au NE de la station estivale de Sir-Eddenié. Le village contient les vestiges d'un grand temple romain, connu sous l'appellation de la citadelle fortifiée, datant du 2<sup>ème</sup> siècle avant Jésus Christ et surplombant le village. L'activité principale des habitants du village est l'agriculture. Récemment, un financement des Nations Unies a été accordé au village dans le but d'encourager le tourisme culturel et archéologique.

En mars 1998, le sol à Essfiré a glissé, suite à la fonte de la neige accumulée. Ce glissement montré dans la Figure 1 sera l'objet de cette étude.



Figure 1. Vue globale du glissement dans le village Essfiré. Le mouvement est indiqué par la flèche.

La région a déjà connu dans son histoire plusieurs glissements depuis les années soixante. Le dernier glissement enregistré avant celui-ci date de 1992, avec un parcours d'une trentaine de mètres pour les sols glissés. La zone glissée en 1998 s'étend entre les côtes 997 et 1165 mètres, elle a 70m de largeur, et 835m de longueur; de plus, elle forme une cuvette entre deux collines s'élevant jusqu'à 1260 et 1346 m. La Figure 2 présente une vue aérienne de ce glissement qui est parallèle au village. Le village est bâti sur un rocher à côté du glissement qui s'est produit en terres agricoles; les maisons du village n'ont presque pas été endommagées. Mais le glissement a néanmoins altéré la route principale qui conduit au village, et quelques maisons du côté aval, sans faire pour autant de victimes humaines.

L'accès au village se fait par la route principale passant au pied du glissement, qui continue jusqu'au haut du village, où se trouve le grand escarpement de plus de 10m de hauteur, tel que montré dans la Figure 3.



Figure 2. Vue aérienne du glissement et sa localisation par rapport au village Essfiré. Le sens du mouvement est indiqué par la flèche.



Figure 3. Vue de l'escarpement à la limite supérieure du glissement.

Le glissement analysé dans ce travail a causé un état de panique dans la région. Effectivement, durant la nuit du 19 mars 1998, le sol a commencé à glisser d'une façon dangereusement rapide, en poussant des centaines de tonnes de sol au-delà de la route principale du village, les rejetant dans la vallée située en bas de la route. Cette coulée de sol a donc eu lieu dans une période hivernale froide et a presque isolé entièrement les 3000 habitants du village. Afin de réduire le danger des matériaux déplacés qui viennent buter des maisons qui se trouvent à l'aval du glissement, le maire du village a mis en action à partir de la nuit du déclenchement du mouvement, des camions et des tracteurs pour déplacer ces matériaux et réduire les pressions du sol contre les maisons. Le volume des matériaux déplacés a été estimé égal à 27000 m<sup>3</sup> de sol. Une inspection visuelle des lieux en haut de la route révèle des signes de mouvements. Les habitants ont décrit le déplacement des arbres fruitiers qui se trouvaient sur le site comme ayant dépassé une trentaine de mètres. A ne pas oublier que l'agriculture est l'activité principale des habitants de la région.

## 2.2 La Géologie

Les formations géologiques de la zone étudiée (Dubertret 1955) consistent de roches sédimentaires et volcaniques, datant de la période Crétacé. Chronologiquement, ces formations s'échelonnent de l'Aptien Inférieur au Cénomaniens. Des formations plus récentes couvrent la plupart de la zone et consistent des alluvions et des colluvions qui ont évolué en sols agricoles.

Les roches volcaniques ont fait éruption en deux périodes: la première désignée sur le plan géologique par  $\beta C_{2b}$ , s'est produite au début de l'Aptien Supérieur. Ce flux repose sur une formation de grès "Mdairej Limestone"  $C_{2a2}$  qui lui même repose sur une formation de grès "Abeih Sandstone"  $C_{2a1}$ . Pour le deuxième épisode, la formation  $\beta C_3$  se produit durant l'Albien Inférieur et cette éruption paraît être plus violente, en se basant sur des observations sur place, la preuve étant la présence d'inclusions marneuses. Son flux est basaltique et son épaisseur est estimée à 60m, il forme la plateforme au nord de la zone glissée entre la route d'Essfiré et le village d'El Maqtouaa d'une part et le bas de l'escarpement de Qornet el Hosn d'autre part.

D'un autre côté, les roches sédimentaires sont formées par la séquence des cinq couches suivantes: premièrement une formation grès d'Abieh ( $C_{2a1}$  -Aptien inférieur), deuxièmement une formation calcaire de Mdairej ( $C_{2a2}$  -Aptien inférieur), troisièmement une formation marne de Hammana ( $C_{2b}$  -Aptien supérieur), quatrièmement une formation marne de Hammana ( $C_3$  -Albien supérieur), et enfin une formation calcaire de Sannine ( $C_4$  -Cénomaniens). La première formation consiste typiquement de lits de roches calcaires et de grès argileux. Ce type de grès est caractérisé par une faible cimentation ferrugineuse avec une couleur brun jaunâtre ocre, couleur indicatrice de la présence du minéral sableux. L'épaisseur estimée de cette première formation est de l'ordre de 150m, et elle est très visible au sud et à l'est de la région glissée. Les observations in situ montrent que cette formation est extrêmement fracturée. La deuxième formation est constituée du calcaire massif de couleur grise, elle apparaît comme une falaise abrupte. Dans la région d'Essfiré, on la trouve tout le long du côté sud de la vallée d'el Raml et sur le côté est de la vallée d'El Maqtouaa. Cette formation d'épaisseur estimée à 40 mètres est extrêmement fracturée avec des joints souvent verticaux, montrant parfois des tâches rouges, causées par la percolation de l'eau riche en oxydes ferriques. La troisième formation est de 15 mètres de marne bleuâtre, surmontée par des couches litées de marnes et de roches marneuses jusqu'à une épaisseur de 25 mètres. On peut l'observer du côté nord de la vallée d'el Raml. Elle repose sur les couches volcaniques  $\beta C_2 b$  à l'ouest et directement sur  $C_{2a2}$  ailleurs. La quatrième formation est une marne verte bleuâtre plus épaisse que les autres. Sur place, la majorité de cette formation est couverte par des remblais. L'épaisseur estimée est de 50 mètres. La dernière formation est une série épaisse de calcaire, de calcaire dolomitique et de dolomite qui forment l'escarpement de Qornet el Hosn. Ces lits contiennent des calcites. Il faut rappeler que les formations de Mdairej et de Sannine forment les couches aquifères du Liban.

## 2.3 La Tectonique

Localement, deux failles datant de l'Aptien Supérieur se trouvent dans la région d'Essfiré. La première s'étend du sud d'Essfiré, en s'incurvant du côté est vers le nord, en s'approchant de la vallée Maqtouaa et en continuant tout le long de la vallée. La deuxième faille est située à l'ouest de la zone glissée, elle a causé la couche basalte  $\beta C_{2b}$  en s'appuyant directement contre les formations d'Abeih et de Mdairej. A noter que des failles ont conduit certaines couches à s'incliner en provoquant parfois des plis profonds à côté des failles.

## 2.4 L'Hydrogéologie

La source principale qui alimente la région est Nabaa el Soukkar, située à 5 kilomètres de la zone glissée. Cette source saisonnière a un débit moyen de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  en hiver, et beaucoup moins en été. Elle est localisée dans les formations «Calcaires de Sannine», constituées de calcaire et de calcaire marneux, et elles forment la couche aquifère du Liban. D'autres sources, de plus faibles débits se trouvent à proximité du glissement, comme la source d'Ain El Faouar qui se trouve en plein milieu de la zone glissée. D'autres sources comme Ain El Maqtouaa, Ain Malake, et Ain El Hajal se trouvent en amont, à 500 mètres du glissement. La Figure 4 indique les différentes sources d'eau. Le substratum rocheux en dessous des couches de sol, est assez fracturé et altéré; ce qui laisse supposer une présence de réseaux d'écoulements souterrains. Les surfaces captant l'eau de pluie et qui limitent la zone glissée, sont formées essentiellement de sol agricole. A gauche de la zone glissée et tout le long de la route principale du village, se trouvent des canaux de béton. Ces canaux conduisent l'eau d'irrigation de Nabaa el Soukkar durant les saisons sèches et sont utilisées pour le drainage des eaux de pluie pendant la fonte des neiges. A noter que le village ainsi que les jardins au-dessus de la zone glissée sont constamment arrosés par les eaux des diverses sources de la région.

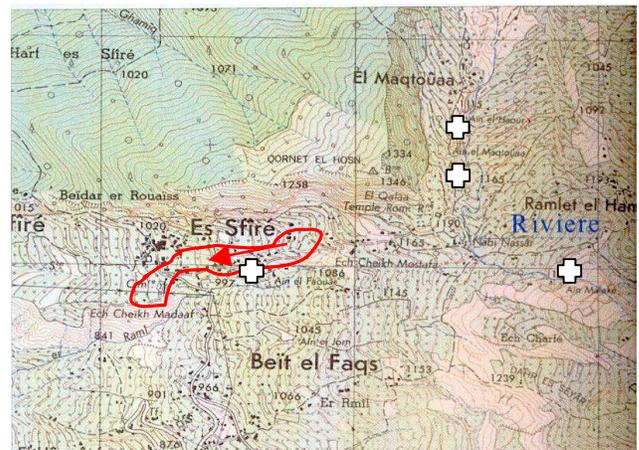


Figure 4. Les limites du glissement d'Essfiré entouré des sources d'eau indiquées par les petites croix.

## 2.5 Le Climat et la Végétation

La région d'Essfiré reçoit une pluviométrie moyenne de 1500 mm durant l'année, et est constamment caractérisée par une forte humidité. La concentration de fortes pluies a lieu durant les mois de décembre, janvier, et février. La température varie entre un peu moins que zéro degré, et 27 degrés en été. La fonte des neiges est estimée à 25mm par jour durant les mois de mars et avril; ceci montre que ce facteur est assez important dans la saturation des couches de sol pendant ces mois. La végétation couvrant la zone glissée et plus généralement le village d'Essfiré se limite à des pruniers et des pêchers.

## 3 LE PROFIL DE SOL

### 3.1 Investigation Géotechnique

Les investigations de terrain ont été entreprises entre le 15 juillet et le 6 août 1998. Le travail a inclus des forages, des échantillonnages, des tests de laboratoire et des tests in situ. Quinze forages ont été réalisés dans la région du glissement, répartis sur toute la surface, de manière à pouvoir se faire une idée claire du modèle de terrain. La profondeur de ces forages varie de 9 à 28 m, pour une longueur totale de 267 m forés. Les forages ont inclus des échantillonnages, et des tests SPT. Quand une formation rocheuse était rencontrée, le forage se poursuivait par une méthode d'échantillonnage continue. Des échantillons de sols et de roches ont été recueillis sur place, puis inspectés et analysés. Par la suite, ces échantillons étaient conservés et identifiés, puis préservés dans des boîtes en bois fermées, avant de les transporter au laboratoire pour des analyses plus spécifiques. Des tests de pénétration standard SPT ont été effectués tout au long des forages. Les SPT ont été réalisés à des intervalles de 1 m dans les 6 premiers mètres de sol, puis à des intervalles de 1,5 m par la suite suivant la norme ASTM D1586.

Par ailleurs, des tests de perméabilité à charge variable ont été effectués sur le terrain. Ces tests ont permis de connaître l'ordre de grandeur de la perméabilité des différentes couches de sol.

Des tests de laboratoire ont été réalisés sur divers échantillons. Ces tests comprenaient: des tests de granulométrie et de classification, des limites d'Atterberg, des teneurs en eau, des mesures de masses volumiques sèches et saturées, des tests de cisaillement direct, et des tests de compression simple. Tous les tests étaient conduits suivant les normes ASTM.

### 3.2 Le Profil de la Pente

Pour pouvoir tracer le profil de la pente, une carte topographique de la région d'étude a été utilisée. Cette carte a été dessinée par la direction des affaires géographiques et géodésiques de l'armée libanaise. Une coupe sur la carte au niveau de la région glissée a été tracée, et les courbes de niveau ont été utilisées pour déterminer les dénivellations. Les courbes de niveaux étant presque parallèles au niveau de la zone glissée,

une seule coupe a suffi pour identifier la pente. La pente a été tracée entre les côtes 960 et 1170 mètres (Figure 5). La route qui se trouve au plus bas est la route principale qui mène au village, et qui a été coupée après le glissement. La pente en dessous de la route a un angle de 18°, elle commence à s'atténuer peu à peu, pour atteindre 12° au milieu du glissement, et arrive enfin à 10° au sommet, aux alentours de la côte 1170 m.

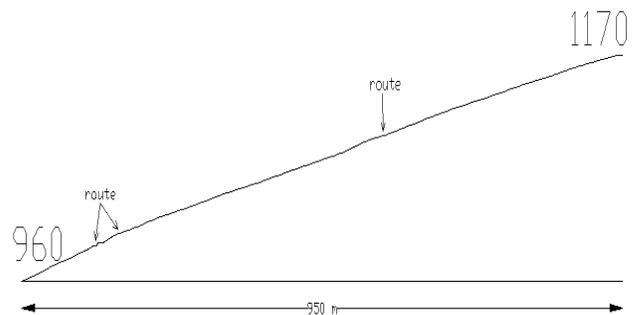


Figure 5. Le profil de la pente étudiée.

### 3.3 Le Profil typique

Pour pouvoir identifier les différentes couches de sol constituant la région glissée, une analyse détaillée des forages réalisés s'avère être indispensable. Ainsi, pour dessiner le profil de sol, les différents forages du site ont été confrontés, en comparant les forages voisins et en essayant de trouver des points communs entre eux. Le profil du sol qui a glissé peut être représenté par 3 couches principales: une première couche en surface constituée d'une argile sableuse avec du gravier; une seconde couche en profondeur formée d'une argile marneuse; et enfin, une troisième couche constituant le substratum rocheux.

La couche superficielle du sol est formée principalement d'une argile sableuse d'épaisseur variable allant de 1 à 13m. Les caractéristiques d'identification géotechnique minimales et maximales mesurées sur des échantillons de cette couche sont présentées dans le Tableau 1. Pour cette argile, les masses volumiques sont:  $\rho_t = 1.75 \text{ Mg/m}^3$  et  $\rho_{\text{sat}} = 2.2 \text{ Mg/m}^3$ . Quatre essais de cisaillement direct ont été réalisés. A partir de ces essais, il a été décidé d'attribuer à cette couche d'argile les valeurs moyennes de cohésion et d'angle de frottement suivantes:  $c = 20 \text{ kN/m}^2$  et  $\Phi = 22^\circ$ . Une valeur moyenne de N égale à 9 pour le test SPT pourra aussi définir cette couche. Enfin, en se basant sur les tests de mesure de perméabilité in situ, une perméabilité représentative de cette couche d'argile marneuse serait donnée par  $k = 8 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ .

En dessous de la couche d'argile sableuse, se trouve une couche d'argile marneuse d'épaisseur variant entre 1.5 m et 8 m. Cette couche a les propriétés géotechniques limites montrées dans le Tableau 2. Pour cette argile les masses volumiques sont  $\rho_t = 1.75 \text{ Mg/m}^3$  et  $\rho_{\text{sat}} = 2.2 \text{ Mg/m}^3$ . Deux essais de cisaillement direct ont été réalisés sur des échantillons de cette argile

marneuse. A partir de ces essais, il a été décidé d'attribuer à cette couche d'argile les valeurs moyennes de cohésion et d'angle de frottement suivantes:  $c = 46 \text{ kN/m}^2$  et  $\Phi = 18.5^\circ$ . Une valeur moyenne N de 24 pour le test SPT pourra aussi définir cette couche. Une perméabilité représentative de cette couche d'argile marneuse est donnée par  $k = 7 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ . L'indice de plasticité de 22 % laisse supposer un taux et un potentiel de gonflement pour cette argile assez élevés. En cas de saturation de cette argile, elle pourrait gonfler considérablement, et sa cohésion risquerait de diminuer. Cette couche d'argile jouerait donc en cas de saturation, le rôle d'une couche savon sur laquelle glisserait tout le versant. Sachant que pendant la période des forages, aucune nappe n'a été trouvée, cela laisserait supposer que ces valeurs sont «à sec».

Tableau 1. Propriétés de la couche d'argile sableuse.

Propriété	Valeur Minimale	Valeur Maximale
Limite de liquidité (%)	30	52
Indice de plasticité (%)	12	24
Pourcentage de fines (%)	31	96
Pourcentage d'argile (%)	9	42

Tableau 2. Propriétés de la couche d'argile marneuse.

Propriété	Valeur Minimale	Valeur Maximale
Limite de liquidité (%)	21	67
Indice de plasticité (%)	7	35
Pourcentage de fines (%)	42	83
Pourcentage d'argile (%)	9	52

Enfin, le substratum rocheux a été trouvé à des profondeurs variant entre 5 m et 17m. Une résistance à la compression de ce rocher est donnée par une moyenne de 43 MPa avec comme limites minimales et maximales respectivement: 18 et 78 MPa. Ce rocher est moyennement fracturé et fissuré, et ses fractures sont remplies d'argile. Sous l'effet des pluies et des infiltrations d'eau dans le sol, la saturation d'argile comblant les fissures entraînerait leur gonflement, ce qui exercerait une importante pression latérale dans le rocher, et augmenterait le risque de détachement du rocher de l'argile qui est en dessus.

#### 4 LE CALCUL DE STABILITÉ

Une analyse du profil de sol obtenu laisserait présupposer les causes éventuelles qui ont déclenché le glissement. La couche d'argile marneuse, en cas de saturation pourrait très bien jouer le rôle de couche savon pour cette pente. Le glissement s'étant produit au mois de mars, la fonte des neiges a un rôle à jouer dans la saturation du sol. La nature gonflante de cette argile et son grand potentiel d'effondrement renforcent la théorie

de la couche savon; ce qui nous laisse deviner une surface de rupture potentielle qui se trouverait au niveau de l'argile marneuse. Ceci renforce la théorie d'un glissement plan dû à une couche saturée aux mauvaises propriétés mécaniques qui glisserait sur une discontinuité. Le problème serait donc à priori un problème d'eau.

Ayant considéré la saturation de la couche d'argile marneuse comme étant la cause du glissement, il a été décidé de répartir le profil en 4 couches: une première couche d'argile sableuse (couche 1), une deuxième couche d'argile marneuse non saturée (couche 2), une troisième couche d'argile marneuse saturée (couche 3), qui perd de ses propriétés mécaniques, et enfin une dernière couche qui représente le substratum rocheux (couche 4).

Ainsi, la couche d'argile marneuse a été décomposée en deux couches, une couche non saturée et une couche saturée, et ce pour observer l'évolution de la stabilité en fonction de la saturation.

Pendant la période d'été, quand les forages ont été réalisés, aucune trace de nappe n'a été trouvée, donc pendant cette période à sec, la couche 3 n'existe pas, car l'argile marneuse n'a pas de partie saturée. L'analyse qui suit va considérer donc deux périodes, selon que la couche d'argile marneuse soit saturée ou non, pour observer l'évolution du facteur de sécurité entre ces deux périodes de l'année.

##### 4.1 La période sèche

Cette période est la période d'été en principe, où il n'existe pas de nappe dans le sol. Dans ce cas, la couche 3 n'existe pas. Les propriétés mécaniques à considérer seront celles trouvées lors la réalisation des essais sur des échantillons tirés à partir des forages exécutés. La surface de rupture a été prédéfinie à l'avance, comme étant la discontinuité entre le rocher et le sol. Ainsi dans ce cas, les facteurs de sécurité obtenus suivant quatre méthodes de calcul sont donnés dans le Tableau 3. L'observation des résultats montre que le versant en période sèche a un facteur de sécurité moyen de 3. Ceci est considéré comme étant largement stable. Le glissement étant plan, il faut noter comment la surface de rupture englobe la totalité du sol sur la discontinuité qui est représentée par le contact avec le rocher.

##### 4.2 La période humide

Cette période est normalement caractérisée par les mois d'hiver et du début du printemps, où les fortes pluies, et la fonte des neiges ont un effet sur l'approvisionnement du sol en eau, et la saturation de ses couches. La couche 3 existe donc dans ce cas, celle-ci représentant une couche d'argile marneuse saturée en profondeur.

Les propriétés mécaniques à considérer pour cette couche seront des caractéristiques à court terme, de par la saturation, et le glissement se faisant rapidement, donc il faut considérer un cas non drainé. Les paramètres mécaniques à utiliser pour cette couche sont les suivants:  $\Phi = 0$ , et pour la cohésion une valeur  $C_u$  sera considérée. La saturation de l'argile marneuse entraînant son gonflement et une diminution de ses propriétés

cohésives, plusieurs itérations seront effectuées sur cette valeur en la diminuant constamment, afin de trouver la valeur critique de la cohésion qui entraînerait la rupture, et la chute du versant. En ce qui concerne les autres couches, celles-ci n'étant pas saturées, elles conservent leurs propriétés mécaniques.

La surface de rupture a été prédéfinie à l'avance, comme étant la discontinuité entre le rocher et le sol. Une variation constante en diminution de la cohésion donne les valeurs de facteurs de sécurité montrés dans le Tableau 4, pour les différentes méthodes. Les valeurs dans le Tableau 4 dépendent de la valeur de la cohésion non drainée considérée.

Tableau 3. Facteur de sécurité pour la période sèche.

Méthode de calcul	Facteur de sécurité
Méthode ordinaire des tranches	2,99
Méthode de Bishop	2,96
Méthode de Janbu	3,19
Méthode de Morgenstern Price	3,20

Tableau 4. Facteur de sécurité pour la période humide en fonction de la cohésion.

Cohésion (kPa)	45	40	35	30
Méthode ordinaire des tranches	1,55	1,40	1,25	1,09
Méthode de Bishop modifiée	1,43	1,29	1,15	1,02
Méthode de Janbu	1,67	1,51	1,35	1,19
Méthode de Morgenstern Price	1,68	1,52	1,36	1,20

Il faut donc observer une rupture du versant pour une valeur de la cohésion qui a nettement diminué. Les cohésions qui induisent la rupture pour les différentes méthodes de calcul sont montrées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Valeur de la cohésion à la rupture.

Méthode de calcul	Cohésion (kPa)
Méthode ordinaire des tranches	26
Méthode de Bishop modifiée	29
Méthode de Janbu	23
Méthode de Morgenstern Price	23

Il faudrait remarquer une nette diminution de la cohésion de l'argile marneuse, une diminution de l'ordre de 40 à 50 %, comme il est déjà précisé pour les argiles saturées. Le facteur de sécurité diminue presque linéairement avec la cohésion tel que montré dans la Figure 6. Les calculs montrent aussi le conservatisme de la méthode de Bishop qui atteint la rupture (FS=1) bien avant les autres méthodes, donnant ainsi plus de sécurité. Cette méthode est suivie par la méthode ordinaire des tranches (Fellenius). Il faudra discerner aussi une grande similarité entre les méthodes de Janbu et de Morgenstern-Price, qui donnent presque les mêmes résultats.

Un des agents fondamentaux du déplacement dans les mouvements de terrain est donc l'eau. Les spécialistes s'accordent à reconnaître ainsi le rôle primordial de l'eau dans le déclenchement des glissements. Une remontée du toit d'une nappe augmente la pression interstitielle et peut déstabiliser un versant. L'eau peut devenir un agent de transport, et une masse argileuse peut perdre sa cohésion, prendre un état plastique ou liquide, et donner naissance à un glissement ou une coulée.

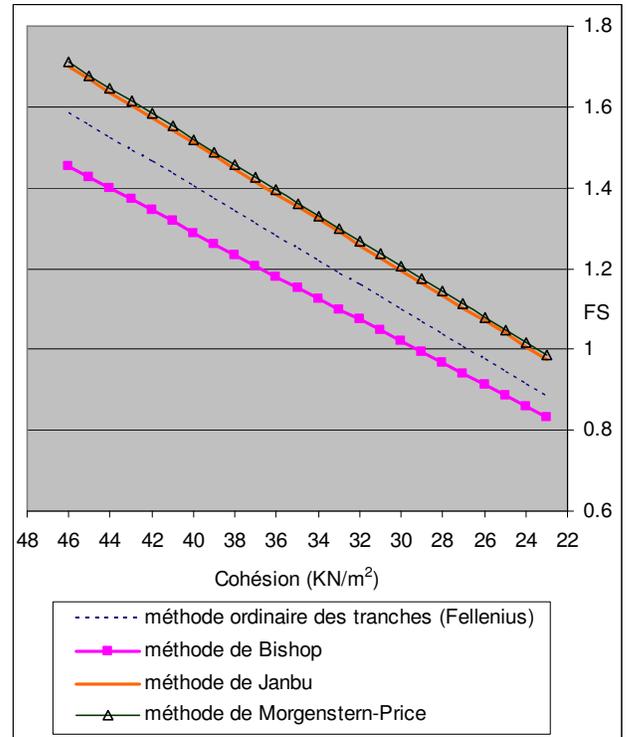


Figure 6. Evolution du facteur de sécurité en fonction de la cohésion pour différentes méthodes de calcul.

A noter aussi la grande chute du facteur de sécurité entre la période sèche et le début de la partie humide; en effet, pour une même cohésion de 46 kPa, mais dans des conditions non drainées, le facteur de sécurité chute de 3 à environ 1,6. En saturant la totalité de la couche marneuse, il faudra observer pour une cohésion donnée, une diminution négligeable, de l'ordre de 6%, du facteur de sécurité. Ce qui signifie que la considération d'une troisième couche (couche 3) est correcte, car la saturation se faisant en fonction de la hauteur de la couche, donc pour que la totalité de la couche se sature, la phase inférieure de la couche serait saturée depuis bien longtemps, et aurait certainement des propriétés moindres que la partie superficielle. Ceci justifie l'hypothèse de rupture en profondeur, donc d'une troisième couche qui provoque la rupture. La surface de rupture est considérée comme étant la même que précédemment.

Par ailleurs, en considérant une cohésion de 26 kPa

pour l'argile marneuse saturée, l'équilibre des forces pour une même tranche a été analysé, et l'évolution des forces sur cette tranche entre période sèche et période humide a été calculée. Cette cohésion de 26 kPa a donné la rupture pour presque toutes les méthodes. Le tableau 6 présente à titre illustratif la différence entre la période sèche et la période humide en termes de diminution de la résistance au cisaillement.

Tableau 6. Exemple d'évolution de la résistance au cisaillement entre période sèche et période humide.

Résistance au cisaillement (kN)	Période sèche	Période Humide
Méthode ordinaire des tranches	556,66	371,44
Méthode de Bishop modifiée	565,05	397,21
Méthode de Janbu	524,14	338,50
Méthode de Morgenstern Price	517,55	333,73

L'analyse du tableau 6 donne une diminution moyenne de 33 % sur la résistance au cisaillement à l'interface roche/sol. Cette diminution est causée par la présence de la nappe d'eau, et de la force qu'elle engendre, et qui diminue la résistance au cisaillement en ce point. Il pourrait donc être conclu que le glissement se passe au niveau de la discontinuité entre le rocher et l'argile marneuse, à cause de la saturation de cette dernière, qui joue le rôle de couche savon, par une diminution de sa cohésion de 50%; ceci déstabilise la totalité du versant et produit un glissement plan.

## 5 RECOMMANDATIONS POUR SOLUTIONS ENVISAGEABLES

Ayant établi la cause du glissement d'Essfiré comme étant la saturation de la couche marneuse et la diminution de ses propriétés mécaniques, la stabilisation du versant devra prendre en considération ces facteurs, et proposer au problème une solution adéquate.

Dans les calculs précédents, le problème d'instabilité du versant a été établi en période humide où les risques de saturation de cette couche d'argile marneuse sont grands, à cause des fortes pluies et de la fonte des neiges. C'est un problème qui n'existe pas en été. La meilleure solution pour assurer la stabilité du versant, serait le drainage de l'eau dans cette région. Cette solution est la meilleure du point de vue économique, et de faisabilité; et elle fournit des résultats satisfaisants.

Ainsi pour garantir la stabilité du versant, il est suggéré de créer une combinaison de systèmes de drainages pour canaliser l'eau, et interdire autant que possible son arrivée à la couche d'argile marneuse et sa saturation. La solution envisagée se décompose en 3 parties: une tranchée drainante en amont, un système de canalisations superficielles, et un réseau de tubes drainants horizontaux, tout le long du versant. La combinaison de tous ces systèmes pourra assurer la stabilité du versant en s'attaquant à la cause principale qui le déstabilise, l'eau en occurrence. Ainsi, l'eau sera «interdite» d'accès à la couche marneuse, ce qui devrait

empêcher sa saturation totale, pour ne pas diminuer ses propriétés mécaniques.

A l'amont du versant se trouvent plusieurs sources d'eau; et cette zone étant constituée de jardins, elle représente une région potentielle de venues d'eau au versant. L'idée de placer une tranchée drainante juste en dessous de cette zone aura pour but d'empêcher les infiltrations d'eau sur le versant, et constituer un rempart pour les venues d'eau. Une tranchée drainante sera donc placée au sommet de la surface de glissement, s'étalant sur la largeur de la partie glissée, et bien au delà. Aussi, pour installer la tranchée drainante à ce point, il faudrait faire converger les tuyaux de drainage vers l'intérieur du versant; car s'il faut canaliser l'eau par pesanteur vers les deux extrémités, il faudra creuser dans le rocher et installer les canalisations, et ceci à de très importantes profondeurs.

La solution optimale serait donc d'installer deux tranchées drainantes convergeant vers le même point qui se situe au niveau le plus bas. Les tuyaux suivront la même pente que le substratum rocheux, et convergeront donc tous les deux au même point. En ce point, une chambre souterraine pour récolter l'eau drainée sera installée.

Pour évacuer l'eau drainée par les tranchées drainantes, il faudrait concevoir un système de conduites superficielles en béton qui conduiront l'eau de l'amont du glissement vers l'aval. Le but de ces conduites est de récupérer l'eau, et de permettre son évacuation et son utilisation de manière intelligente.

Ainsi, cette conduite débute dans la chambre des récolteurs en recueillant l'eau sortie des bacs; et elle descend progressivement sous le sol avec une pente de 2° pour aboutir à l'air libre, et joindre une conduite superficielle qui suit la pente naturelle, et qui descend tout le long de la pente, jusqu'au bas.

Cette conduite au milieu de la zone de glissement, pourra aussi servir pour l'irrigation, dans la mesure où à des points précis de la conduite, des ouvertures seront possibles, pour arroser la terre à volonté. Quand cette conduite rencontre un obstacle, comme une route par exemple, elle s'enfoncé au fond de la terre, continue son chemin en dessous, et ressurgit après l'obstacle. La conduite aboutit enfin à une fosse située au dessus de la route principale, qui récoltera l'eau de la conduite, et l'acheminera au village voisin d'Essfiré, qui se trouve juste en aval, et à une altitude inférieure d'une trentaine de mètres à celle d'Essfiré.

En plus des deux solutions déjà présentées, une troisième solution, à coupler avec les deux autres, pourrait être avancée. Celle-ci consiste en des drains horizontaux tout au long de la zone glissée. Ce grillage de drains qu'il est conseillé d'établir devra empêcher les infiltrations des eaux de pluies ainsi que les eaux d'irrigations non reprises par les racines des arbres plantées dans la région.

Sachant que la région glissée est en grande partie plantée d'arbres fruitiers, ceux-ci ont régulièrement besoin d'être arrosés; les drains seront donc placés sous l'étendue des racines de ces arbres, de manière à récolter l'eau non absorbée par les arbres, et l'empêcher d'atteindre la couche d'argile marneuse. L'eau sera donc récoltée par les drains horizontaux, puis acheminée vers

un récolteur longeant la pente, qui va lui aussi déverser son eau dans la fosse qui conduit l'eau au village voisin situé en aval d'Essfiré.

Avec une combinaison de ces systèmes de drainage, on pourra s'attendre à ce que la couche d'argile marneuse ne se sature pas, et ne perde donc pas ses propriétés mécaniques, notamment sa cohésion. La stabilité du versant sera donc assurée par drainage en tout temps, ce qui ne constituera aucun risque pour les habitants du village, pour leurs maisons, et pour leurs champs.

Vis-à-vis d'autres solutions de stabilisation de ce glissement, le drainage semblait être la solution la plus convaincante. En effet, il serait non recommandable d'utiliser comme moyen de stabilisation un mur de soutènement, ou bien une butée d'enrochements ou de murs gabions, car la quantité de sols déplacés étant très importante et la surface de glissement étant assez profonde, un grand poids de butée serait nécessaire pour la stabilité, ce qui représenterait une quantité énorme de matériaux à utiliser pour assurer cette stabilité. Quand bien même, une tentative de modélisation de la pente avec un mur gabion de 10 m de base et de 10 m de hauteur a été réalisée, les résultats obtenus ont été défavorables. Donc la solution de renforcement par butée devrait être rejetée, car celle-ci serait démesurée et changerait l'aspect extérieur du versant. Par ailleurs, il serait aussi inconcevable d'utiliser des ancrages et des clouages dans le sol, car cela représenterait une solution onéreuse et pourrait nuire à l'aspect naturel du versant.

## 6 CONCLUSIONS

Au terme de ce travail, il faut noter la portée du drainage comme solution à la plupart des glissements de terrain. Aussi, il faut souligner le rôle néfaste qu'a joué l'eau dans l'instabilité du versant d'Essfiré.

En effet, la cause du glissement a été pointée comme étant la saturation de la couche d'argile marneuse qui se trouve en profondeur dans le sol, et qui par le fait même joue le rôle de couche savon sur laquelle glisse tout le versant. Ce dernier étant assez stable sans présence d'eau, sa stabilité se trouve compromise par l'arrivée de l'eau et tout ce que cela peut engendrer comme diminution des propriétés mécaniques du sol, et donc de déclenchement de l'instabilité. L'analyse de la diminution du facteur de sécurité en fonction de la cohésion met en évidence la transformation du comportement de l'argile marneuse sous l'effet de l'eau.

Et à tout problème, une solution, sinon plus. Au problème de l'eau dans les sols, vient le drainage. Un drainage de la région glissée est proposé pour orienter l'eau loin de la couche d'argile marneuse, et la canaliser d'une manière clairvoyante pour être utilisée convenablement par les habitants du village. Le drainage serait la meilleure solution au problème; en plus, cette solution s'impose comme étant la plus économique.

## REFERENCES

Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M.

1996. *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons, USA, 629p.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., and Reichenbach, P. 1995. *GIS-based techniques for mapping landslide hazard*. Edited by A. Carrara and F. Guzzetti. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands: 135-176.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., and Ibsen, M.L. 1996. *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, England. 251p.
- Dubertret, L. 1955. Carte géologique du Liban au 200.000<sup>ème</sup>. Reprint with the financial help of the European Union, Beirut, February 2000.
- Fletcher, L., Hungr, O., and Evans, S.G. 2002. Contrasting failure behavior of two large landslides in clay and silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1): 46-62.
- Popescu, M.E. 2002. Landslide causal factors and landslide remedial options. *Keynote Lecture. Proceedings of the third international conference on landslides, slope stability and safety of infrastructures*, Singapore: 61-81.
- Rahhal, M.E., Nini, R., and Favre, J.L. 2003. Analysis of factors causing slope instabilities, *Proceedings of the 56<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference*, Winnipeg, Manitoba, Canada, Volume 2: 368-375.
- Rahhal, M.E., Nini, R., and Favre, J.L. 2004. Une Approche Simple de la Cartographie du Risque du Glissement de Terrains. *Proceedings of the 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference*, Québec, Canada, Session 5C, pp. 13-18.