

CONCÉPTION D'UN DISPOSITIF DE RÉFECTION DURABLE POUR REMÉDIER À UN GLISSEMENT DE TERRAIN

DESIGN OF A SUSTAINABLE REPAIR DEVISE TO REMEDY SLOPE FAILURE

Tahar Ayadat,
Université de Prince Mohammad Bin Fahd, Al-Khobar, Arabie Saoudite

RÉSUMÉ – La construction est un domaine périlleux. Parmi ces périls on peut citer par exemple les dommages et les désordres survenus dans les propriétés à cause des glissements de terrains. Le glissement d'une pente se produit lorsque les sollicitations déstabilisantes des matériaux du talus, dû à la gravité et les contraintes de cisaillement, dépassent la résistance au cisaillement. Plusieurs facteurs peuvent conduire à l'augmentation des contraintes de cisaillement ou à la diminution de la résistance au cisaillement, incluant l'érosion et altération de la géométrie du talus.

Cette communication représente le cas d'un glissement de terrain sur un tronçon d'une route régionale. Il discute la vérification de la stabilité dudit talus, les causes des désordres observés au niveau du terrain, ainsi que le dispositif de réfection durable et la méthode de sa mise en place. Les mesures correctives ont été conçues selon une perspective de performance, d'adaptabilité et de durabilité.

ABSTRACT – The domain of construction is a perilous area. These perils include for example the damages and disorders occurring in the properties due to slope failure and landslides. Slope failure occurs when destabilizing forces or solicitations acting on slope materials, caused by gravity and shear stresses, exceed the materials' shear strength. Many factors might driving the increase in shear stresses and reducing material shear strength, including erosion and alteration of slope geometry.

This communication represents the case of a slope failure on a section of a regional road. It discusses the slope stability verification, the causes of the disorders observed in the section of the road, and also the sustainable repair method and its implementation. The remedial measures were designed according to a perspective of performance, adaptability and sustainability.

1. Introduction

Le glissement des talus (la rupture des pentes) peut se produire rapidement ou progresser graduellement sur une période de plusieurs années. Les modes de rupture des pentes comprennent : 1- un mouvement de rotation le long d'une surface courbe qui donne un effet d'affaissement, 2- des cales ou des blocs qui se déplacent le long d'une surface plane généralement le long d'une base inclinée, ou 3- une combinaison des deux. Le développement de pressions interstitielles positives, perte de résistance du matériau à cause des intempéries, la déclivité excessive, et la faiblesse des matériaux de fondation contribuent tous à des conditions d'instabilité des pentes.

Dans le présent article une étude de cas d'un glissement de terrain sur un tronçon d'une route régionale d'environ 40,0 m a été menée. L'étude comprend une analyse de la stabilité du talus, le diagnostic des causes du glissement, la proposition de la méthode de réflexion, ainsi que la méthode de mise en place de la solution proposée. Les mesures correctives ont été conçues selon une perspective de performance, d'adaptabilité et de durabilité.

2. Description du problème et du site

Un glissement de terrain s'est produit le 21 avril 2008 sur un tronçon d'une route régionale, reliant deux petites villes ayant une population d'environ 6000 habitants. Le glissement s'est produit dans la partie concave d'un méandre prononcé sur la rive gauche de la rivière adjacente à la route. Il s'agit d'un glissement rotationnel dans un talus argileux de 4 m de hauteur. L'escarpement arrière de la cicatrice a une hauteur de 1,5 m suivant une inclinaison de 52°. La distance minimale entre cet escarpement et la route est d'environ 3 m. Une fissure avec un rejet de 0,25 m n'est située qu'à 0,80 m de la route alors qu'une microfissure a été observée dans l'accotement de la route à 0,30 m de la surface pavée.

La cicatrice du glissement a une largeur de 17 m mesurés parallèlement à la route. Une accumulation de blocs et de cailloux provenant de l'épierrage des champs a été notée en surface du talus et dans les débris. Ceux-ci ont envahi partiellement le lit de la rivière réduisant sa largeur à 1,5 m. On aperçoit à l'avant-plan de cette figure d'importantes marques d'érosion jusqu'à 2 m de hauteur en aval du glissement. L'érosion est moins sévère en amont du glissement jusqu'à l'enrochement qui a été mise en face en 2007 pour réparer un glissement de terrain. Ainsi, 31 m de rive ont été empierrés en 2007. La pente frontale de l'enrochement varie localement entre 31 et 38°. Les marques d'érosion visibles de part et d'autre de la cicatrice du glissement de terrain prouvent que l'action érosive de la rivière a joué un rôle prépondérant dans la survenance du glissement de terrain. La pluie abondante et la fonte de la neige ont aussi contribué à la rupture du talus. Le talus instable s'étend sur une longueur d'une quarantaine de mètres, soit de la fin de l'enrochement en amont de la cicatrice du glissement jusqu'à une distance de 10 m en aval de celle-ci.

Il n'est pas nécessaire de rétablir à court terme l'ancien lit de la rivière malgré le rétrécissement provoqué par les débris du glissement de terrain. La berge droite de la rivière est suffisamment basse pour permettre le libre écoulement de l'eau même si le niveau d'eau de la rivière s'élève momentanément avec les précipitations.

Même si le talus n'est pas très haut (4 à 5 mètres), le glissement, les affaissements et les fissures observés montrent qu'il s'agit d'une rupture de talus de forme circulaire relativement profonde, impliquant une perte de terrain au sommet et émergeant probablement au niveau du lit du cours d'eau.

Le glissement de terrain ayant fait l'objet d'une intervention en 2008 n'avait toujours pas été réparé. La situation s'est même aggravée au fil du temps. Le 17 mai 2011, un autre glissement s'est amorcé au même endroit. Cette amorce s'est développée entre l'enrochement effectué en 2007 et le glissement de terrain qui s'est déclenché en 2008. La mobilisation de la masse de sol a provoqué un déplacement vertical directement dans l'accotement de la route. Ce rejet mesurait jusqu'à 0,5 m sur environ 11,5 m de longueur (Figure 1). Plusieurs autres fissures ponctuelles avec des déplacements verticaux ont été observées dans l'alignement de la fissure principale, en arrière de la cicatrice du glissement qui s'est produit en 2008. L'asphalte se trouve à une distance variant entre 0,3 et 1,3 m de la principale fissure délimitant le début d'un glissement de terrain.

Une campagne de reconnaissance du site du talus (incluant des forages, des essais au laboratoire et une série d'arpentage) a été effectuée en 2011 dans le but d'étudier la stabilité dudit talus. En se basant sur les résultats des forages et du labo, la stratigraphie du terrain a été regroupée en trois horizons :

- Remblai compact à dense de 0,7 m d'épaisseur,
- Argile silteuse ferme de 11,3 m d'épaisseur,
- Till argileux ferme à raide d'une épaisseur $\geq 1,5$ m (rencontré à partir de la profondeur de 12,0 m).



Figure 1. Vue de la fissure avec rejet, apparue le 17 mai 2011.

En se basant sur les résultats des travaux in-situ et au laboratoire, les paramètres physiques et mécaniques à l'état drainé (comportement à long terme) des sols sur place ont été estimés à partir de deux sources, en l'occurrence :

- La littérature technique d'ordre général (parmi d'autres, Das, 1983 ; Bowles, 1997): les paramètres retenus pour les matériaux en place sont généralement admises pour ce type de matériaux dans la littérature technique (Tableau 1).
- Les travaux de Lefebvre (1981) (scenario 2): Ces valeurs (Tableau 1) ont été adoptées en se basant sur la corrélation présentée dans le Tableau 6 de Lefebvre proposée pour paramétrer les dépôts argileux.

Tableau 1: Les caractéristiques utilisées dans les calculs de stabilité du talus

Type de sol	Caractéristiques des sols en place				
	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)		φ' (°)	
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 1	Scenario 2
Remblai	18,0	0		35	
Argile silteuse	17,0	5	7,5	25	31,5
Till	19,0	0		35	

Selon les indications et les conditions d'eau souterraine mesurées dans les piézomètres, l'écoulement semble être hydrostatique. En outre, étant donné que la crépine du tube d'observation dans l'un des forages a été placée dans du till, il est sensé de croire que le niveau d'eau dans le talus est stable à une profondeur d'environ 3,0 m. Cette profondeur a été considérée lors des simulations effectuées pour les analyses de stabilité du talus.

Tel que mentionné, des relevés d'arpentage ont été effectués en 2011 pour établir la géométrie du talus existant. Ainsi, deux (2) coupes types ont été définies afin de bien représenter l'ensemble du talus à l'étude. Les deux coupes (notées sections A et B) sont illustrées sur les Figures 2 et 3.

3. Vérification de la stabilité du talus

Dans le cas de stabilité de talus, il est souvent difficile d'effectuer un calcul à rebours. En effet, il n'est pas évident de modéliser le glissement de terrain qui s'est produit sur place. Il est difficile de s'assurer que le cercle de rupture obtenu par modélisation soit semblable à celui observé sur le terrain.

En se basant sur les paramètres physiques et mécaniques des sols et la géométrie du talus définis précédemment et en tenant compte de la fissure importante apparue le 17 mai 2011 et la partie érodée du talus, une analyse de stabilité du talus a été effectuée. Les calculs de la stabilité du talus ont été réalisés à l'aide du logiciel de calcul SLOPE/W (Géo-Studio 2012) développé par GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Canada. Il est à noter que la vérification de stabilité du talus a été effectuée selon ces deux scénarios.

Aux fins d'analyses, la méthode Morgenstern-Price pour les surfaces générales de glissement a été utilisée. La méthode consiste à déterminer la surface de rupture par glissement rotationnel la plus probable compte tenu de la stratigraphie, de la géométrie de la pente locale et des conditions de l'eau souterraine et d'évaluer le facteur de sécurité associé à ce glissement. Il faut rappeler que dans le cas d'analyses de stabilité, un talus présentant un facteur de sécurité supérieur à 1,3 est jugé stable, en absence du séisme, et 1,15 en cas de séisme. La stabilité à long terme a été vérifiée en conditions drainées sans séisme.

D'après les résultats obtenus, le coefficient de sécurité du talus est près de 1, notamment au niveau de la section A et selon le scénario 1 (Tableau 2). Par conséquent, il est confirmé que le talus est instable nécessitant des remèdes. Il est donc préconiser de procéder à des mesures de stabilisation.

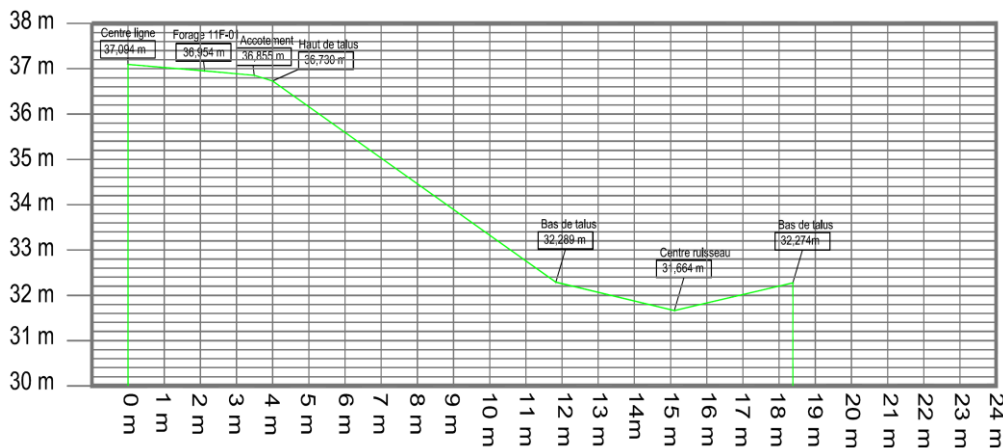


Figure 2. Géométrie du talus au niveau de la section A

Tableau 2 : Valeurs des coefficients de sécurité obtenus

Section	Sans perré		Avec perré			
			Sans clé		Avec clé	
	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 1	Scénario 2
Section A	0,93	1,29	1,20	1,63	1,44	1,91
Section B	1,13	1,53	1,37	1,88	1,69	2,25

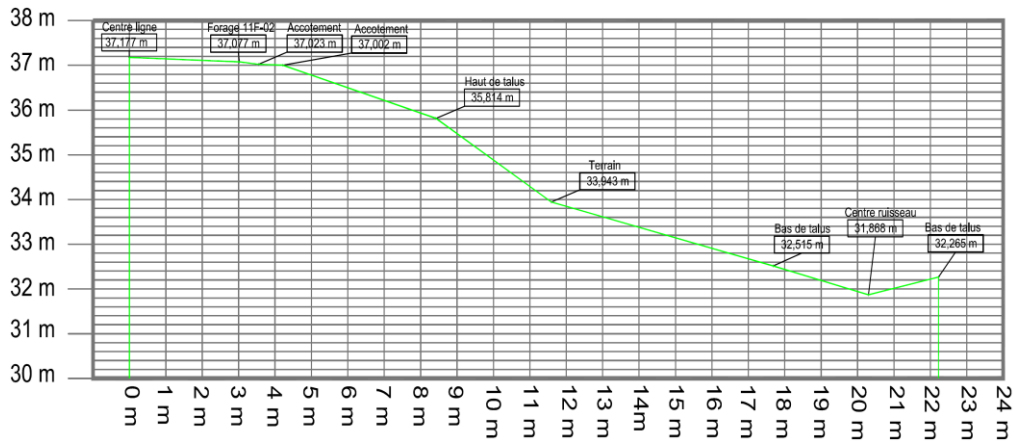


Figure 3. Géométrie du talus au niveau de la section B

Il est important de souligner que le talus étudié était toujours stable pendant plusieurs années. Il était stable même sous l'effet des intempéries et du séisme. En effet, malgré les trois séismes qui se sont produits en 2008 dans un rayon de 1000 kilomètres autour du site à l'étude, le talus n'a subi aucun glissement ou désordre. En outre, ces trois séismes avaient une magnitude inférieure à 2,3 MN, ce qui n'est pas suffisamment élevé pour déclencher un glissement de terrain. En fait, le glissement ne s'est déclenché qu'après l'érosion du terrain au niveau du pied du talus (l'érosion a atteint jusqu'à 2 m de hauteur). En général, deux aspects d'érosion doivent être considérés du point de vue de la stabilité des pentes. Le premier est l'érosion à grande échelle, tel qu'une érosion fluviale se produisant à la base d'une pente (notre cas). Le second est une érosion relativement localisée causée par les eaux souterraines ou les eaux de ruissellement. Dans le premier type, l'érosion peut modifier carrément la géométrie du terrain qui devient potentiellement instable.

4. Solutions proposées et méthodes de mise en place

La prévention principale consiste à empêcher la rupture d'une berge au pied du talus en évitant l'érosion des sols et prévoir une protection globale contre l'érosion afin de garantir la pérennité de l'ouvrage.

Les travaux proposés consistent en la réalisation :

- D'un empierrement à la base de la berge (stabilisation par enrochement par la mise en place d'un contre poids d'enrochement),
- D'un perré en enrochement le long du talus. Il s'agit d'un perré constitué de pierres d'enrochement de calibre 300-400 mm (ayant $D_{50} \approx 350$ mm et une épaisseur minimale de 700 mm), placé selon une pente de 2,0 horizontalement sur 1,0 verticalement (2H : 1V) dans les parties d'accotement de type II. L'enrochement reposera sur une membrane de géotextile (Type III, 60 μ m max.) mise en place à la surface du terrain naturel intact, non remanié, afin de limiter l'érosion du sol à travers les vides des matériaux granulaires d'enrochement.
- D'une clé en enrochement, mise en place à la base de l'empierrement, pour s'assurer d'ancrer le système empierrement-perré sous le plan de rupture.

L'emplacement et la géométrie du perré d'enrochement sont schématisés sur les Figures 4 à 6. Ces figures montrent la géométrie du perré au niveau des sections

d'arpentage réalisés, en l'occurrence sections A et B. Il est important de noter que les coordonnées utilisées pour schématiser ce perré sont les suivantes :

- les élévations du haut et du bas de la face frontale du perré;
- l'inclinaison de la face frontale;
- les dimensions des extrémités du perré et de la clé.

Similairement à l'étude décrite dans précédente, une analyse de stabilité de talus a été réalisée à l'aide du logiciel de calcul SLOPE/W (Géo-Studio 2012) en considérant la stabilisation du talus avec un perré. Deux cas ont été analysés : talus avec perré sans clé et talus avec perré ayant une clé de 1,2 m de hauteur. Le poids volumique et l'angle de résistance au cisaillement (angle de frottement) du perré ont été évalués à $\gamma = 19,0$ kN/m³ et $\varphi' = 40^\circ$.

Les résultats de l'analyse de stabilité de talus avec perré sans clé montrent que le coefficient de sécurité a été légèrement amélioré, mais qu'il reste toujours inférieur à 1,3. Il a été constaté que des cercles de glissement passent légèrement sous l'extrémité inférieure du perré, indiquant la nécessité d'une clé. Les résultats de l'analyse de stabilité de talus avec perré ayant une clé montrent que le coefficient de sécurité est supérieur à 1,3, et ce, même pour le scénario 1 (Tableau 2). Finalement, il est important de noter que si le matériau constituant le perré est modelé ou simulé à un matériau de haute résistance, les valeurs des coefficients de sécurité pour les sections A et B (perré avec clé, scénario 1) sont respectivement de l'ordre de 2,6 et 3,8. Rappelons que, le modèle de haute résistance est utilisé pour simuler un matériau très solide qu'aucune surface de glissement ne se développe à travers le matériau (c'est-à-dire que la clé est modelée comme un mur de soutènement poids).

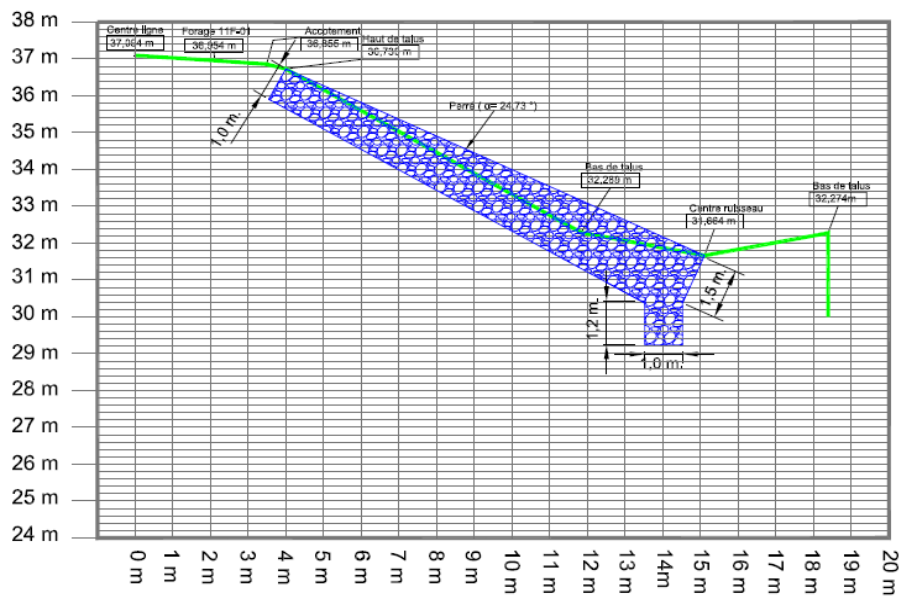


Figure 4. Géométrie du perré au niveau de la section A

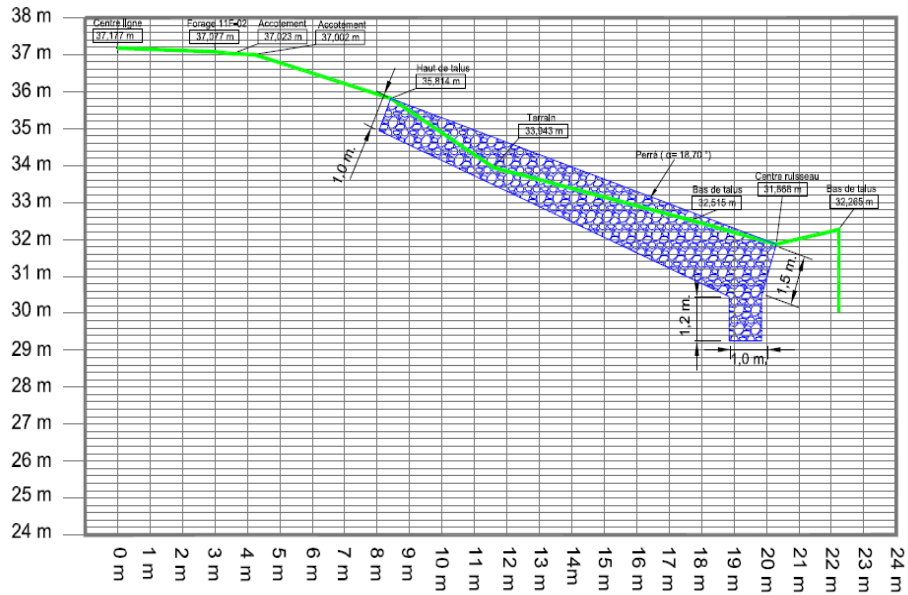


Figure 5. Géométrie du perré au niveau de la section B

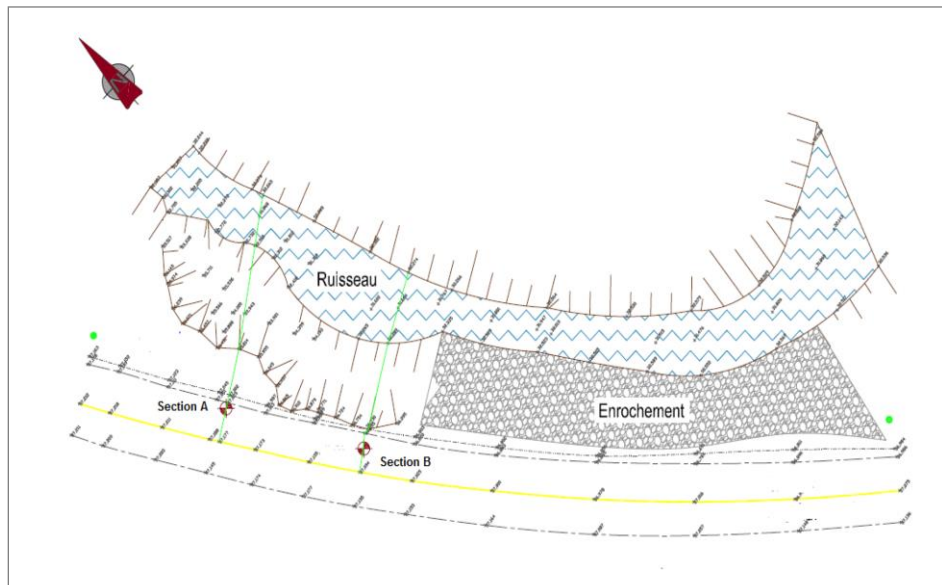


Figure 6. Vue en plan de l'emplacement du perré

Les étapes de construction (de mise en place) sont les suivantes.

- 1- Préparation de la surface et enlèvement des débris de glissement existants.
- 2- Décapage ou reprofilage du la surface du talus, si nécessaire, et préparation du fond de profil pour la mise en place d'une membrane géotextile. La surface préparée du terrain doit être uniforme avant la mise en place de la membrane et du perré d'enrochement.
- 3- La pente de la surface préparée du talus doit être inférieure ou égale aux valeurs indiquées sur Les figures 4 et 5.
- 4- Mise en place d'une membrane de géotextile (type III, 60 μm max.) compatible avec le fond préparé. La méthode d'installation de la membrane de géotextile doit prévoir une largeur suffisante de chevauchement pour la membrane sur le talus. Prévoir d'ancrer la membrane géotextile. Dans le cas de la stabilisation

au niveau de la section A, vu que l'angle de la face inférieure du perré est de l'ordre de 2H : 1V, il est conseillé de prévoir un filtre naturel en sable au lieu d'une membrane de géotextile pour éviter toute possibilité de glissement enrochement-membrane.

- 5- Mise en place d'un coussin de protection en enrochement sur la surface de la membrane géotextile en évitant toute déchirure de cette dernière. La protection d'enrochement doit être placée en moins de deux semaines après la mise en place de la membrane géotextile. La mise en place d'enrochement débute à partir de la base du talus pour avancer vers le haut jusqu'au niveau désiré.
- 6- Le perré doit être constitué de pierres d'enrochement de calibre 300-400 mm (ayant $D_{50} \approx 350$ mm et d'une épaisseur minimale de 1000 mm).
- 7- La construction de la clé en enrochement doit être réalisée par sections de longueurs limitées (par tronçon de 4,0 à 5,0 m). À noter que, pour les excavations réalisées dans le dépôt argileux, les pentes temporaires des excavations ouvertes durant moins de 24 heures pourront être profilées avec des inclinaisons de 1,0 verticalement sur 1,5 horizontalement (1,0V : 1,5H) ou moins abruptement, le tout dépendant de la consistance des matériaux rencontrés localement.

Il faut noter les éléments suivants.

- Il faut prévoir la dérivation du ruisseau existant, si nécessaire, en vue de réaliser les travaux projetés dans des conditions sèches.
- Pendant les travaux de construction durant la période de gel, les sols d'assise exposés doivent être convenablement protégés contre le gel au moyen de matériaux isolants (paille, chauffage ou tout autre moyen adéquat).

5. Conclusion

Un glissement de terrain s'est produit le 21 avril 2008 sur un tronçon d'une route régionale, reliant deux petites villes d'une population d'environ 6000 habitants. Le 17 mai 2011, un autre glissement s'est amorcé au même endroit. Le talus instable s'étend sur une longueur d'une quarantaine de mètres. Les calculs de vérification de la stabilité effectués ont montré que le coefficient de sécurité du talus est de l'ordre de 1. Par conséquent, il est confirmé que le talus est instable nécessitant des remèdes. Il a été constaté que le glissement s'est déclenché après l'érosion du terrain au niveau du pied du talus (l'érosion a atteint jusqu'à 2 m de hauteur). La prévention principale consiste donc à empêcher la rupture d'une berge au pied du talus en évitant l'érosion des sols et prévoir une protection globale contre l'érosion afin de garantir la pérennité de l'ouvrage. Les travaux proposés consistent en la réalisation d'un empierrement à la base de la berge, d'un perré en enrochement le long du talus, et d'une clé en enrochement, mise en place à la base de l'empierrement, pour s'assurer d'ancrer le système empierrement-perré sous le plan de rupture.

5. Références bibliographiques

- Bowles, Joseph E., 1997. Foundation Analysis and Design, 5th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Das, Braja M., 1983. Principles of Foundation Engineering, 7th Edition, Publisher Global Engineering.
- Lefebvre, G, 1981. Fourth Canadian Geotechnical Colloquium: Strength and slope stability in Canadian soft clay deposits, Canadian Geotech. Journal, 18(3), 420-442.