

**Réparation d'urgence d'une route emportée par un glissement  
de terrain dans des argiles sensibles, Saint-Denis-sur-Richelieu,  
Québec**

Maryse Létourneau, ing. M. Sc.  
Service de la géotechnique et de la géologie  
Section des mouvements de terrain  
Ministère des Transports du Québec  
Et

Catherine Thibault , ing. M. Sc.  
Service de la géotechnique et de la géologie  
Section des mouvements de terrain  
Ministère des Transports du Québec

**Communication préparée pour la séance suivante :  
Réparation et reconstruction d'urgence d'infrastructures de  
transport endommagées par des catastrophes  
environnementales**

Congrès de 2014  
de l'Association des transports du Canada,  
Montréal (Québec)

2014-04-30

## **Résumé :**

Au printemps 2011, la vallée de la rivière Richelieu a été touchée par des inondations exceptionnelles, où d'immenses secteurs ont été inondés pendant quelques mois. Lors de cet événement, le débit de pointe a atteint une valeur équivalente à celle d'une crue centennale, engendrant des marques d'érosion sévère à la base de certains talus dans le cours inférieure de la rivière. Le 20 octobre 2011, un glissement de terrain de type rotationnel profond s'est produit en bordure des berges érodées de la rivière, emportant subitement une voie complète de la route 133 à Saint-Denis-sur-Richelieu. Des signes précurseurs, qui sont apparus à la surface du pavage quelques jours avant l'évènement, ont permis de fermer et sécuriser le tronçon de route avant que le glissement de terrain survienne. L'étude du site et la reconstruction de la route ont dû se faire dans un contexte d'urgence, afin de remettre la circulation de véhicules le plus rapidement possible. Plusieurs sondages géotechniques ont été réalisés à l'intérieur et à l'extérieur du glissement de terrain permettant de localiser la surface de rupture et de dimensionner les travaux de stabilisation nécessaire pour la reconstruction du talus et de la route. Les travaux de stabilisation ont consisté en la mise en place d'un empierrement qui agit à la fois comme un contrepoids et une protection contre l'érosion. Une attention particulière a été apportée au défi que pose la présence d'argile sensible, à toutes les étapes de la démarche.

## **Introduction**

Un glissement de terrain de type rotationnel profond s'est produit le 20 octobre 2011 à Saint-Denis-sur-Richelieu, emportant subitement une voie complète de la route 133 (figure 1). Cette route longe la rive droite de la rivière Richelieu qui s'écoule du sud vers le nord (figure 2). Cette configuration de la rivière rend la région très propice aux inondations qui peuvent être entraînées par la formation d'embâcles au printemps lors de la fonte des glaces au sud, alors que le nord est encore gelé. Quelques mois avant le glissement de terrain d'octobre 2011, la vallée de la rivière Richelieu a été inondée pendant plusieurs semaines, ce qui a entraîné une hausse du niveau de la rivière et des débits supérieurs aux limites d'une crue centennale. Cette catastrophe naturelle, caractérisée comme étant la plus longue de l'histoire du Québec selon Environnement Canada, a laissé une marque d'érosion d'environ 2 m de hauteur dans le secteur où est survenu le glissement de terrain (figure 3).

L'intervention d'urgence à la suite du glissement a été limitée à la sécurisation des lieux. Cependant, la phase de rétablissement a duré quelques mois puisque la réparation d'un tel glissement constitue une opération délicate qui doit être supervisée en tout temps par un ingénieur en géotechnique. Le dimensionnement de la stabilisation comprend plusieurs étapes qui doivent être respectées pour assurer la pérennité de l'ouvrage.

Cet article débute par un bref rappel des événements ainsi qu'une description du glissement et de ces causes. Ensuite, il présente l'investigation géotechnique suivie des résultats de l'étude de stabilité consécutive à cet événement comprenant, entre autres, une description des propriétés des sols et des analyses de stabilité effectuées. Ces études ont permis de modéliser le mécanisme de rupture ainsi que de dimensionner la stabilisation et la reconstruction de la route. Les différentes étapes de réalisation des travaux de stabilisation sont ensuite décrites. Les études géotechniques, le dimensionnement et la supervision des travaux ont été réalisés par le Service de la géotechnique et de la géologie (SGG) du ministère des Transports du Québec (MTQ).

## **Bref rappel des événements**

Le site du glissement de Saint-Denis-sur-Richelieu avait été répertorié, il y a quelques années, dans une étude détaillée réalisée par MTQ. Cette étude avait pour but de localiser les sites où les routes 133 et 223, longeant de part et d'autre la rivière Richelieu, sont potentiellement menacées par des glissements de terrain. En raison de la grande quantité de sections de berge nécessitant des travaux de stabilisation et de protection contre l'érosion, le projet a fait l'objet de longues études environnementales ainsi que d'audiences publiques (BAPE, 2011). Pendant les nombreuses années sur lesquelles se sont étalées ces

études, le secteur où est survenu le glissement de terrain de 2011 a fait l'objet d'un suivi visuel afin de relever tous signes précurseurs de glissement de terrain.

Le pavage avait été refait sur la route 133 quelques semaines avant le glissement de l'automne 2011. À l'endroit du site du glissement de terrain, le devers de la courbe avait été modifié et la surface avait été rehaussée en sommet de talus d'une couche de pavage d'environ 0.4 m. Les signes précurseurs d'instabilités, qui étaient présents depuis plusieurs années à la surface du pavage à plusieurs endroits sur la route, n'étaient donc plus visibles. Quelques jours avant le glissement, soit le 17 octobre 2011, une fissure en arc de cercle dans le revêtement a été repérée dans la voie en direction sud lors d'une visite de routine par un surveillant routier du MTQ (figure 4). Le 19 octobre, la fissure présentait un décalage vertical important (de quelques centimètres) (figure 4) ce qui a entraîné la fermeture de la voie en direction sud vis-à-vis la zone fissurée. Le 20 octobre au matin, les représentants locaux du MTQ communiquaient avec le SGG pour leur faire part de ces nouvelles observations. Le glissement de terrain s'est finalement produit vers la fin de l'avant-midi, emportant complètement la voie en direction sud. Sous les recommandations des spécialistes en géotechniques du SGG, la route fût alors immédiatement fermée à la circulation. En plus d'emporter une partie de la route, le glissement fit basculer un poteau de fil électrique supportant un transformateur, ce qui nécessita une intervention d'urgence de la part d'Hydro-Québec pour éviter une rupture de courant dans le secteur.

Une résidence se trouvait à 12.8 m de l'escarpement arrière du glissement (figure 5), ce qui était assez loin pour conclure que celle-ci n'était pas menacée par un éventuel agrandissement du glissement de terrain. En effet, bien que l'argile soit très sensible dans ce secteur, la faible hauteur du talus ne permettait pas le déclenchement d'un processus de forte rétrogression. Un périmètre de sécurité fût installé à dix mètres du pourtour du glissement de terrain (figure 5). Des blocs de béton avaient aussi été placés sur la route à environ dix mètres de part et d'autre du glissement (figure 5) afin d'éviter toute circulation dans le secteur tant que les travaux de réparation du glissement et la reconstruction de la route ne soient complétés.

Au moment de l'intervention d'urgence, les accès au site étaient contrôlés par la Sûreté du Québec, mais gérés par un représentant du MTQ. Des représentants du Ministère de la Sécurité publique se trouvaient aussi sur les lieux pour assurer la coordination avec les citoyens et la municipalité.

### **Description et causes du glissement**

À l'endroit du glissement de terrain, la berge a une hauteur de 6,7 m au-dessus du niveau de la rivière. Le glissement de terrain, de type rotationnel, avait un recul d'environ 5 m, soit du sommet de talus jusqu'à la ligne de centre, et s'étendait sur une distance longitudinale de 39 m (figure 5). Une bonne partie

des débris du glissement, qui étaient très peu remaniés, est restée à l'intérieur de la cicatrice. Ces débris se sont avancés dans la rivière sur une distance d'environ 4 à 5 m. L'escarpement arrière du glissement ne mesurait seulement que 3,4 m de hauteur. À l'intérieur de la cicatrice du glissement, il était possible d'observer les nombreuses couches d'asphalte posées dans le passé. Les figures 6 et 7 montrent que l'asphalte avait une épaisseur d'environ 1,4 m en bordure de la pente, alors qu'elle n'était que de quelques dizaines de centimètres au centre de la chaussée. Cette forte épaisseur du revêtement en bordure de la pente indique que l'ensemble du talus se déformait lentement par fluage depuis quelques décennies.

De façon générale, un glissement de terrain peut survenir lorsque l'ensemble des facteurs prédisposants et aggravants atteint un état critique. Parfois, certains signes révèlent l'amorce d'une rupture dans un talus. Le talus est alors à la limite de sa stabilité et une légère modification des pressions d'eau, de l'érosion à sa base et/ou la mise en place d'une surcharge en sommet de talus peut entraîner sa rupture.

Dans le cas présent, les propriétés géotechniques de l'argile, les pressions d'eau souterraine ascendantes à la base des talus ainsi que la forte inclinaison des pentes étaient des facteurs prédisposant le site aux glissements de terrain. L'érosion sévère du pied du talus, survenue lors de la crue exceptionnelle du printemps précédent, a contribué à la dégradation des conditions de stabilité. Ainsi, les conditions d'eau souterraine, plus défavorables à l'automne suivant, ont suffi au déclenchement du glissement de terrain en octobre 2011. Les calculs de stabilité à rebours du glissement ont démontré que le rôle de la petite couche d'asphalte, ajoutée un mois auparavant, avait été négligeable.

## **Investigation géotechnique**

Une investigation géotechnique détaillée était requise pour permettre l'analyse de la rupture et le dimensionnement des travaux de stabilisation du talus et de reconstruction de la route. Dans les jours suivants le glissement de terrain, des travaux d'adoucissement de l'escarpement arrière ont été exécutés afin de sécuriser le site et de permettre la réalisation des sondages géotechniques à l'intérieur de la cicatrice du glissement (figure 8). Huit sondages au piézocône ont été effectués dans les débris du glissement afin de déterminer la profondeur de sa surface de rupture. Un sondage au piézocône servant de référence et un relevé au scissomètre de chantier ont été réalisés au sommet du talus, du côté opposé à la route. Un forage avec échantillonnage des sols a été réalisé à proximité du site du glissement dans le cadre d'un projet de cartographie de zones potentiellement exposées aux glissements de terrain de la région. La localisation de l'ensemble des sondages est présentée à la figure 9.

La figure 10 présente deux profils de résistance en pointe nette ( $q_t - \sigma_v$ ), mesurée au piézocône, pour les sondages C35061 et C35065. Le premier est localisé en sommet de talus, dans le sol intact et sert de profil de référence avant le glissement. Le second (C35065) a été réalisé au pied du talus, dans les débris du glissement, afin de déterminer la position de la surface de rupture.

Le sondage au piézocône C35061, donne un aperçu de la stratigraphie des sols en place avant l'évènement. En surface, la croûte argileuse a une épaisseur de l'ordre de 3 m. Rencontré sous cette profondeur, le dépôt d'argile marine sensible se poursuit jusqu'à 12,4 m de profondeur sous la route, soit jusqu'à l'élévation 1,3 m (figure 10). Un dépôt stratifié de sols argileux et sableux a été rencontré entre les élévations 1,3 et -1,8 m. Le refus est atteint à cette élévation sur une couche de till très dense.

Un des profils géotechniques réalisés à proximité du site du glissement de terrain est présenté à la figure 11. L'indice de plasticité du dépôt argileux diminue avec la profondeur (de 33 à 10) et l'indice de liquidité est assez élevé, avec des valeurs comprises entre 1,4 et 2,3 (figure 11). La résistance au cisaillement non drainé à l'état remanié montre des valeurs faibles comprises entre 0,3 et 0,9 kPa. La résistance au cisaillement non drainé mesurée au scissomètre donne des valeurs de l'ordre de 40 kPa à partir de la base de la croûte argileuse jusqu'au pied de talus.

Les sondages au piézocône, réalisés à l'intérieur du glissement, ont permis de bien repérer la surface de rupture, comme l'illustre le profil C35065 montré à la figure 10. Celle-ci est identifiée sur cette figure à l'élévation 5,25 m, soit à environ 8,5 m de profondeur par rapport à la surface de la route. Au-dessus de cette altitude, le profil du C35065 indique que les sols sont remaniés, puisque la valeur de «  $q_t - \sigma_v$  » est de l'ordre de 40 % inférieure à celle du sondage de référence C35061. Sous la surface de rupture, les deux profils de résistance se superposent, ce qui indique qu'ils sont tous les deux dans un sol intact sous cette élévation.

## **Étude de stabilité**

Des études de stabilité ont été réalisées à l'aide des logiciels SLOPE/W et SEEP/W de la compagnie Geo Slope international Ltd. Le calcul des coefficients de sécurité a été effectué en utilisant la méthode de Bishop modifiée. Dans le dépôt d'argile intacte, l'angle de frottement interne ( $\Phi'$ ) a été estimé entre 30° et 32° et la cohésion ( $c'$ ), à 7,5 kPa, en suivant les relations proposées par Lefebvre (1981). Les conditions d'eau souterraine sont basées sur trois nids de piézomètres installés près du secteur étudié. Les piézomètres au sommet du talus indiquent un gradient hydraulique descendant d'environ 0,25 tandis que ceux situés à la base présentent un gradient ascendant d'environ 0,30.

La topographie du talus avant le glissement était connue puisqu'un relevé lidar avait été réalisé en 2009. Le profil du glissement ainsi que la bathymétrie de la rivière étaient aussi nécessaires pour effectuer les calculs de stabilité et le dimensionnement de la stabilisation.

La géométrie des lieux avant le glissement ainsi que la position de la surface de rupture étant bien connues, un calcul de stabilité à rebours a été réalisé, de façon à obtenir un coefficient de sécurité de l'ordre de 1 (figure 12). Le cercle qui représente le mieux celui détecté dans les sondages ( $F = 1,12$ ) est montré à la figure 12.

Ces résultats de l'étude à rebours ont ensuite servi à dimensionner les travaux nécessaires à la stabilisation du site, en cherchant à atteindre une augmentation de l'ordre de 30 % du coefficient de sécurité. Les paramètres de résistance considérés dans les débris sont plus faibles que dans les sols intacts pour tenir compte que ces sols ont été complètement déstructurés par le mouvement ( $\Phi'$  de  $25^\circ$  et  $c'$  de 2 kPa). La figure 13 illustre le coefficient de sécurité minimal obtenu pour la pente stabilisée ( $F = 1,35$ ). Une étude hydraulique a aussi été réalisée (Gagné, 2011) afin de déterminer les calibres de pierres à utiliser et les épaisseurs minimums à placer.

### **Travaux de stabilisation**

Les travaux ont été réalisés à l'hiver 2012, quelques mois après le glissement de terrain. La période hivernale est idéale pour réaliser ce genre de travaux puisque la réserve de stabilité des pentes augmente due à la diminution des pressions d'eau dans les talus. De plus, les sols étant gelés, il est plus facile pour la machinerie lourde de circuler sur l'argile. Afin d'assurer la sécurité des travailleurs, les travaux devaient être arrêtés lors de conditions météorologiques défavorables, soit une période de redoux ( $T_{\min} \geq 0^\circ\text{C}$ ) se prolongeant sur une durée de trois jours consécutifs.

Préalablement à la réalisation des travaux, une barrière à sédiment a été installée de manière à capter les particules de sol en suspension dans l'eau afin de limiter l'impact des travaux sur le milieu aquatique.

Les travaux ont d'abord consisté en la reconstruction du talus à l'endroit du glissement, par la mise en place d'un contrepoids stabilisateur en empierrement de calibre 0-250 mm à la base de la pente (figure 14). Dans ce genre de réparation, il est très important que le contrepoids ne repose pas sur des colluvions du glissement de terrain, pour diminuer les risques de réactivation. La reconstruction du talus a nécessité au préalable l'excavation des débris situés à l'endroit de la clé contre l'affouillement, où vient se ficher la base du contrepoids dans l'argile intacte sous le lit de la rivière. Dans le cas présent, la base des matériaux d'enrochement a été excavée jusqu'à l'élévation 4,5 m, soit environ

2,5 m sous le niveau de l'eau. Cette opération était la plus délicate des travaux, car la masse instable des débris ne devait pas être remobilisée pour éviter qu'elle se remette en mouvement.

Cette première étape était également très importante afin d'éviter de compromettre la sécurité des travailleurs. Afin de ne pas déstabiliser le talus, le travail s'est fait par de courtes sections d'au plus 3 à 4 m de longueur, mesurées dans l'axe de la berge (figure 15). Chaque section excavée était rapidement comblée par l'enrochement et aucune section ne devait être laissée ouverte en fin de journée. Une carapace de pierre de calibre 300-500 mm a été placée à la base du contrepoids pour assurer une protection adéquate contre l'érosion (figure 14). Cette carapace a été montée jusqu'à l'élévation de 9,55 m, soit environ 0,3 m plus haut qu'une crue centennale (Gagné, 2011). L'empierrement a ensuite été prolongé au-dessus du contrepoids de façon à reconstruire le talus jusqu'à la structure de la chaussée avec de la pierre de calibre 0-250 mm.

Dans l'optique d'assurer la sécurité des travailleurs, la pelle mécanique devait toujours se positionner vis-à-vis de la section déjà stabilisée et les camions déchargeaient le matériel en arrière de la pelle. Une fois la clé en enrochement réalisée jusqu'à l'élévation 8 m, il était possible de remonter progressivement la pierre jusqu'au profil final (figure 16). La partie supérieure de l'enrochement a été recouverte de sols argileux provenant de l'excavation de la clé afin de favoriser la reprise de la végétation sur la berge (figure 16).

Les travaux de reconstruction du talus se sont déroulés sur une période d'environ 2 semaines permettant ainsi la réouverture de la route. Le pavage final et l'ensemencement du talus se sont déroulés au courant de l'été 2012. La figure 17 présente l'état des lieux environ un an après la fin des travaux. La végétation est bien reprise au-dessus de l'enrochement, donnant un aspect naturel à la berge. Vis-à-vis l'ancienne cicatrice du glissement de terrain, la route se comporte bien et il n'y a aucune déformation dans la chaussée.

## **Conclusions**

Le glissement de Saint-Denis-sur-Richelieu, qui s'est produit à l'automne 2011, entraînant la fermeture complète de la route à cet endroit, a occasionné des désagréments considérables pour la municipalité et des coûts importants pour le MTQ. L'étude du site et la reconstruction de la route ont dû se faire dans un contexte d'urgence, tout en respectant les étapes nécessaires à la réalisation de tels travaux, afin de remettre la circulation de véhicules le plus rapidement possible. Une attention particulière a été apportée à la sécurité des travailleurs, autant à l'étape des investigations géotechniques qu'à celle de la réalisation de l'ouvrage de stabilisation.

Un programme de stabilisation des berges de la rivière Richelieu est actuellement en cours au MTQ. Il a pour objectif de travailler en prévention dans le but d'éviter les situations d'urgence comme celle du glissement de Saint-Denis-sur-Richelieu en octobre 2011. Depuis une dizaine d'année, la rivière a été touchée à de nombreuses reprises par des inondations, ce qui a entraîné une dégradation des berges et une augmentation des déformations visibles sur la route à plusieurs endroits. Pour assurer adéquatement la sécurité de la circulation routière, un plan de surveillance des sites à risque a donc été mis en place. Des formations et un aide-mémoire ont été préparés afin de mieux outiller les surveillants routiers qui sont chargés de cette surveillance.

Le MTQ prend des actions pour gérer le risque relié aux glissements de terrain sur son territoire et ce, en travaillant particulièrement sur le volet prévention de son processus de gestion des risques, ce qui témoigne de son engagement d'assurer la sécurité des usagers de la route (Info-DLC, 2013 et Potvin *et al.*, 2013).

## Référence

Site internet : Environnement Canada : <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=D7CF8BE3-1>

BAPE (2011). Programme de stabilisation des berges de la rivière Richelieu le long des routes 133 et 223 entre Saint-Basile-le-Grand et Saint-Ours, rapport d'enquête et d'audience publique # 278, Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 70 p.

Gagné, A. (2011), Étude hydraulique : Glissement de terrain le long du chemin des Patriotes, Saint-Denis-sur-Richelieu, structures n° P-81440, Ministère des Transports du Québec, 5 p.

Info-DLC (2003). La prévention des glissements de terrain au ministère des Transports du Québec. Vol. 18, n°1.

Lefebvre, G. (1981). Fourth Canadian Geotechnical Colloquium: Strength and Slope Stability in Canadian Soft Clay Deposits, *Can. Geotech. Journal*, Vol. 18, pp. 420-442.

Potvin, J. Thibault C., Demers D., Bilodeau C (2013). An Overview of the Mapping of Landslide-Prone Areas and Risk Management Strategies in the Province of Québec, Canada. Dans *Landslides in Sensitive Clays From Geosciences to Risk Management*, Springer, chap. 26, pp.331-342, 418p.

## Figures



Figure 1 – Vue d'ensemble du glissement du 20 octobre 2011 à Saint-Denis-sur-Richelieu (photo MTQ-PA200001).

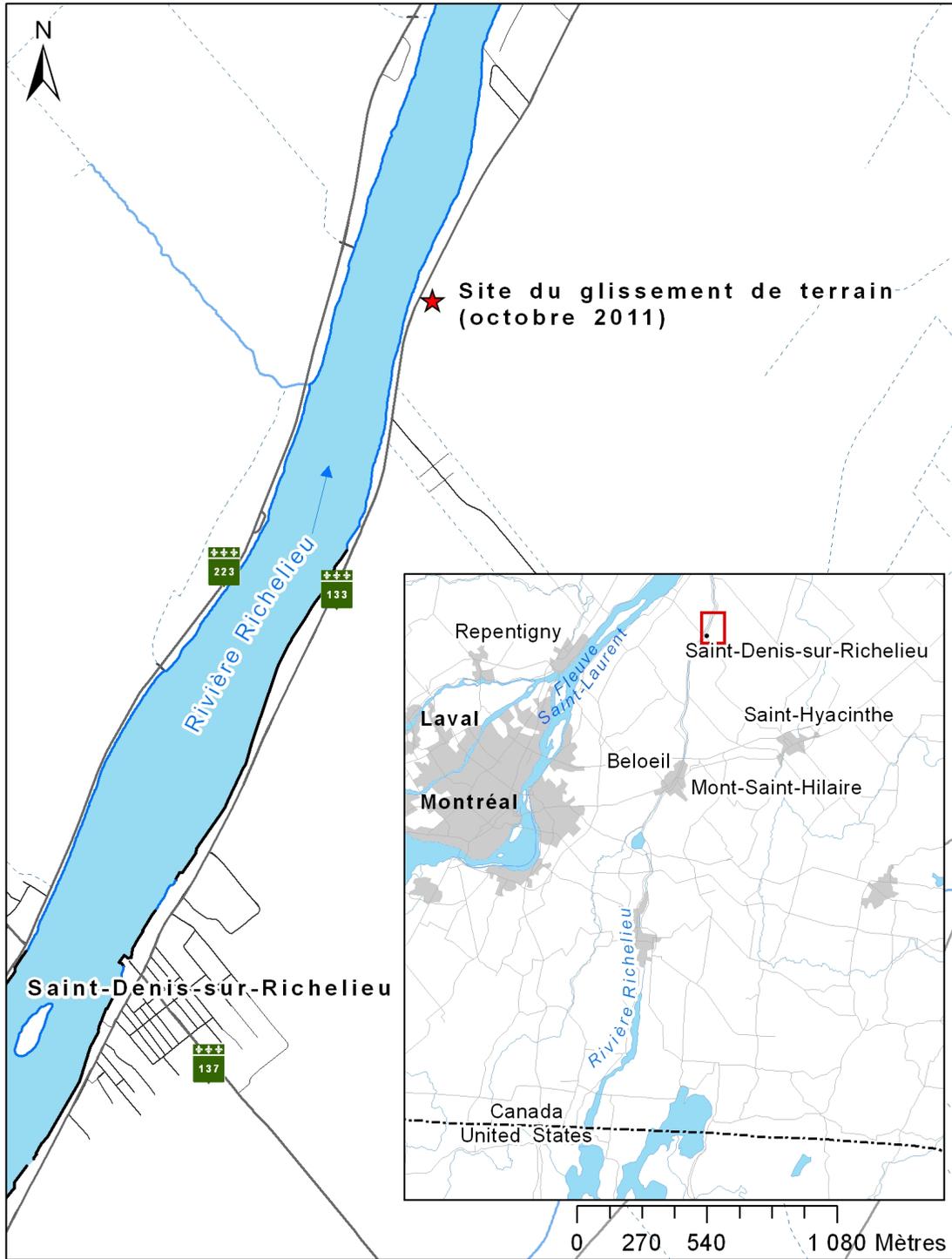


Figure 2– Localisation générale du site du glissement de terrain à Saint-Denis-sur-Richelieu



Figure 3– Vue des berges de la rivière Richelieu, montrant l'effet de l'érosion au pied des berges causée par les inondations du printemps 2011, ainsi qu'un petit glissement de terrain (photo MTQ-DSC02100).



Figure 4– Vue des fissures observées dans le revêtement quelques jours avant le glissement de Saint-Denis-sur-Richelieu (photos du MTQ, les 17 et 19 octobre 2011).

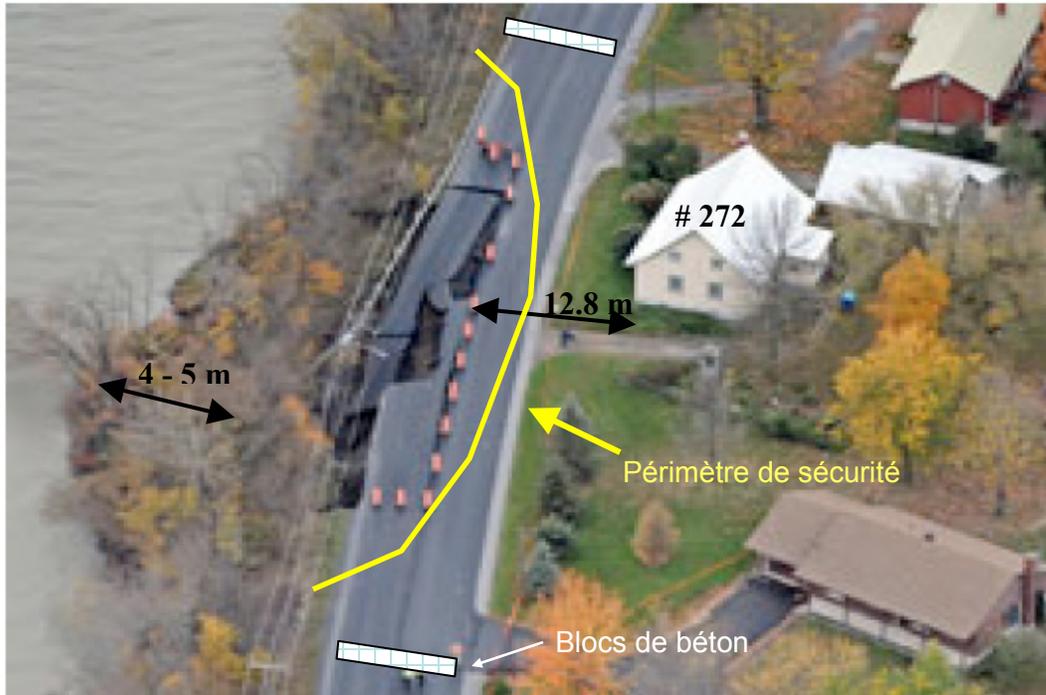


Figure 5– Vue du glissement de terrain de Saint-Denis-sur-Richelieu et des débris qui se sont avancés dans la rivière (Agence QMI, Maxime Landry, 20 octobre 2011).



Figure 6– Épaisseur du revêtement visible dans la cicatrice du glissement de terrain en bordure de la route (photo MTQ-PA200022).



Figure 7– Épaisseur du revêtement visible vers le milieu de la chaussée (photo MTQ-PA250031).



Figure 8– Adoucissement de l'escarpement pour la réalisation de sondages géotechniques dans la cicatrice du glissement de terrain (photo MTQ-PA2600111).

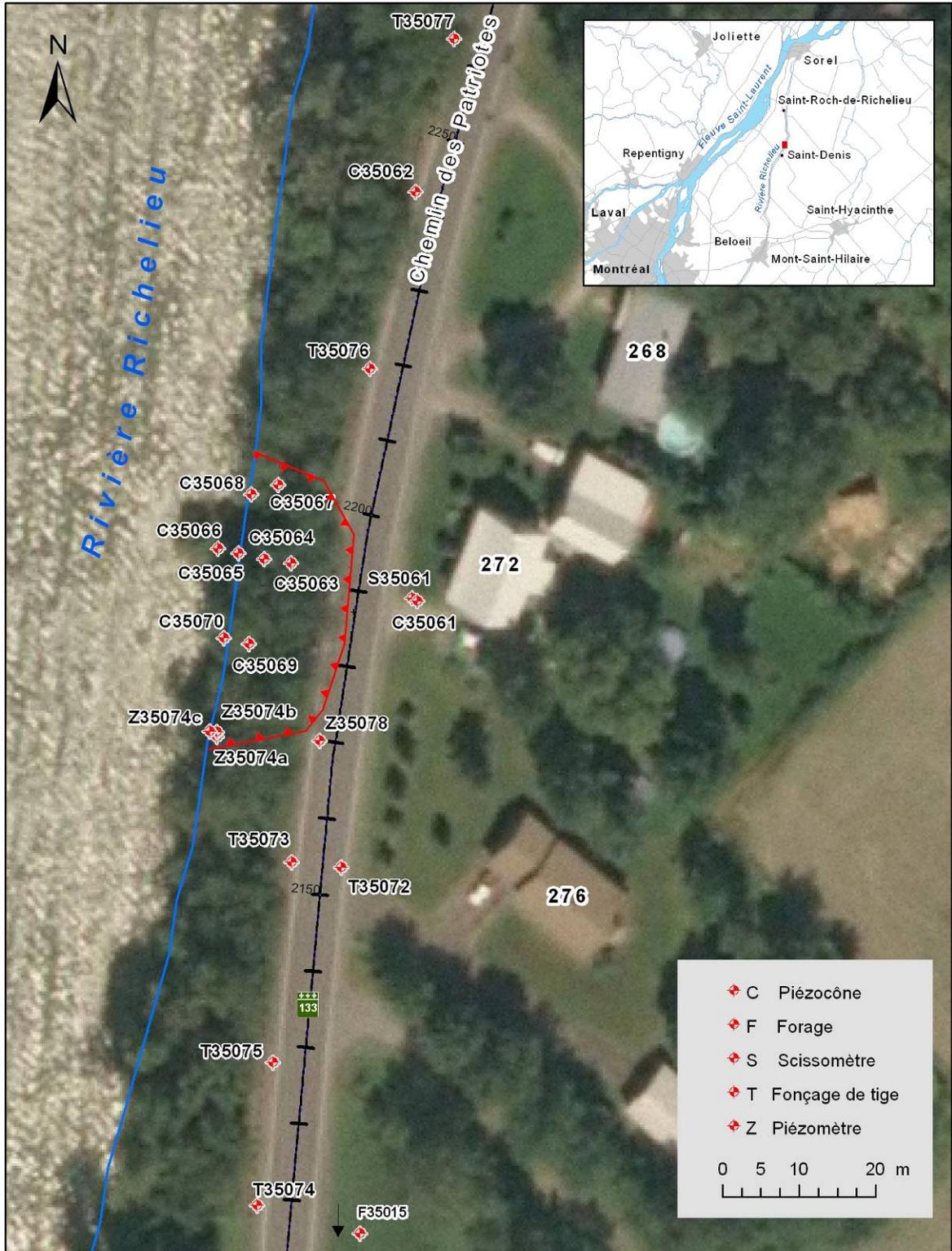


Figure 9– Localisation des sondages réalisés à la suite du glissement (photo Gouvernement du Québec, 2009).

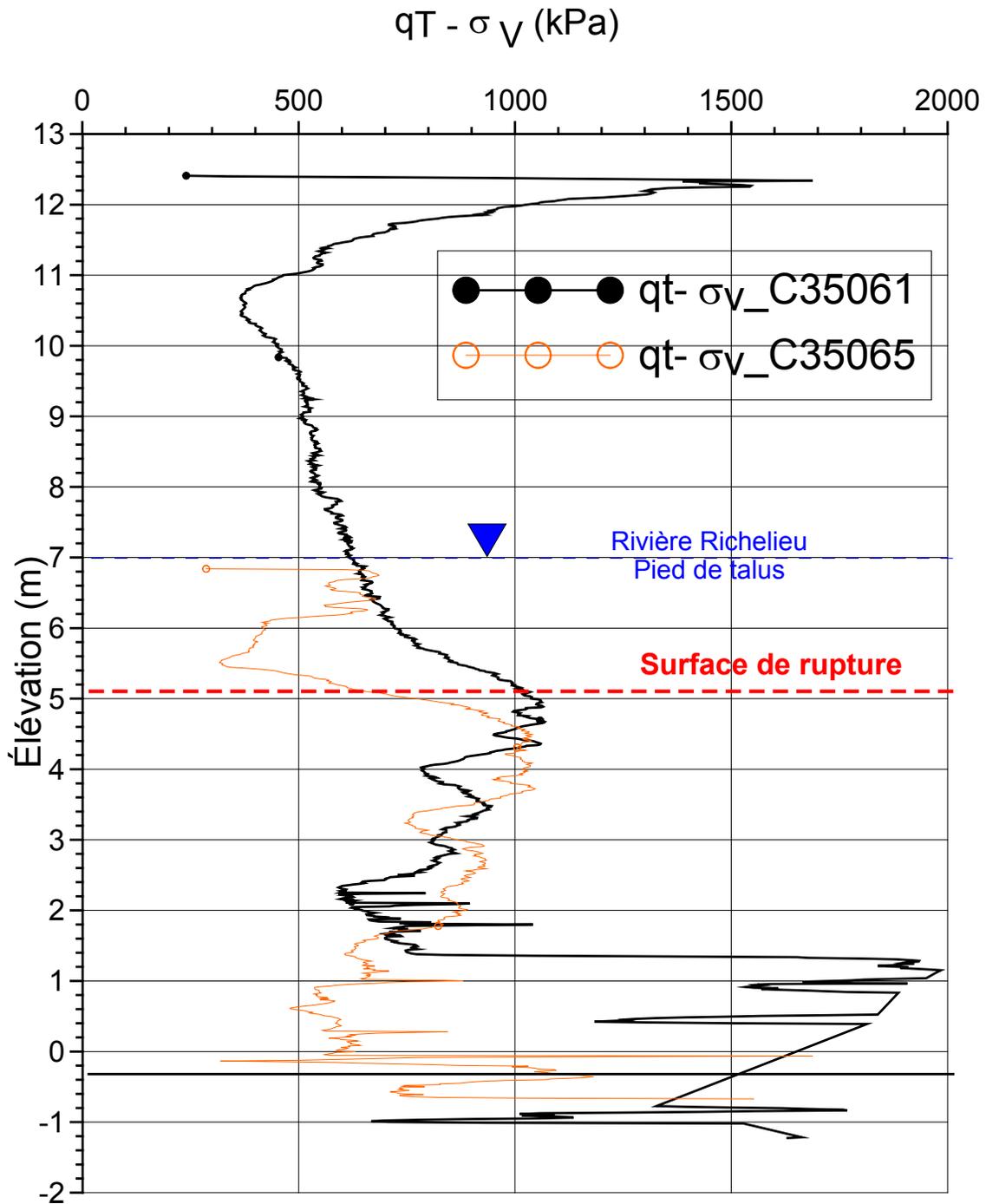


Figure 10– Sondage de référence au piézocône C35061 superposé au sondage C35065 réalisé dans les débris du glissement de terrain.

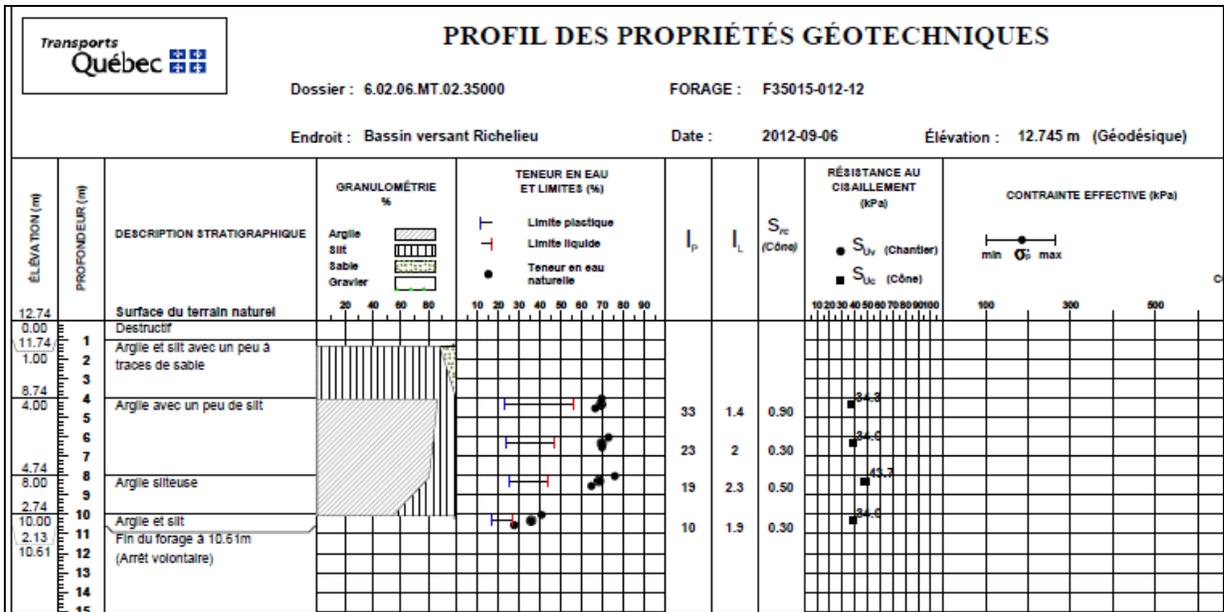


Figure 11– Profil géotechnique réalisé à proximité du site du glissement de terrain, F35015-012-12.

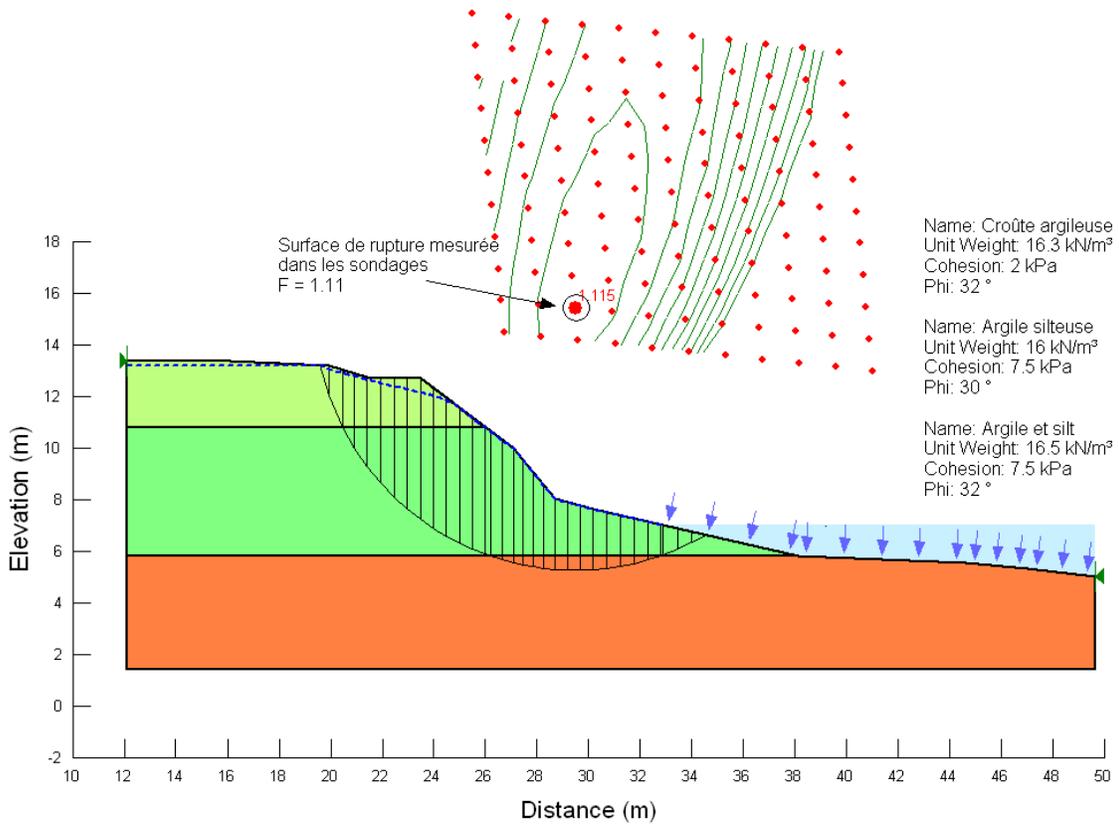


Figure 12– Analyse de stabilité à rebours au site du glissement de terrain.

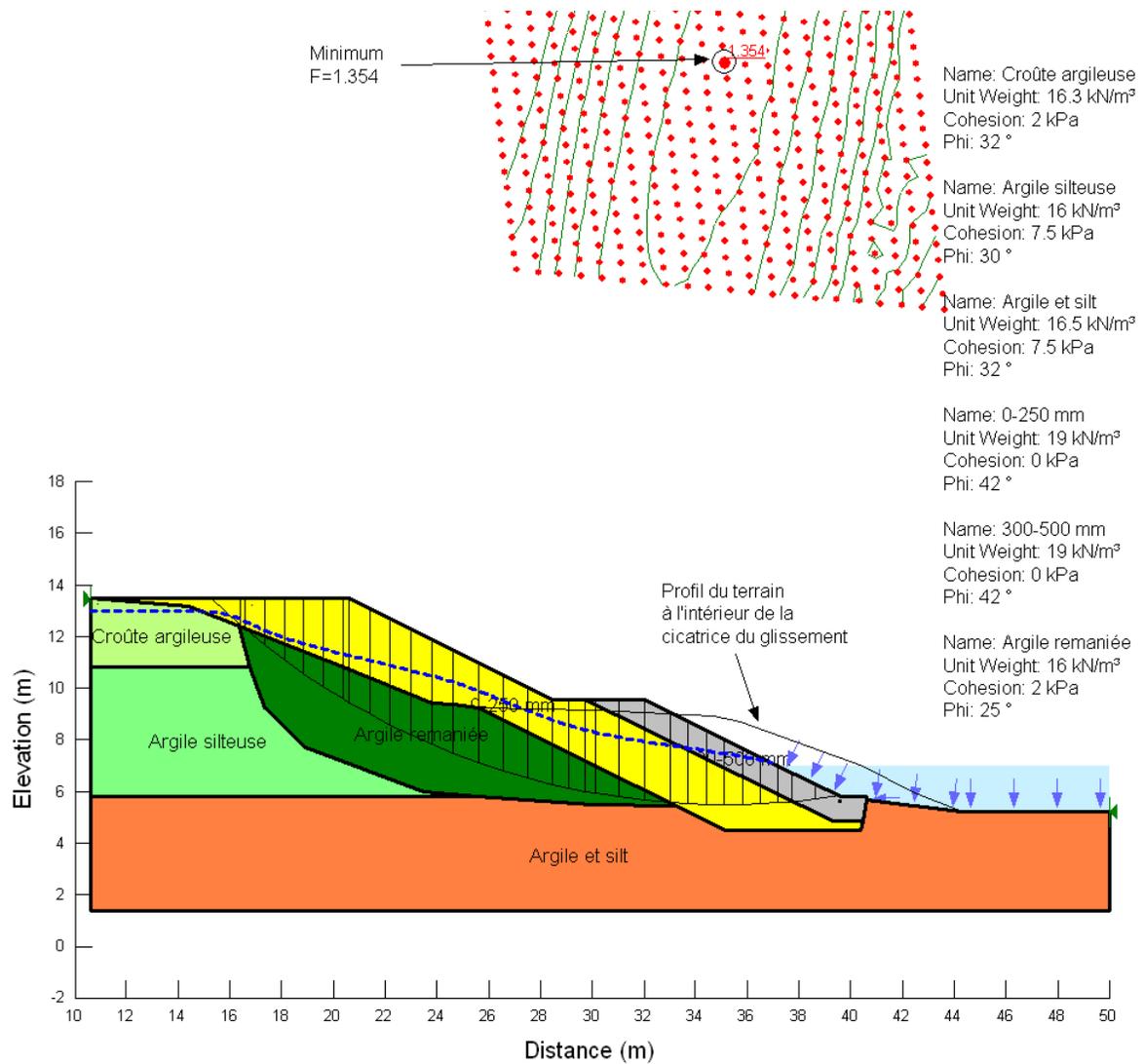


Figure 13 – Calcul de stabilité pour la reconstruction du talus.

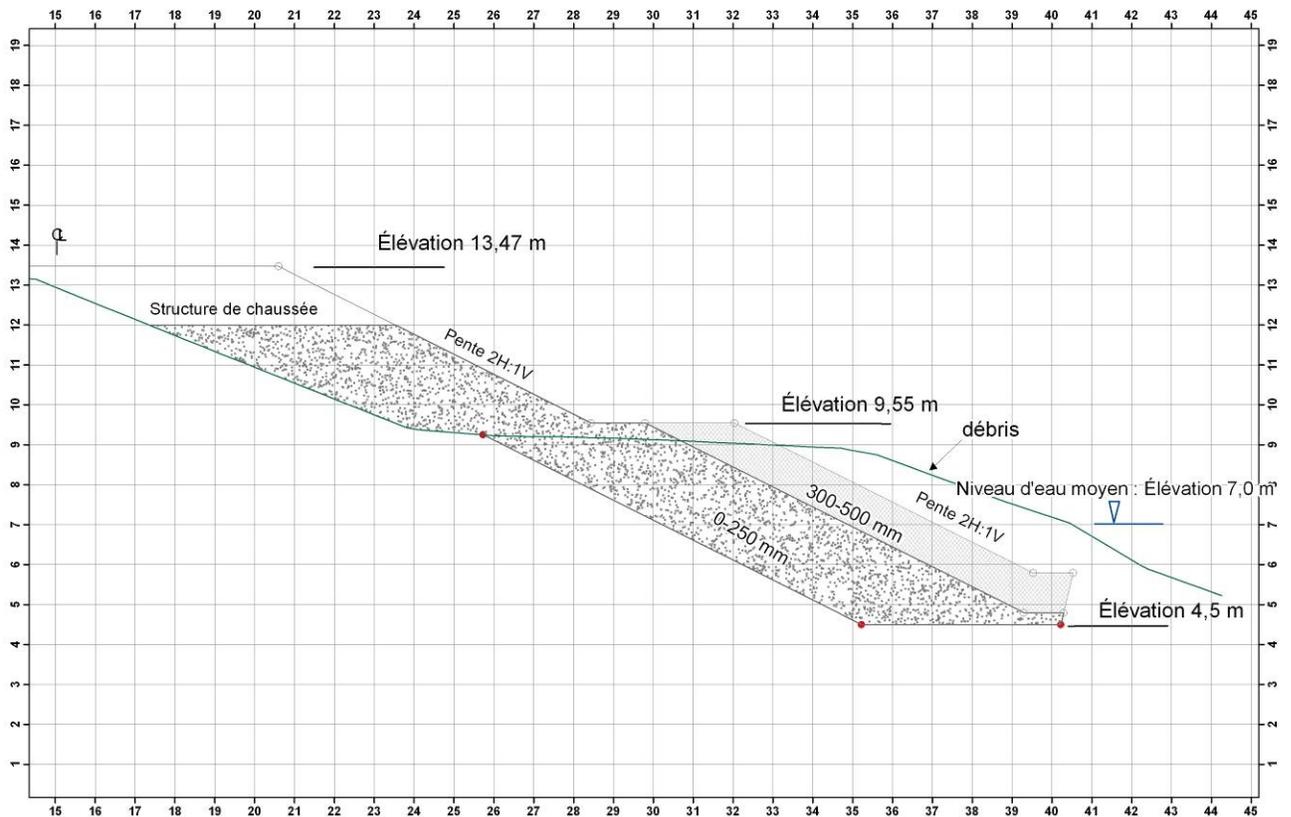


Figure 14 – Conception des travaux de stabilisation pour le site du glissement.



Figure 15 – Mise en place de la clé en enrochement sous le niveau de l'eau et pose simultanée de la carapace contre l'érosion (photo MTQ- P2210025).



Figure 16– Mise en place de la dernière étape d'enrochement (près de la pelle mécanique) et recouvrement par du sol argileux (au premier plan à gauche) (photo MTQ- P2241922).



Figure 17– Route et talus reconstruits, photo prise en juillet 2013 (MTQ)