Nouvelle investigation géotechnique du glissement de terrain de 1971 le long de la rivière de la Nation Sud, Ontario

Alain Durand, Ariane Locat & Serge Leroueil Département de génie civil et de génie des eaux – Université Laval, Québec, Québec, Canada Pascal Locat & Denis Demers Section des mouvements de terrain, Service de la géotechnique et de la géologie, Ministère des Transports, Québec, Québec, Canada

ABSTRACT

A very large landslide, involving approximately 28 hectares, occurred during the night of May 16, 1971, along the South Nation River near the Casselman Village, Ontario. Horsts and Grabens have been identified from the debris analysis inside the landslide scar, typical of spreads in sensitive clay. The Quebec Ministry of Transportation and Laval University are collaborating to undertake a geotechnical investigation in order to characterize the geotechnical properties of soils involved in this landslide. The investigation includes two boreholes, three vane shear tests, and five piezocone tests outside the landslide. Moreover, 11 piezocone tests and two boreholes were performed inside the landslide scar in order to locate the failure surface and characterize the landslide debris. The main results of this geotechnical investigation are presented.

RÉSUMÉ

Un très grand glissement de terrain d'une superficie d'environ 28 hectares s'est produit dans la nuit du 16 au 17 mai 1971, le long de la rivière de la Nation Sud près du village de Casselman, Ontario. L'analyse des débris à l'intérieur de la cicatrice du glissement révèle la présence de horsts et de grabens, typique des étalements dans les argiles sensibles. Le Ministère des Transports du Québec et l'Université Laval collaborent à la réalisation d'une investigation géotechnique afin de caractériser les propriétés géotechniques des sols impliqués dans ce glissement. La campagne comprend deux forages, trois profils d'essais au scissomètre et cinq sondages au piézocône situés à l'extérieur du glissement. De plus, 11 sondages au piézocône et deux forages ont été réalisés à l'intérieur de la cicatrice du glissement afin de détecter la position de la surface de rupture et de caractériser les débris du glissement. Les principaux résultats de cette campagne d'investigation sont présentés.

1 INTRODUCTION

Dans la nuit du 16 au 17 mai 1971, un très grand glissement de terrain s'est produit le long de la rivière de la Nation Sud à environ 6 km au nord du village de Casselman dans la province de l'Ontario, Canada. (fig.1) Impliquant environ 28 ha de terres agricoles et mobilisant plus de $6x10^6$ m³ de débris, ce glissement est l'un des plus importants à survenir le long de cette rivière jusqu'à ce jour. Le lit de la rivière a été comblé par 9 m de débris sur une distance supérieure à 2 km, causant une inondation temporaire en amont (Eden et al., 1971 et Mitchell, 1978). Aucun blessé n'a été répertorié par les autorités suite aux évènements.

La figure 2 présente une photographie aérienne de la cicatrice du glissement prise juste après le glissement. Il est possible de remarquer une succession de bandes vertes relativement intactes, encore recouvertes d'herbe, appelées grabens. Les bandes de sols s'élevant audessus de ces grabens se nomment horsts. La figure 3 présente une photographie prise sur le terrain quelques jours après le glissement. Il est possible d'y observer plus en détail les formes triangulaires séparant les grabens, résultant essentiellement d'un mouvement de translation.

L'angle que fait la pointe du horst présenté à la figure 3 d'environ 60°, valeur correspond est qui approximativement à la rupture active des sols argileux de l'est du Canada (Locat et al., 2011). Ces caractéristiques géomorphologiques sont typiques des étalements, un des deux types de glissement de terrain fortement rétrogressifs majoritairement répertoriés dans les argiles sensibles de l'est du Canada (Cruden et Varnes, 1996 et Demers et al., 2013). Le décès tragique de quatre membres d'une même famille lors de l'étalement latéral de Saint-Jude met en évidence tout le danger relié à ce type de glissement de terrain (Locat et al., 2012).

C'est dans l'optique de mieux comprendre les mécanismes associés à la rupture des étalements que le Ministère des Transports du Québec et l'Université Laval collaborent à la réalisation d'une investigation géotechnique sur le site du glissement de terrain de 1971 au nord du village de Casselman, Ontario.

Cet article présente les principaux résultats de cette investigation géotechnique, réalisée en 2014-2015. Les résultats des observations par photo-interprétation, des essais in situ, des essais en laboratoires ainsi que leur méthodologie respective sont aussi présentés.



2 ANALYSE ANTÉRIEURE AU GLISSEMENT

Le présent glissement a fait l'objet d'une étude dans les années 1970 et les principales conclusions se trouvent dans le rapport de Mitchell (1978). À cette époque, aucune investigation n'avait toutefois été réalisée afin de déterminer la position de la surface de rupture du glissement.

Pour la présente investigation, des courbes de niveaux au mètre ont été réalisées par stéréoscopie, à partir de photographies aérienne à l'échelle du 1/15000 datant de 1969 (A30178, 40 et 41), afin d'établir la topographie avant le glissement. La figure 4 présente le modèle ombragé du terrain ainsi que les courbes de niveau au mètre, lesquelles ont permis de reconstituer la géométrie des pentes du talus près de la rivière.

Selon ce modèle, le sommet du talus était à une élévation d'environ 68 m, valeur assez uniforme sur l'ensemble du site à l'étude, à l'exception d'un ravin situé à l'emplacement de la présente cicatrice (voir fig. 4). Selon l'axe de la coupe AA', représentée à la figure 4, le talus avait une hauteur de 24 m. Près de la rivière, les 8 premiers mètres avaient un angle moyen de 19°. Par la suite, le talus avait une hauteur de 16 m avec un angle moyen de 16°. Un plateau de 15 m de largeur séparait les deux segments du talus. Toutefois, dans la partie sud de la cicatrice, le talus était continu jusqu'à la rivière, avec un angle moyen de 20°.

Le fond de la rivière a été déterminé à partir des plans de bathymétrie au pont enjambant la rivière de la Nation Sud, à 5 km au nord du glissement de 1971 (pont Albert Bélanger situé sur la route 8). L'élévation du fond de la rivière en 1971 se situait donc approximativement à 39,5 m d'élévation par rapport au niveau moyen des mers. La hauteur d'eau moyenne au centre de la rivière est estimée à 4,5 m, correspondant à une élévation moyenne du niveau d'eau de 44 m.







Figure 2. Photographie de la cicatrice du glissement de 1971 prise juste après le glissement (Source : Conservation de la Nation Sud)

3 INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE 2014-2015

La campagne d'investigation géotechnique réalisée conjointement par le Ministère des Transports du Québec et l'Université Laval s'est déroulée en deux phases : l'une à l'automne 2014 et l'autre à l'hiver 2015. La figure 5 présente le modèle ombragé du terrain après le glissement, créé à partir du levé LiDAR (light detection and ranging) réalisé en 2014, ainsi que la position des divers sondages réalisés pour la présente investigation.



Figure 3. Photographie de la cicatrice du glissement de terrain de 1971 prise quelques jours après le glissement. La reconstitution approximative de l'angle du horst est indiquée par la ligne noire. (Source : Conservation de la Nation Sud)

3.1 Sondages à l'extérieur de la cicatrice

La première phase s'est concentrée sur les sols n'ayant pas été mobilisés lors du glissement. Dans cette optique, cinq sondages au piézocône (01, 02, 03, 04 et 13 sur la figure 5) ont été réalisés, afin d'obtenir la stratigraphie générale du site, et trois profils d'essais au scissomètre (01, 03 et 13 sur la figure 5) ont permis de déterminer les valeurs de résistance au cisaillement intactes. Deux nids de piézomètre (01 et 13 sur la figure 5) et plusieurs essais de dissipations lors des sondages au piézocône ont permis d'évaluer les pressions interstitielles dans le massif argileux à différentes profondeurs. Par la suite, deux forages (01 et 13 sur la figure 5) avec échantillonnage (tube à paroi mince de type Shelby de 70 mm de diamètre) ont été réalisés afin d'obtenir des échantillons intacts de sols. Des échantillons de sols remaniés ont aussi été prélevés avec des cuillères fendues pour la portion plus raide en surface ainsi qu'à la base des sols argileux en profondeur, afin de mieux caractériser l'ensemble des dépôts meubles. Les tubes Shelby prélevés ont été soumis à de l'imagerie tomographique (Computer-assisted tomography scan, CAT scan) afin d'obtenir une représentation visuelle de la stratigraphie des échantillons prélevés, avant le détubage. Des essais de teneur en eau, de limites de consistance, de résistances au cisaillement intactes et remaniées, de granulométrie et de consolidation œdométrique ont aussi été réalisés sur ces échantillons.

3.2 Sondage à l'intérieur de la cicatrice

La deuxième phase s'est essentiellement concentrée sur la caractérisation des débris ainsi que l'identification et la caractérisation de la surface de rupture du glissement de terrain. Pour ce faire, 11 sondages au piézocône (05 à 12 et 14 à 16 sur la figure 5) ont été réalisés afin de déterminer l'élévation de la surface de rupture. Deux forages avec échantillonnage (06 et 08 sur la figure 5) ont permis de caractériser les débris ainsi que les sols intacts sous la surface de rupture du glissement. La totalité de ces échantillons ont aussi été soumis à de l'imagerie tomographique (CAT scan). Les échantillons de sol prélevés à l'intérieur de la cicatrice ont été soumis à des essais de teneur en eau, de résistance au cisaillement intacte et remaniée ainsi que des limites de consistance. Ces résultats permettent d'identifier les variations des propriétés géotechniques des débris par rapport au sol situé sous la surface de rupture, donc non mobilisé par le glissement.

4 PROPRIÉTÉES GÉOTECHNIQUES DES SOLS

Le profil du forage 13 (fig. 6), localisé près de l'escarpement arrière du glissement, permet de caractériser les conditions géotechniques avant glissement. Ce profil présente les principaux résultats des essais de terrain et de laboratoire réalisés sur les échantillons de ce forage. Il comprend les valeurs de granulométrie, de teneur en eau (w), les limites de liquidé (w_L) et de plasticité (w_p), les indices de liquidité (I_L), les résistances au cisaillement intactes mesurées au scissomètre (Suv) et au cône suédois (Suc), les résistances au cisaillement remaniées obtenues au cône suédois (Sur), la sensibilitté (St), les pressions interstitielles du piézocône après dissipations (udissip), les pressions interstitielles des piézomètres (u_p), les contraintes effectives (σ'_{v0}) et les contraintes de préconsolidation (σ'_{p}) obtenues à partir des essais œdométriques. À partir des valeurs de résistance en pointe du piézocône (qt), un profil de résistance au cisaillement intacte ainsi qu'un profil de contrainte de préconsolidation ont été déterminés en utilisant respectivement des valeurs de N_{kt} de 15,5 et de Not de 3,2. En combinant les résultats des essais de granulométrie et le profil de résistance en pointe du piézocône (qt), il a été possible d'établir une stratigraphie générale du site 13.



Figure 4 – Modèle ombragé du terrain avant glissement présentant la topographie initiale du glissement et les courbes de niveau au mètre.



Figure 5 – Modèle ombragé du terrain après glissement présentant la localisation des essais géotechniques réalisés pour la campagne 2014-2015. Le fond de carte utilisé est le lidar 2014.

En se basant sur les avant-trous réalisés aux différents sites de forage, une couche de sable silteux fin d'environ 1,5 m a été identifiée en surface.

Sous cette première couche sableuse, le sol est constitué, jusqu'à environ 13 m de profondeur, d'un silt grossier avec trace de sable et présente des interlits d'argile silteuse. Le contenu en argile (diamètre des particules < 2 μ m) de cette couche varie entre 0 et 35 %, le contenu en silt (2 μ m < diamètre des particules < 80 μm) varie entre 45 et 97 % et le contenu en sable (80 μm < diamètre des particules < 5 mm) varie entre 0 et 12 %. La teneur en eau moyenne pour la couche de silt grossier est de 28 %. Le poids volumique moyen du sol saturé est alors d'environ 19 kN/m3, à partir de la teneur en eau moyenne et d'une densité relative des grains de 2,75, typique des argiles sensibles de la mer de Champlain (Leroueil et al., 1983). Le profil du piézocône montre une couche très stratifiée avec des valeurs de résistances en pointe (qt) variant entre 620 et 15 000 kPa. L'argile prélevée à 7 m de profondeur dans un interlit d'ardile silteuse présente une limite de plasticité de 20 % et une limite de liquidité de 45 %. La teneur en eau mesurée est de 58 % et l'indice de liquidité est de 1,5.

Entre 13 et 19 m de profondeur, une couche de silt argileux avec un pourcentage de silt semblable à celui de la couche en surface, mais avec un plus grand pourcentage d'argile a été identifiée. Son contenu en argile varie entre 25 et 50 % et son contenu en silt varie entre 50 et 75 %. Le poids volumique moyen du sol saturé pour cette couche est de 18 kN/m3 et la teneur en eau moyenne de cette couche est de 42 %. Les valeurs de limites de plasticité sont assez constantes, avec une moyenne de 18 %. Les valeurs de limites de liquidité varient entre 26 et 34 % et l'indice de liquidité associé varie entre 1,4 et 1,9. Les valeurs de résistance au cisaillement remaniée mesurées au cône suédois (Sur) sont inférieures à 0,5 kPa pour l'ensemble de la couche, indiquant une très faible résistance au cisaillement remaniée du sol.

Entre 19 m et le refus du piézocône (39,5 m de profondeur) une couche d'argile silteuse a été identifiée. Cette couche présente des rythmites grisâtres-rougeâtres caractéristiques des argiles de cette région (Percival et al., 2001). Le contenu en argile varie entre 60 et 80 %, en augmentant légèrement avec la profondeur. Le contenu en silt varie entre 20 et 40 %, en diminuant avec la profondeur. Deux lits de sable, caractérisés par une



Figure 6 – Profil géotechnique du site de forage 13, présentant la stratigraphie, la granulométrie, les valeurs de teneurs en eau, de résistances au cisaillement intactes et remaniées ainsi que les contraintes effectives et de préconsolidations pour chacune des couches identifiées.

résistance en pointe du piézocône supérieure à 16 000 kPa et une baisse rapide des pressions interstitielles lors du sondage, se trouvent à environ 25,5 et 32 m de profondeur (42,5 et 36 m d'élévation). Suivant le second lit de sable, une diminution des valeurs de résistance en pointe au piézocône indique une couche d'environ 50 cm d'épaisseur, présentant une résistance au cisaillement plus faible (80 kPa). Cette couche a été identifiée sur le profil au piézocône réalisé au site 01 et a été échantillonnée au même site de forage (résultat non présenté ici) avec un tube Shelby. Elle correspond à un interlit de silt argileux de consistance moyenne.

Le profil de résistance au cisaillement intact pour la couche d'argile silteuse, obtenu à partir du piézocône, augmente linéairement de 50 kPa à 140 kPa avec une oscillation de l'ordre de 10 kPa, probablement causée par la rythmicité observée à l'intérieur du dépôt. Les valeurs de résistance au cisaillement obtenues au cône suédois semblent valider celles obtenues à partir du profil du piézocône, mais elles sont plus faibles vers 24 m de profondeur, ce qui pourrait s'expliquer par une moins

bonne qualité des échantillons prélevés plus en profondeur. Les valeurs de sensibilité varient entre 64 et 200 et diminuent à 34 plus en profondeur. Les valeurs de teneur en eau mesurées varient entre 35 et 65 %, en diminuant légèrement avec la profondeur. Le poids volumique moyen pour cette couche est d'environ 17 kN/m3. Les valeurs de limite de plasticité sont relativement constantes, autour de 20 %. Les valeurs de limites de liquidité varient entre 34 et 45 % et l'indice de liquidité associé varie entre 1,4 et 1,7. Les données de dissipations du piézocône prises à la fin septembre 2014 ainsi les valeurs piézométriques prises à la fin octobre 2014, indiquent un gradient descendant. Le profil de contrainte effective, en pointillé, est basé sur ces données de pression d'eau ainsi que celles du poids volumique moyen de chacune des couches. Les valeurs de contrainte de préconsolidation obtenues à partir des essais de consolidation œdométrique semblent confirmer le profil obtenu à partir du piézocône en utilisant un Not de 3,2. À partir de ce même profil, le rapport de préconsolidation se situe autour de 1 jusqu'à 25 m de profondeur, et augmente par la suite jusqu'à 1,5 près du refus.

À 39,5 m de profondeur, une couche de plus grande résistance a été interceptée, correspondant au refus du piézocône. La cuillère fendue prélevée à cette profondeur présente un contenu en argile de 8 %, un contenu en silt de 42 %, un contenu en sable de 23 % et un contenu en gravier de 27 %. Ces éléments laissent croire qu'il s'agit du till qui recouvre le socle rocheux de cette région (Eden et al., 1971).

Les différents sondages au piézocône réalisés dans les environs du glissement montrent une uniformité des dépôts précédemment décrits. En portant attention aux différentes valeurs d'élévation des refus du piézocône, des lits de sable ainsi que du début de la couche d'argile silteuse, il est possible d'identifier un léger pendage positif est-ouest (gain de 3 m d'élévation sur 975 m de distance) et positif nord-sud (gain de 4,5 m d'élévation sur 720 m de distance) dans la déposition des sols aux environs du glissement.

5 MORPHOLOGIE DU GLISSEMENT

La figure 7 présente une coupe selon l'axe AA', illustrée aux figures 4 et 5, selon une exagération verticale de 7 pour 1 à la figure du haut et sans exagération verticale pour celle du bas. La ligne pleine noire représente la topographie initiale établie à partir des courbes de niveau construite à partir des photographies aériennes de 1969. La ligne pointillée blanche représente schématiquement les deux lits de sable interceptés à différentes élévations sur les sites de sondage au piézocône, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la cicatrice. L'interprétation des éléments stratigraphiques du côté opposé au glissement a été réalisée à partir du sondage au piézocône 04, représenté sur la figure 5. Sur la figure 7, cinq sondages au piézocône réalisés à l'intérieur de la cicatrice (09, 10, 14, 06 et 05), ainsi que le piézocône de référence (site 13) sont présentés. La rétrogression maximale du présent glissement, prise à partir du sommet du talus initial selon l'axe AA', est de 485 m. La topographie de 2014 révèle la présence d'une dépression au niveau des débris (entre 225 m et 325 m sur la figure 7), d'environ 7 m. Cette dépression n'est pas visible sur les photographies aériennes prises juste après le glissement. Ce réajustement des débris serait donc postérieur à la rupture et pourrait avoir été causé par la rivière, lors de l'érosion du nouveau lit (voir figure 7). La topographie post-glissement issue du levé LiDAR de 2014, présentée à la figure 7, ne permet pas de distinguer les horsts et les grabens à l'échelle 1 pour 1 (figure du bas), mais certains sont visibles à l'échelle 7 pour 1 (figure du haut).

6 LOCALISATION DE LA SURFACE DE RUPTURE

Afin d'identifier l'élévation de la surface de rupture du présent glissement, représentée par les points bleus sur la figure 7, les profils des piézocônes réalisés à l'intérieur de la cicatrice ont été comparés à celui de référence situé dans les sols intacts à l'arrière du glissement (site du



Figure 7 – Coupe stratigraphique selon l'axe AA' montrant la topographie de 1969 (avant), la topographie de 2014 (après) ainsi que les sondages au piézocône.

sondage 13, voir figures 5 et 7). Lorsque la résistance en pointe obtenue au piézocône (q_t) à l'intérieur des débris, pour une même élévation, s'approche à des valeurs semblables à celles du sondage 13, il est possible de conclure que le sol n'a pas été mobilisé par le glissement, donc qu'il se situe sous la surface de rupture (Demers et al., 1999). La figure 8 présente la comparaison entre le profil au piézocône réalisé au site 09 (débris) ainsi que celui réalisé au site 13 (intact). À partir de cette figure, il est possible d'identifier la surface de rupture à environ 42 m d'élévation pour le site du sondage 09.

La même méthodologie a été appliquée aux autres sondages réalisés à l'intérieur de la cicatrice du glissement de terrain.

Une première surface de rupture débute près de la rivière, à environ 42 m d'élévation, et s'est propagée sur environ 210 m à l'intérieur du talus. Cette surface de rupture a été détectée sur trois piézocônes (09,10 et 08). La deuxième surface de rupture, située à une élévation d'environ 45 m, a été détectée sur trois des quatres piézocônes le long de la coupe AA' (14, 15 et 06) ainsi que sur deux des trois piézocônes en périphérie de cette même ligne (11 et 12).

La deuxième surface semble s'être elle aussi propagée sur une distance d'environ 210 m. Ces deux surfaces de rupture sont quasi-horizontales. Leur jonction a été approximée par la valeur de l'angle de rupture active du sol, correspondant à 45° + ϕ '/2 (Locat et al., 2011). Dans ce cas-ci, la valeur est d'environ 60°, ce qui correspondrait au dernier horst produit par la première surface de rupture.

Une troisième surface de rupture a été détectée au sondage 05, à une élévation de 51 m. Cette dernière semble être limitée à la petite indentation qui forme la dernière partie de la cicatrice (fig. 5), et qui a provoqué un petit recul supplémentaire de 55 m.



Figure 8 – Localisation de la surface de rupture pour le site 09 en comparant les deux profils au piézocône.

7 DISCUSSION

7.1 Géomorphologie des débris

Les caractéristiques géomorphologiques des débris du glissement de Casselman, observées à partir des photographies aériennes ainsi que par les photographies de terrain, ont été décrites par R.J. Mitchell dans son rapport publié sur le présent glissement (Mitchell, 1978). Les formes pointues d'argiles, appelées ici horsts, sont décrites comme étant des « intact pinnacles of grey silty clay ». Les éléments de sol à la surface plane, relativement intact, appelés ici grabens sont décrits comme étant des « intact grass covered blocks [which] have been translated horizontaly away from the backscrap and have dropped verticaly between 8 and 15 meters [...] with extremely little tilt surface ». Cette description géomorphologique effectuée par R.J. Mitchell dans son rapport de 1978 correspond parfaitement au concept de horsts et grabens observés dans les débris de nombreux autres cas d'étalements dans les argiles sensibles de l'est du Canada (Carson, 1977, Tavenas, 1984, Locat et al., 2008 et Fortin-Rhéaume, 2013).

7.2 Mécanisme et profondeur de la rupture

Selon Mitchell (1978) et Eden et al. (1971), les horsts seraient l'évidence d'un mouvement de rotation due à une succession de ruptures circulaires. Les tranchées d'explorations réalisées dans deux horsts de la cicatrice du glissement ont permis de mettre en évidence la stratigraphie essentiellement horizontale des horsts, comme il est possible de le voir à la figure 9. Ce dernier élément, combiné à une propagation quasi-horizontale de la surface de rupture dans le sol intact semble indiquer que le mouvement est translationnel et non rotationnel. Ces observations abondent dans le même sens que Carson (1977), concernant l'absence de rupture circulaire dans le processus de rupture de ce glissement pour la majorité de la rétrogression observée (environ 420 m). Le mécanisme de rupture progressive des argiles sensibles adoptant un comportement anti-écrouissage pourrait donc expliquer la rétrogression observée, tel que décrit par Locat et al. (2011) ainsi que par Locat et al.(2013).

8 CONCLUSION

Le glissement de terrain de Casselman qui s'est produit dans la nuit du 16 au 17 mai 1971 le long de la rivière de la Nation Sud, présente des débris constitués de horsts et de grabens, typiques des étalements dans les argiles sensibles de l'est du Canada. La présente investigation géotechnique a permis de mettre en évidence deux surfaces de rupture quasi-horizontales à 42 et 45 m d'élévation. Les sols impliqués dans le glissement sont un silt argileux et une argile silteuse présentant des rythmites grisâtres-rougeâtres, normalement légèrement à surconsolidée (OCR de 1 à 1,2), avec des indices de liquidité qui varient entre 1,3 et 1,9 et des valeurs de sensibilité qui varient entre 64 et 200. Des essais triaxiaux et des essais de cisaillement direct seront effectués afin

d'évaluer les paramètres de résistance ainsi que le comportement anti-écrouissage du sol. De plus, de la modélisation numérique à partir d'éléments finis sera réalisée afin d'évaluer la possibilité que le processus de rupture progressive ait dicté la propagation quasihorizontale des deux surfaces de rupture et causer la majorité de la rétrogression observée.



Figure 9 – Photographie d'un horst situé à l'est du sondage 07 à l'intérieur de la cicatrice du glissement, prise le 22 janvier 2015. Source : Alain Durand

9 REMERCIEMENTS

Le Projet a été rendu possible grâce à l'implication de la Section des Mouvements de terrain du Ministère des Transports du Québec ainsi que de l'Université Laval. Les auteurs souhaiteraient remercier Tessa Di Iorio de la Conservation de la Nation Sud ainsi que Louis Prévost des Comtés unis de Prescott et Russell pour leur excellente collaboration lors du projet ainsi que pour le partage d'informations et de photographies aériennes du domaine privé. Un remerciement spécial pour les différents propriétaires de terrain approchés lors du projet, spécialement M. Roch Quesnel et M. François Benoît, pour leur autorisation et leur collaboration à la réalisation des sondages. Le support financier du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada se doit aussi d'être souligné.

10 RÉFÉRENCES

- Carson, M.A. 1977. On the retrogression of landslide in sensitive muddy sediments. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 14(4) : 582-602.
- Cruden, D.M. et Varnes D.J. 1996. Landslides types and processes. Dans Landslides, investigation and mitigation. Special Report 247, Transportation Research Board, Nation Research Council, Edited by A.K. Turner and R.L. Schuster, National Academy press, Washington, D.C. pp. 37-75.

- Demers D., Leroueil S. et d'Astous J. 1999. Investigation of a landslide in Maskinongé, Québec. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 36(6) : 1001-1014.
- Demers D., Robitaille D., Locat P. et Potvin J. 2013. Inventory of large landslides in sensitive clays in the province of Quebec, Canada: preliminary analysis. Dans le compte-rendu du 1^{er} Atelier sur les glissements de terrain dans les argiles sensibles. Édité par l'Heureux J-S. et al. Springler.
- Eden W.J., Fletcher E.B. et Mitchell R.J. 1971. South Nation River Landslide, 16 May 1971. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 8(3) : 446-451.
- Fortin-Rhéaume A-A. 2013. Étude de l'étalement latéral de 1988 et des autres glissements de terrain le long de la vallée à Brownsburg-Chatham, Québec. Mémoire M.Sc., Département de génie civil et des eaux, Université Laval, Québec.
- Locat P., Demers D., Robitaille D., Fournier T., Noël F., Leroueil S., Locat A., et Lefebvre G. 2012. The Saint-Jude landslide of May 10, 2012, Québec, Canada. Dans le compte-rendu du *11 th International and 2nd North America Symposium on Landslide*, 3-8 juin 2012, Banff, Alberta. pp.. 635-640.
- Leroueil S., Tavenas F. et LeBihan J.P. 1983. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 20(4) : 681-705
- Locat A., Leroueil S., Bernander S., Demers D., Locat J. et Ouehb L. 2008. Study of a lateral spread failure in an eastern Canada clay deposit in relation with progressive failure : The St-Barnabé-Nord slide. Dans le compte-rendu du *4 th Canadian Conference on Geohazards : From causes to management*. Québec, Que., 20-24 mai 2008. Edited by J. Locat et al. Presses de l'Université Laval, Québec, Que. pp. 89-96.
- Locat A., Leroueil S., Bernander S., Demers D., Jostad H.P., et Ouehb L. 2011. Progressive failures in Eastern Canadian and Scandinavian sensitives clays. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 48(11) : 1696-1712.
- Locat A., Jostad H.P. et Leroueil S. 2013. Numerical modeling of progressive failure and its implication to spreads in sensitive clays. *Revue Canadienne de Géotechnique*. 50(9) : 961-978
- Mitchell R.J. 1978. Earthflow Terrain Evaluation in Ontario, Report RR213, Ministry of Transportations and Communications, Research and Development Division, Edited by Technology Services, Transportation Technology and Energy.
- Percival J.B., Aylsworth J.M. and Fritz A. 2001. Analysis of colour rhythmites in sensitive marine clays (Leda clay) form eastern Canada. Dans le compte-rendu du *12th International Clay Conference*, 22-28 juillet 2001, Bahia Blanca, Argentine.pp : 147-154
- Tavenas F. 1984. Landslide in Canadian sensitive clays a state of the art. Dans le compte-rendu du 4th International symposium on Landslides, Toronto, Ontario, 16-21 septembre 1984. University of Toronto Press, Toronto, Ont. Volume 1, pp : 141-153.