Investigations complémentaires du glissement de terrain de 1993 sur la rivière de la Nation Sud, à Lemieux, Ontario.



ABSTRACT

On June 20, 1993 a landslide with an area of 16.9 hectares and a distance of retrogression of almost 600 meters, occurred on the right bank of the South Nation River in the area of the former townsite of Lemieux, Ontario. The landslide has the feature that some of its parts have broken in the form of horst and graben, in the manner of a lateral spread, while other parts have been completely remoulded as in a flowslide in quick clays. Investigations were carried out recently to clarify the characteristics of the landslide and to better understand the failure mechanisms involved in both types of landslides at this site. This paper presents a review of previous work published by other authors, and results of additional investigations carried out during summer and fall 2014 and winter 2015.

RÉSUMÉ

Le 20 juin 1993, un glissement de terrain d'une superficie de 16,9 hectares et d'une distance de rétrogression de près de 600 mètres s'est produit en rive droite de la rivière de la Nation Sud, dans le secteur de Lemieux, en Ontario. Ce glissement de terrain présente la particularité que certaines de ses portions se sont rompues sous la forme de horsts et de grabens, à la façon d'un étalement dans les argiles sensibles, alors que d'autres portions se sont totalement remaniées à la manière d'une coulée argileuse. Des investigations ont été effectuées récemment afin de préciser les caractéristiques du glissement de terrain, de façon à pouvoir mieux étudier les mécanismes de rupture impliqués. Cet article présente une revue des travaux antérieurs réalisés par d'autres auteurs, et les travaux d'investigation complémentaires réalisés à l'été et à l'automne 2014, ainsi qu'à l'hiver 2015.

1 INTRODUCTION

De très grands glissements de terrain se produisent occasionnellement dans les dépôts argileux postglaciaires qui recouvrent une partie du Québec et de l'Ontario. Ces glissements de terrain sont qualifiés de « fortement rétrogressifs » puisqu'ils peuvent atteindre jusqu'à plusieurs centaines de mètres de recul, et même dans certains cas des reculs de l'ordre du kilomètre, à l'arrière de sommets de talus ou le niveau du terrain est pratiquement plat. Sur la Base d'une compilation historique de ces phénomènes au Québec, Demers et al. (2013) mentionnent qu'il se produirait en moyenne un glissement de terrain fortement rétrogressif tous les 1,7 ans. Ils indiquent aussi que la province de Québec est particulièrement exposée à ce danger naturel, puisque 89% de sa population est installée à l'intérieur des limites des anciennes mers post-glaciaires de Champlain, de Laflamme et de Goldthwait, qui recouvraient en partie son territoire il y a entre environ 13 000 et 10 000 ans (Locat et St-Gelais, 2013). L'analyse présentée par Demers et al. (2013) permet d'observer que la majorité des alissements de terrain fortement rétrogressifs au Québec peuvent-être divisés en deux classes, soient les coulées argileuses et les étalements.

Dans le cadre du mandat de cartographie gouvernementale des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain (Potvin et al. 2013), le Ministère des Transports du Québec compile et caractérise des sites historiques de glissements fortement rétrogressifs afin de mieux connaître leurs caractéristiques géotechniques, d'améliorer les



Figure 1. Localisation générale du secteur étudié, et des glissements de terrain de 1993 à Lemieux et de 1971 le long de la rivière de la Nation Sud.



connaissances à leur sujet, et plus particulièrement de comprendre leurs mécanismes.

C'est dans ce cadre qu'une étude complémentaire du glissement de terrain de Lemieux, qui s'est produit le 20 juin 1993, a été entreprise en 2014, en collaboration avec l'Université Laval.

Ce glissement, dont la distance de rétrogression a atteint environ 600 m en moins d'une heure (Evans et Brooks, 1994), s'est produit en rive droite de la rivière de la Nation Sud, près de l'ancien village de Lemieux, dans le comté de Prescott-Russel en Ontario (Figure 1). Ce site a été retenu parce qu'il était possible de reconstituer de façon assez détaillée les conditions initiales du site par photo-interprétation, de nombreuses photos aériennes étant disponibles antérieurement à l'événement. De plus, le site est facilement accessible et il existe aussi des données antérieures colligées par d'autres auteurs. Du point de vue géotechnique, ce cas est aussi particulièrement intéressant car, malgré son allure de coulée argileuse avec des débris fortement remaniés et transportés sur de grandes distances, de nombreuses portions du terrain se sont disloquées sous la forme de horsts et de grabens, généralement observés dans les glissements de terrain de type étalement. De plus, des horsts ont pu être observés, sur les photos aériennes prises juste après l'événement (CAS-93049) et dans le rapport de Brooks et al. (1994), à travers les débris qui se sont écoulés dans la rivière, jusqu'à des distances de plusieurs centaines de mètres vers l'aval. Ceci constitue un phénomène pratiquement jamais rapporté auparavant pour les cas historiques (Demers et al., 2013).

Aussi, selon les photographies aériennes antérieures à 1993, la berge où s'est amorcé le glissement de terrain était caractérisée par la présence à sa base d'une terrasse formée d'anciens débris de glissement de terrain, qui faisait environ 100 m de largeur (Evans et Brooks, 1994). Habituellement, il est considéré qu'une telle configuration de la berge assure au talus sus-jacent une stabilité relative.



Figure 2. Carte du relief ombragé, secteur de Lemieux. La cicatrice du glissement de terrain de 1993 est délimitée par la ligne en pointillés blancs. Les courbes de niveau sont aux 2 mètres. Les points rouges indiquent la position des sondages. La ou les lettres devant chaque numéro de sondage indiquent le type de sondage réalisé à cet endroit soit : « C » pour piézocône, « F » pour forage, « S » pour scissomètre et « Z » pour nids de piézomètres. Les lignes rouges localisent les sections topographiques qui sont montrées aux Figures 3 et 4. Les lettres « A » et « B » indiquent les restants d'une ancienne cicatrice. La lettre R indique la position de l'affleurement rocheux au sud de l'embouchure du glissement de terrain. L'objectif du présent article est de présenter et de discuter des premiers résultats de l'investigation réalisée dans le cadre de la présente étude. Les données antérieures sont aussi résumées.

2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le glissement de terrain est situé approximativement dans le centre du bassin de la partie ouest de l'ancienne mer de Champlain, qui couvrait le sud du Québec et l'extrémité est de l'Ontario, entre environ 10 000 et 12 000 ans BP (Karrow et Occhietti, 1989).

La terrasse du secteur Casselman-Lemieux fait partie des restants d'un complexe deltaïque qui a été construit par la proto-rivière des Outaouais et ses tributaires lors du retrait progressif de la mer de Champlain (Gadd, 1976; Fransham et Gadd, 1977; Richard, 1982; Chapman et Putnam, 1984).

Dans ce secteur, les sédiments marins argileux sont recouverts d'une séquence typique de progradation deltaïque, où les sols plus argileux de la base deviennent intercalés, puis remplacés progressivement vers le haut par des sédiments plus grossiers. Entre les glissements de 1971 (Eden et al., 1971; Mitchell, 1978) et de 1993 (Figure 1), cette terrasse présente une élévation moyenne d'environ 68 m d'altitude. Au site même du glissement de 1993, la crête du talus est à l'élévation moyenne de 67 m et le niveau de l'eau de la rivière Nation Sud était à une altitude de 43,9 m lors du levé lidar de mai 2014, ce qui donne une hauteur de berge d'environ 23 m.

Selon les relevés bathymétriques disponibles à l'endroit du pont de la route n° 8, situé à environ un demi kilomètre en amont (Figure 2), le fond de la rivière devait approximativement l'élévation être à 39.5 m (communication personnelle de Louis Prévost, Comtés unis de Prescott-Russell). La hauteur totale de la berge à partir du fond de la rivière devait donc être d'environ 27,5 m. Toutefois, immédiatement en amont du site du glissement, il y a un affleurement rocheux en bordure de la rivière dont la surface exposée est à l'altitude de 45,5 m. Cet affleurement, qui traverse la rivière sous l'eau, provoque juste en amont un léger rehaussement du niveau d'eau de la rivière à l'élévation de 44,4 m.

L'analyse des photos aériennes antérieures à l'événement (photos de 1991, 1969 et 1948) fournit quelques éléments qui permettent de caractériser la berge à l'endroit où s'est amorcé le glissement de terrain de 1993. Premièrement, le talus présentait déjà une relativement importante d'un glissement cicatrice antérieur, tel que mentionné précédemment. D'après les restes de cette cicatrice, visibles sur le levé lidar de part et d'autre du glissement de 1993 (Figure 2), la berge présentait à cet endroit un plateau intermédiaire, à l'altitude moyenne de 58 m, constitué d'anciens débris de glissement de terrain. Le talus au bout de ce plateau, d'une hauteur d'environ 14 à 16 m par rapport au niveau de l'eau (Figure 3), était fortement soumis à l'érosion de la rivière, la berge apparaissant très dénudée sur certaines photos juste en aval de l'affleurement rocheux, directement au site où s'est amorcé le glissement de terrain de 1993.

Mesurées à partir du levé lidar et de la photorestitution du terrain à partir de photographies aériennes de 1991, les dimensions détaillées de la cicatrice du glissement de 1993 sont un recul total de 680 m, mesuré à partir de la rive, une rétrogression de 560 m, mesurée à partir de la crête du talus intact, une largeur de 275 m au niveau du goulot et de 145 m dans la partie terminale, et une superficie totale de 16,9 ha, dont 14,5 ha de terrain plat.

3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

Le glissement de 1993 à Lemieux a été étudié et décrit par différents chercheurs de la Commission géologique du Canada. D'abord rapporté de façon essentiellement descriptive (Brooks et al., 1994, Evans et Brooks, 1994; Lawrence et al., 1996), le site a fait l'objet par la suite de quelques investigations géotechniques et géophysiques en 1996 (Aylsworth et al., 1997; 2001), qui ont permis de caractériser la stratigraphie du site, les propriétés géotechniques des sols, ainsi que la topographie du socle rocheux. Toutefois, aucun sondage n'avait été réalisé à l'intérieur de la cicatrice pour déterminer précisément la position de la surface de rupture.

Les résultats rapportés par Alysworth et al. (2001) indiquent la présence de couches d'argile sensible à partir d'environ 20 m de profondeur. Entre cette profondeur et celle correspondant approximativement au fond du cours d'eau (max. 28 m), les plus fortes valeurs d'indice de liquidité mesurées variaient de 1,1 à 1,6. Les auteurs indiquent la présence d'un rubanement typique de couches d'argile grises et roses. Percival et al. (2001) ont propriétés étudié les physiques, chimiques et minéralogiques de ces rubanements et ils concluent qu'il n'y a pas de différence significative entre ces couches de couleur différente, sauf au niveau granulométrique, les roses ayant un pourcentage plus élevé de particules fines. Fransham et Gadd (1977) avaient aussi observés que par rapport aux couches grises, les couches roses avaient tendance à être plus finement grenues, ainsi qu'à avoir des teneurs en eau et des limites de liquidité et de plasticité plus élevées.

Aylsworth et al. (2001) présentent deux coupes stratigraphiques au site du glissement de Lemieux, l'une perpendiculaire à l'autre. La position du socle rocheux forme une fosse beaucoup plus profonde sous la crête de la berge initiale. Mais en s'éloignant vers l'arrière, ainsi qu'en direction sud, le roc remonte plus près de la surface de façon assez abrupte, aux environs de l'élévation 54 m, soit environ une dizaine de mètres plus haut que la surface de la rivière.

Les auteurs précédemment cités indiquent qu'aucun élément déclencheur particulier n'a pu être identifié pour le glissement de 1993. Ils mentionnent toutefois une nappe d'eau près de la surface au moment de l'événement (Brooks et al. 1994), résultant de conditions météorologiques printanières beaucoup plus défavorables que la normale. Par ailleurs, ceux-ci mentionnent aussi qu'un témoin aurait vu un petit glissement sur la berge de la rivière, près du site, environ une semaine avant l'événement.

4 INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES

La récente campagne d'investigation géotechnique a été réalisée en collaboration avec l'Université Laval au cours de l'été et de l'automne 2014, ainsi qu'à l'hiver 2015. Aussi, un levé lidar a été réalisé le long de la rivière de la Nation Sud, en collaboration avec le comté de Prescott-Russell et l'organisme de Conservation de la Nation Sud en mai 2014.

Lors des investigations antérieures, le piézocône n'avait pas été utilisé. Les récentes investigations présentées dans cet article, et particulièrement celles menées avec le piézocône, complètent et précisent certaines observations ou certains paramètres qui avaient déjà été présentés par d'autres auteurs dans les études antérieures concernant ce site.

4.1 Levé lidar

Le levé lidar dans la région des Comtés Unis de Prescott et Russell a été réalisé du 8 au 11 mai 2014. Il a permis d'obtenir une image très précise de la morphologie actuelle du terrain, au pourtour et à l'intérieur de la cicatrice du glissement de terrain de Lemieux.

La Figure 2 présente les données lidar sous la forme d'un relief ombragé sur lequel ont été superposées les courbes de niveau aux 2 mètres. Cette figure permet de constater que le glissement de 1993 a clairement recoupé une ancienne cicatrice qui était présente au niveau de la berge. Les restes de cette cicatrice, indiqués par « A » et « B » sur la Figure 2, sont observables de part et d'autre de l'embouchure du glissement de 1993, sous la forme de terrasses qui sont légèrement plus hautes de 3 à 4 m par rapport à l'élévation du dessus des débris du glissement de 1993.

Les données topographiques obtenues du lidar ont été utilisées pour réaliser les coupes topographiques localisées sur la Figure 2 et montrées aux Figures 3 et 4. Le profil du terrain avant glissement sur les coupes a été estimé à partir de l'élévation générale des plateaux environnant qui sont autour de la cicatrice de 1993.



Figure 3. Section topographique au centre de la cicatrice (Est-Ouest) localisée sur la Figure 2. Les sondages utilisés pour déterminer la position des différents éléments présentés sont indiqués par leur numéro et une flèche pointant vers le bas. L'exagération verticale est de 3x.



Figure 4. Section topographique transversale (nord-sud) localisée sur la Figure 2. Les sondages utilisés pour déterminer la position des différents éléments présentés sont indiqués par leur numéro et une flèche pointant vers le bas. L'exagération verticale est de 3x.

La forme de la berge a été estimée en se basant sur les photographies aériennes antérieures au glissement de terrain et sur la forme du talus situé directement en amont de l'embouchure du glissement (Figure 2).

4.2 Sondages et forages

La campagne d'investigation géotechnique s'est déroulée en deux phases, l'une de la fin de l'été jusqu'à l'automne 2014 pour les sites à l'extérieur de la cicatrice, et l'autre à l'hiver 2015, principalement pour les sites à l'intérieur de la cicatrice, où des chemins d'accès sur la neige et les sols gelés ont pu être aménagés. La position des sondages est montrée à la Figure 2.

4.2.1 Sondages à l'extérieur de la cicatrice

Les sites de sondages situés à l'extérieur de la cicatrice (sites 20 à 24 inclusivement) comprennent cinq piézocônes réalisés jusqu'au refus à l'enfoncement, deux forages avec récupération d'échantillons, deux scissomètres et deux nids de piézomètres. Ces sondages ont permis de caractériser la stratigraphie, les paramètres physiques, les valeurs de résistance au cisaillement non drainé des sols, à l'état intact et remanié, ainsi que les conditions hydrogéologiques du site. Au niveau des forages F21 (Figures 2 et 5) et F22 (Figure 2), des échantillons ont été récupérés à l'aide de tubes à paroi mince de 70 mm de diamètre. Ces échantillons ont par la suite été soumis au CT-Scan de l'INRS à Québec avant d'être extrudés en laboratoire. Des échantillons de sol ont aussi été prélevés à l'aide de cuillères fendues dans les niveaux de sols granulaires, ou lorsqu'il était impossible d'échantillonner à l'aide d'un tube à paroi mince. Des essais de teneur en eau, de granulométrie, de limites de consistance, de résistance au cisaillement non drainé à l'état intact et remanié, de consolidation œdométrique et de perméabilité ont été réalisés sur ces échantillons.

4.2.2 Sondages à l'intérieur de la cicatrice

Onze piézocônes ont été réalisés jusqu'au refus à l'intérieur de la cicatrice (sites 25 à 35 inclusivement, Figures 2, 3 et 4). Ils ont permis de caractériser la stratigraphie, les valeurs de résistance en pointe des sols en place, ainsi que les pressions interstitielles dans les couches drainantes, là où il a été possible de réaliser des essais de dissipation.

	Description des unités Élévation du t.n.: 67.78 m				q_t et u (kPa) 1000 3000			Granulométrie (%)				e	Teneur en eau et limites (%)				 P	Ľ	Sur	Résistance S _u intacte (kPa) 50 100			Contraintes effectives (kPa) 200 400				
								25 50 75				20 40 60 80					(kPa)										
-	-	Sable silteux	Е		,	┝╍┼									╸╷	+•	++				I	+•				+	-+
65-		Silt avec traces à un peu			-			<u>_</u>		 					•	I I I						1 				 	- -
-60		d'argile et de sable,stratifié de lits d'argile	D						T T	l T			- •	• 	 	 	13	1.0			 				 		
	10-	et de sable γ =19,2 kN/m ³					-			.		- ⊥ 	-	⊐ ⊥ ا	I♥ _ _ 		 	°	1.7			 _ 	ا . ا ا		'	⊥ ⊥ ∖	
55-	-	Argile silteuse à			3							-		H-	•*\$	- I	1	16	1.0	1.1	٠	I.	I.		Ļ	N	OCR -
-	15-	couleur grise,	c	ALM.						-1		1		. <u>}</u>	_ <u>+</u> •	•	 	16	1.3	0.9	•	∣ ⊣ X −	 		4	ו +1−	_¦ _≠
		bandes rougeâtres,			MeML			-1						H	k ee	• •	2	5.9	1.9	0.2	•	×,	Ì			4	0.9
⁵⁰⁻	Ê -	de silt						-		 				ŀ	╼╻┾╺	, I 		12	1.7	0.3	•	¦x,				11	-
<u>ب</u>	100- 15 -	$\gamma = 17,4$ KN/III ⁻			- 1		- T			-				- 7		•		16	1.6	0.3	•	T×Ĩ	· _ ·			⊺+ '	0.9
45-	nde	rougeâtre,					1	I I		 		1		ŀ	-			12	2.0	0.2	•	X	x I			¦ i	
Elév	0 - 0 25 -	argileux de						_! _				- <u>+</u>		- +	<u>+</u>	<u> </u>		8.4	2.1	0.3			X_ .		_ + .	<u> </u> _ !	
· · · ·	<u> </u>	γ =17,2 kN/m ³			-		1	I I		1		1		- F -	- ** %	8	1	13	1.5	0.6		∳ *` 	צ				† 1 🗄
40-	30-	Lit de silt sableux	-	- +		Ń	-	1		1				F	•	•	1	16	1.2	1.7		1	•			1	4 -
			Б			⊦ - § } î				1	Ι			+ 	-	●⊢ 		18	1.1	1.2		+ • 	· · 			+	-1
35-		Lit de silt sableux	-		-	Ņ	, ,			1	1			j F			1	26	0.9			1	1			1	
30-	35-	Fin du sondage au piézocone à 38,36 m.								1 				י ד - ו			- -	26 29	1:2 1:2	1.5		 + - 	• 		'	<u> </u>	- F F 1
-	10	Till	Α				1				1	1		•	I.								i			• 	
25-	40-	Fin du forage à 40,41 m.			•		$- q_t$ $- u_{bi}$	ase		Sal	ble et t gile	gravi	ier		w w _p ⊦★ ● w	Sur HWL						×	S _{Uva} S _{UCO}	âne ône		+ α - α - ι	P ;'v I _{Z70021} , -

Figure 5. Profil géotechnique au droit du forage F21.

Ces sondages ont aussi permis de caractériser l'épaisseur des débris qui tapissent le fond de la cicatrice et de positionner la surface de rupture sur les Figures 3 et 4.

4.3 Propriétés géotechniques des sols intacts

Le forage F21 a été réalisé le plus près possible de l'embouchure du glissement de terrain, afin de pouvoir mesurer les paramètres géotechniques des sols représentatifs de l'endroit où il s'est initié. Le forage F22 a été réalisé le plus près possible de l'escarpement arrière du glissement de terrain, afin de pouvoir mesurer les paramètres géotechniques des sols représentatifs de l'endroit où il s'est arrêté.

La stratigraphie et les propriétés géotechniques observées au droit des deux sites de forages sont de façon générale comparable entre elles. Les propriétés géotechniques présentées à la Figure 5 proviennent du forage F21.

La stratigraphie observée au droit du site de forage peut être divisée en 5 unités principales, qui sont de la base vers le haut sur la Figure 5 : l'unité A, qui est un till de 40,4 m à 38,3 m de profondeur; l'unité B, qui est une argile silteuse rubanée de 38,4 m à environ 20,0 m de profondeur; l'unité C, qui est une argile silteuse à silt argileux stratifié de lits de silt et de sable de 20,5 à 11,5 m de profondeur; l'unité D, qui est un silt stratifié de lits plus argileux ou sableux; et l'unité E, qui est un sable silteux beige d'environ 2,0 m d'épaisseur jusqu'à la surface. Cette séquence stratigraphique semble complète, du début de la transgression marine jusqu'à l'exondation. Au niveau de l'unité B, deux lits de silt sableux ont été interceptés à 28 m et 32 m de profondeur.

Les unités qui ont en tout ou en partie été impliquées dans le glissement de terrain, et qui peuvent avoir une influence sur les mécanismes de rupture, sont les unités B et C. Les prochaines lignes décrivent en détail les paramètres géotechniques de ces unités montrées à la Figure 5. De façon générale, les teneurs en eau varient entre 30 % et 60 %, sans tendance nette avec la profondeur. Cette variation d'environ 30% de la teneur en eau est observée sur une très courte distance et est associée à l'alternance de bandes plus argileuses et de bandes plus silteuses, observable au niveau des unités B et C. Les lits plus silteux de couleur gris pâle, ont des teneurs en eau variant entre 30 et 45 %, alors que les bandes plus argileuses, souvent de couleur rougeâtre ou gris foncé, ont des teneurs en eau variant entre 55 et 70%. Cette variation marquée des teneurs en eau a aussi été corrélée avec les profils de densité (HU pour « Hounsfield Units » sur la Figure 6) obtenus du CT Scan (Boespflug et al., 1994; Duliu, O.G., 1999). Les bandes grises plus silteuses (bandes pâles sur l'image « scan » de la Figure 6) montrent des limites de consistance plus faibles et une sensibilité plus grande que les bandes rougeâtres (bandes foncées sur l'image « Scan » de la Figure 6) qui sont plus argileuses. Par exemple, dans le forage 22 (non montré dans cet article) il a été observé à quelques centimètres de distance, qu'une bande grise avait un indice de liquidité de 2.4 alors que la bande rose adjacente avait un indice de liquidité de 1,6.



Figure 6. Exemple d'un profil au CT Scan comparé à la photo en laboratoire et à la teneur en eau, pour l'échantillon PS-8 du forage F70021 (entre 26 et 26,57 m de profondeur.

En moyenne, jusqu'à 28 m de profondeur, la limite plastique oscille autour de 19 %, alors que la limite liquide varie entre 22% et 38%, avec une moyenne de 31%. L'indice de plasticité (I_P) varie entre 6 et 16 avec une moyenne de 12,4. Par la suite, les limites de plasticité et de liquidité augmentent graduellement, passant respectivement de 20 % à 28 % et de 36 % à 57 %, entre 28 m et 35 m de profondeur, ainsi que l'indice de plasticité (I_P) qui augmente lui aussi graduellement de 16 à 29.

L'indice de liquidité, dont la valeur varie inversement à la valeur de résistance au cisaillement non drainé à l'état remanié, varie entre 1,0 et 2,1 jusqu'à 24 m de profondeur et diminue par la suite, variant de 1,5 à 1,2 jusqu'à 35 m de profondeur. La résistance au cisaillement non drainé à l'état remanié, passe de 1,1 kPa à 0,2 kPa entre 12 m et 22 m de profondeur, pour augmenter par la suite de 0,3 kPa à 1,7 kPa entre 24 m et 34 m de profondeur.

La sensibilité est très élevée entre 16 m et 26 m de profondeur, variant entre 78 et 190, avec une valeur moyenne de 145.

Au niveau des sols silto-argileux des unités B et C, la résistance non drainée augmente de façon générale avec la profondeur. Concernant le piézocône, la résistance en pointe corrigée (q_T) passe d'environ 800 kPa vers 5 m de profondeur à environ 3000 kPa vers 37 m de profondeur. Au niveau du scissomètre de chantier, les valeurs de résistance intacte passent de 54 kPa à 83 kPa entre 15 m

et 26 m de profondeur. La valeur du paramètre N_{kt} est estimée à 14,5.

Les contraintes de préconsolidation mesurées à 16,4 m, 20,4 m et 26,0 m de profondeur sont respectivement de 235 kPa, 262 kPa et de 375 kPa. Lorsque comparées avec le profil des contraintes effectives verticales, cette argile semble normalement consolidée puisque les OCR obtenus varient entre 0,9 et 1 (Figure 5).

5 DISCUSSION

5.1 Propriétés géotechniques

La stratigraphie, les résultats de résistance au cisaillement non drainé à l'état intact et les teneurs en eau mesurées au forage F21 et F22 de la présente étude, montrent une cohérence avec ce qui avait été présenté par Aylsworth et al. (2001) et Evans et Brooks (1994).

Cependant, une différence notable a été observée au niveau des mesures de limite de liquidité et de résistance au cisaillement non drainé à l'état remanié. Elles sont significativement plus faibles pour la présente étude que pour les études antérieures. Conséquemment, dans la présente étude, l'indice de liquidité et la sensibilité des sols, qui ont été mesurés au cône suédois, sont significativement plus élevés. Par exemple, pour la présente étude, la sensibilité varie de 78 à 190 et l'indice de liquidité varie de 1,3 à 2,1 entre 16 m et 26 m de profondeur. Dans Aylsworth et al. (2001), la sensibilité a été mesurée au cône suédois et elle varie approximativement entre 5 et 30, tandis que l'indice de liquidité varie entre 0,7 et 1,4. Dans Evans et Brooks (1994) l'indice de liquidité varie entre 0,8 et 1,6.

Les différences observées peuvent s'expliquer par le rubanement gris et rougeâtre, au sein duquel une variabilité significative des propriétés géotechniques a été observée sur seulement quelques centimètres de profondeur.

En effet, Fransham et Gadd (1977) avaient observés que pour cette région, la teneur en eau pouvait varier entre 35 % et 85 % et que les bandes rougeâtres avaient des teneurs en eau, des limites de consistance et une proportion de particules fines plus élevées que les bandes grises. Percival et al. (2001) avaient aussi observé que les bandes rougeâtres avaient une proportion de particules fines plus élevée que les bandes grisâtres. Pour la présente étude, le profil montré à la Figure 6 illustre très bien cette variabilité de la teneur en eau (w%), qu'il est possible de corréler à la densité (HU) obtenue du CT Scan, en fonction de la profondeur.

Pour la présente étude, en plus d'avoir constaté les mêmes différences notées antérieurement par les autres auteurs, nous avons observé une différence significative de la sensibilité et de l'indice de liquidité entre les bandes rouges et grises, les premières étant moins sensibles et ayant un indice de liquidité moins élevé que les dernières.

Ces résultats illustrent l'importance de faire des mesures plus détaillées sur les différentes bandes de sol lorsque celui-ci est rubané, afin d'avoir une image plus précise des propriétés à l'état remanié du dépôt. À ce titre, les mesures de densités obtenues du CT Scan se révèlent être une approche prometteuse pour anticiper la complexité des propriétés géotechniques d'un dépôt rubané.

5.2 Surface de rupture et phases du glissement

Suivant l'axe central (Est-Ouest) du glissement de terrain, la position approximative de la surface de rupture est illustrée sur la Figure 3 par une ligne en tirets rouges. Sur la même figure, la ligne en tirets noir indigue la position du refus à l'enfoncement dans l'axe de la coupe, que l'on associe au substratum plus compétent (till ou roc). Le piézocône C30 indique que la surface de rupture près de la rivière est localisée à l'élévation 38 m, ce qui est plus profond que le lit de la rivière qui a été mesuré à environ 39,5 m d'élévation au droit du pont de la route 8. Pour cette raison, la première phase du glissement pourrait avoir soulevé le lit de la rivière. Entre les piézocônes C30 et C29. le substratum est fortement incliné vers l'ouest. puisqu'il passe de 11 m à 50 m d'élévation sur une distance horizontale d'environ 150 m. Par la suite, entre les sondages C29 et C25, le substratum et la surface de rupture sont pratiquement confondus et sont légèrement inclinés vers la rivière, passant de l'élévation 50 m à 57 m sur une distance horizontale d'environ 340 m, ce qui révèle que la surface de rupture à cet endroit est perchée de 10 à 17 m plus haut que le lit de la rivière.

Dans l'axe transversal (nord-sud) du glissement de terrain, la position approximative de la surface de rupture est illustrée sur la Figure 4 par une ligne en tirets rouges. Sur la même figure, la ligne en tirets noirs indique la position du refus que l'on associe au substratum. Entre les sondages C32 et C33, la surface de rupture suit le substratum sur approximativement la moitié sud du glissement de terrain. En allant en direction nord, entre les sondages C33 et C31 elle plonge d'environ 5 m, alors que le substratum plonge de son côté d'environ 17 m. De plus, en s'approchant de l'embouchure du glissement, le substratum est encore plus profond puisqu'il a été atteint à l'élévation 11 m au droit du sondage C30 (Figure 3), ce qui représente une épaisseur de sédiments de l'ordre de 56 m. Ceci indique qu'il y a une forte dépression au niveau du substratum à cet endroit, qui se traduit par le fait même, par une variation importante de l'épaisseur du dépôt argileux dans l'axe de la berge (nord-sud).

Ces fortes variations dans la topographie du substratum avaient déjà été observées par Aylsworth et al. (1997), principalement à l'aide de méthodes géophysiques. Aussi, les résultats des piézocônes montrent que la surface de rupture a bel et bien été contrôlée par la position du substratum dans la moitié arrière du glissement de terrain, comme Aylsworth et al. (1997) en faisaient l'hypothèse.

Les observations faites au niveau de la morphologie des débris combinées aux observations obtenues du piézocône au niveau de la surface de rupture permettent d'avancer l'hypothèse que le glissement de terrain de 1993 à Lemieux ce serait déroulé en 4 grandes phases.



Figure 7. Phases du glissement de terrain de Lemieux. La délimitation des phases en pointillés rouges est basée sur la morphologie des débris et la variation de la profondeur de la surface de rupture.

- Phase 1: un premier glissement rotationnel profond (n° 1 sur la Figure 7) qui a soulevé le fond de la rivière et qui pourrait s'être produit une semaine avant le grand glissement de terrain, selon un témoin visuel;
- Phase 2: une première phase de glissement fortement rétrogressif profond (n° 2 sur la Figure 7), avec un recul orienté vers le nord-est, et dont la surface de rupture est approximativement à la même profondeur que la surface de rupture du glissement de la phase 1. Les horsts observés parmi les débris plus en aval sur la rivière proviendraient de cette phase;
- Phase 3 : une deuxième phase de glissement fortement rétrogressif avec un recul orienté en direction est (n° 3a sur la figure 7), et une surface de rupture perchée à plus de 10 m audessus de la surface de rupture initiale. Le réajustement de l'escarpement latéral nord (n° 3b, Figure 7) se serait produit à la fin de cette phase;
- Phase 4 : la phase terminale du glissement fortement rétrogressif, toujours avec un recul orienté en direction est (n° 4a sur la figure 7) et un arrêt à cause de la remonté du substratum et de l'accumulation de débris au pied de l'escarpement arrière. Le réajustement de l'escarpement latéral sud (n° 4b, Figure 7) se serait produit à la fin de cette phase.

Les hypothèses généralement avancées pour expliquer l'arrêt d'une coulée argileuse sont la présence d'un obstacle topographique (ravin ou cicatrice adjacente), un changement dans la stratigraphie ou dans les propriétés des sols argileux, ou une hauteur d'escarpement insuffisante pour remanier les débris. Le fait que les propriétés géotechniques des forages F21 et F22 soient très semblables indique qu'un changement dans les propriétés géotechniques ne peut pas être évoqué afin d'expliquer l'arrêt du mécanisme de rétrogression. Aussi, la remontée du substratum, qui est aux environs de 13,5 m sous la surface du terrain au droit du sondage C24 (Figures 2, 3 et 7), combiné à l'accumulation de débris à la base de l'escarpement arrière, apparaissent comme étant les principales raisons de l'arrêt de la coulée argileuse.

6 CONCLUSION

Cette étude complémentaire sur le glissement de terrain qui s'est produit en 1993 à Lemieux en Ontario a permis de confirmer que la rétrogression avait principalement été arrêtée par une remontée progressive du substratum. Il a été observé que la profondeur de la surface de rupture était variable, et qu'elle avait été contrôlée par la position du substratum au niveau de la moitié arrière de la cicatrice.

Basé sur la morphologie des débris et la variation de la profondeur de la surface de rupture, le glissement de terrain a pu être séparé en quatre phases principales.

Les paramètres géotechniques mesurés au droit des deux forages réalisés près de la cicatrice indiquent que l'argile impliquée dans ce glissement de terrain peut être considérée comme étant extrêmement sensible. Aussi, au niveau des principales unités impliquées dans le glissement de terrain, une variation significative des propriétés géotechniques avec la profondeur, sur quelques centimètres, a été corrélée au rubanement gris et rose du dépôt argileux.

Finalement, le fait qu'il semble y avoir eu clairement plus d'un mécanisme de rupture qui soient intervenus dans la progression de ce glissement de terrain, fait du site de Lemieux un cas d'espèce dont une étude plus approfondie pourra améliorer les connaissances sur les glissements fortement rétrogressifs dans les argiles sensibles de l'Est du Canada.

7 REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier spécialement les autorités de la Conservation de la Nation-Sud, particulièrement madame Tessa Dilorio, ainsi que le Comté de Prescott-Russel, particulièrement monsieur Louis Prévost, pour leurs excellentes collaborations dans le projet, pour le partage d'informations et pour les permissions accordées afin de réaliser les sondages et forages.

8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aylsworth, J.M., Lawrence, D.E., and Evans, S.G. 2001. 1993 Lemieux landslide, South Nation River, Ontario. *Workshop on landslide hazards and risk management in Canada.* 16-18 November 2001, Gatineau, Québec. Fieldtrip guide, 7 p.

- Aylsworth, J.M., Lawrence, D.E., and Evans, S.G. 1997. Landslide and settlement problems in sensitive marine clay, Ottawa Valley. *Geological Association of Canada, Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting*, 1997, Ottawa, Field Trip B1, 63 p. (fieldguide).
- Brooks, G.R., Aylsworth, J.M., Evans, S.G. et Lawrence, D.E. 1994. The Lemieux landslides of June 20, 1993, South Nation Valley, Southeastern Ontario – A photographic record, Commission géologique du Canada, Miscellaneous report 56, 18 p.
- Boespflug, X., Ross, N., Long, B., et Dumais, J.F. 1994. Tomodensitometrie axiale : relation entre l'intensité tomographique et la densité de la matière. *Journal canadien des sciences de la terre*, 31, pp. 426-434.
- Chapman, L.J. et Putnam, D.F., 1984. The Physiography of Southern Ontario. *Ontario Geological Survey Special Volume 2, third edition*, 270 p., 1 carte.
- Demers, D., Robitaille, D., Locat, P, et Potvin, J. 2013. Inventory of large landslides in sensitive clay in the province of Quebec, Canada : Preliminary analysis, *Landslides in Sensitive clays - From geoscience to Risk management*. pp. 77-89.
- Duliu, O.G. 1999. Computer axial tomography in geosciences: an overview. *Earth-Science Reviews*, 48, pp. 265-281.
- Eden, W.J., Fletcher, E.B. et Mitchell, R.J. 1971. South Nation River landslide, 16 May 1971. *Revue canadienne de géotechnique*, 8, pp.446-451.
- Evans, S.G. et Brooks, G.R. 1994. An earthflow in sensitive Champlain Sea sediments at Lemieux, Ontario, June 20, 1993, and its impact on the South Nation River, *Revue canadienne de géotechnique*, 31, pp. 384-394.
- Fransham, P.B. et Gadd, N.R. 1977. Geological and geomorphological controls of landslides in Ottawa Valley, Ontario. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 14, pp. 531-539.
- Karrow, P.F. et Occhietti, S. 1989. Le Quaternaire des basses terres du Saint-Laurent, Canada. Dans : *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*, chap. 4, sous la direction de R.J. Fulton. Commission géologique du Canada, Géologie du Canada, vol. 1, pp. 341-418.
- Gadd. N.R. 1976. Surficial geology and landslides of Thurso-Russell map area, Ontario; Geological Survey of Canada, Paper 75-35, 7 p., 1 carte.
- Lawrence, D.E. Aylsworth J.M. et Morey, C.R. 1996. Sensitive clay flows along the South Nation River, Ontario, Canada and their impact on land use, 7^{ième} symposium international sur les glissements de terrain, Trondheim, Norvège, Juin 1996, pp. 479-484.
- Locat, J. et St-Gelais, D. 2013. Nature of sensitive clays from Québec, *Landslides in Sensitive clays - From geoscience to Risk management*. pp. 25-37.
- Mitchell, R.J. 1978. Earthflow terrain evaluation in Ontario. Ontario Ministry of Transportation and communications, Research report 213.

- Percival, J.B., Aylsworth, J.M. et Fritz, A. 2001. Analysis of colour rhythmites in sensitive marine clays (Leda Clay) from eastern Canada, 2001. A clay odyssey, 12th International Clay Conference, Bahia Blanca, Argentina, juillet 2001, pp.147-154.
- Potvin, J., Thibault, C., Demers, D. et 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 geoscience to Risk management*. pp. 331-342.
- Richard, H.S. 1982. Surficial Geology, Russel, Ontario, Geological Survey of Canada, carte 1507A.