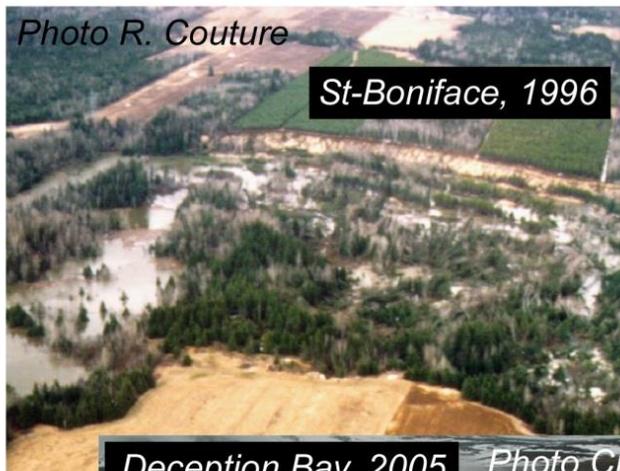


2e Atelier du LERN portant sur la recherche en cours au Québec sur les mouvements de terrain



Recueil des résumés

Préparé par

D. Turmel, A. Locat, et J. Locat
(Rapport LERN-19-01)

Vendredi le 11 janvier 2019,
Université Laval,
Salle ADJ 4514 (Pavillon Desjardins)



2^e Atelier du LERN portant sur la recherche en cours au Québec sur les mouvements de terrain

Vendredi le 11 janvier 2019, Université Laval, Salle ADJ 4514 (pavillon Desjardins)

En janvier 2017, le Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN¹, www.LERN.ggl.ulaval.ca) a réalisé le premier atelier dont le sujet principal était lié aux mouvements de terrain en lien avec les changements climatiques.

Suite à l'intérêt soulevé par le premier atelier ainsi qu'à une intensification des activités portant sur les mouvements de terrain au Québec dans le cadre du financement provenant du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020) et du Fonds vert du gouvernement du Québec, le LERN a organisé un deuxième atelier. Cet atelier vise principalement à présenter l'état de la recherche en cours sur les mouvements de terrain au Québec. Nous avons identifié trois objectifs principaux pour cet atelier :

1. Faire le point sur la recherche en cours au Québec sur les mouvements de terrain;
2. Amorcer les échanges et discussions sur l'orientation future de la recherche sur les mouvements de terrain, en particulier dans le cadre du Plan d'Actions sur les Changements Climatiques (2020-2027) et,
3. Favoriser les échanges et le réseautage entre les principaux intervenants travaillant dans le domaine des risques naturels au Québec.

Un total d'environ 70 invités et conférenciers provenant des milieux gouvernementaux, universitaires et de l'industrie participent à cet atelier. Le programme détaillé ainsi que les résumés des diverses présentations suivent dans ce document. Une vingtaine de présentations ainsi que des périodes d'échange sont à l'horaire.

Merci pour votre participation!

Dominique Turmel, Ariane Locat et Jacques Locat
Laboratoire d'Études sur les Risques Naturels

¹ Le LERN regroupe principalement des professeurs, chercheurs, professionnels et étudiants gradués du Département de génie civil et de génie des eaux et du Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.

Horaire de la journée

Heure	Activité	Personne/conférencier
08:30	Accueil: Viennoiseries, café et jus	
09:00	Appel	J. Locat
09:00	Mot de Bienvenue ULAVAL	Line Lapointe, Vice-doyenne à la recherche à la Faculté des Sciences et de Génie
	Mot de bienvenue MSP et MTQ	Bruno Faucher
09:30	Développer l'expertise et les méthodes d'appréciation des risques pour prévenir les sinistres	Josée Desgagné
09:45	Sismicité et mouvements de terrain dans l'est du Canada – Une estimation de l'aléa et du risque	Didier Perret
10:00	Les enregistrements morphosédimentaires de la paléosismicité holocène dans les lacs du sud du Québec	Patrick Lajeunesse
10:15	Développement de la méthode pseudo-statique spectrale pour l'analyse de la stabilité dynamique des talus argileux	Mourad Karray
10:30	l'Utilisation d'explosifs à proximité de pentes dans les argiles sensibles	Sarah Bouchard
10:45	Pause	
11:15	L'éboulis de Québec de 1889 revisité	Jacques Locat
11:30	Site Gascons: 10 ans d'observations interférométriques RSO	François Charbonneau
11:45	Stabilité de pentes minières à proximité d'infrastructures civiles : le cas de la mine LAB Chrysotile	Martin Grenon
12:00	Conception et mise en route d'un système de surveillance sismique pour le suivi de la stabilité de parois rocheuses	Christian Dupuis et Bernard Giroux
12:15	Portrait de la distribution temporelle et spatiale des glissements de terrain au Québec & Identification des principaux risques naturels actuels et appréhendés sur le territoire des communautés du Nunavik dans une perspective de changements climatiques	Sarah Aubé Michaud et Laurence Poulin Leboeuf
12:30	Dîner	
13:30	Prévision opérationnelle des mouvements de versant dans un contexte de changement climatique.	Francis Gauthier
13:45	Le tassement au dégel du pergélisol riche en glace: un risque naturel répandu au Nunavik (Québec)	Richard Fortier
14:00	Les étalements dans les argiles sensibles du Canada	Ariane Locat
14:15	Synthèse des caractéristiques de 14 étalements dans les argiles sensibles	Julie Therrien
14:30	Analyse du glissement de Saint-Fabien de 1976 comme un cas de rupture progressive dans les argiles sensibles	Frédérique Tremblay-Auger
14:45	Étude de l'infiltration et des variations verticales de la pression interstitielle dans un massif argileux: cas de Ste-Anne-de-la-Pérade (Québec)	Nomessi Kokutse
15:00	Pause	
15:30	Remaniement de l'argile et propagation des débris lors de glissement-coulées dans les argiles sensibles au Québec: observations de terrain	Pascal Locat
15:45	Modélisation des coulées argileuses	Dominique Turmel
16:00	Propriétés géotechniques et électriques de l'argile sensible de Saint-François-de-la-Rivière-du-Sud, Québec, Canada	Sandra Veillette
16:15	Suivi des pentes argileuses au Québec dans le contexte des changements climatiques: instrumentation	Nomessi Kokutse
16:30	Résumé de l'importance de la recherche sur les glissements de terrain pour la pratique	Denis Demers
16:45	Discussions	
17:15	Fin	

Développer l'expertise et les méthodes d'appréciation des risques pour prévenir les sinistres

Josée Desgagné

Ministère de la sécurité publique

L'augmentation des risques et des sinistres au Québec et les nombreux enjeux et besoins associés à cette situation ont conduit à l'adoption de la toute première politique québécoise de sécurité civile (PQSC). Mise en place pour l'horizon 2014-2024, cette politique interpelle aussi bien les citoyens que les ministères et organismes, les municipalités et les organisations de toute nature. Elle établit un cadre d'action commun à tous et précise la vision, les fondements, les orientations et les objectifs que la société québécoise se donne pour assurer une meilleure gestion des risques et des catastrophes.

Cette politique repose sur cinq orientations qui s'inscrivent dans l'esprit de concentrer les efforts en vue de consolider le système québécois de sécurité civile, d'améliorer la connaissance des risques, d'accroître le partage d'information et le développement des compétences, de recourir en priorité à la prévention et de renforcer la capacité de réponse aux catastrophes. Elle poursuit notamment l'objectif d'intensifier la recherche et le développement liés à la gestion des risques et des catastrophes et de promouvoir l'innovation.

Dès juin 2013, le gouvernement s'est doté du *Cadre pour la prévention de sinistre* accordant ainsi des moyens financiers pour la réalisation de projets concrets en appréciation et en traitement des risques, ainsi que pour la recherche. Plus spécifiquement, le gouvernement a notamment intensifié ses efforts en matière de prévention des sinistres liés aux mouvements de terrain. Pour se faire, il compte sur le développement de l'expertise dans le domaine et sur l'amélioration des méthodes d'appréciation des risques spécifiques aux glissements de terrain fortement rétrogressifs.

Le gouvernement, par l'entremise du ministère de la Sécurité publique et du ministère des Transports, s'est adjoint la collaboration du Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN) de l'Université Laval afin d'établir un programme de recherche sur les mouvements de terrain pour la période de 2017 à 2022. Cette présentation exposera donc les faits saillants de cette politique en lien avec la recherche ainsi que les éléments établis vers l'atteinte de ses objectifs.

Sismicité et mouvements de terrain dans l'est du Canada - Estimation de l'aléa et du risque

D. Perret

Commission géologique du Canada

À l'échelle mondiale, les mouvements de terrain provoqués par les séismes font partie des phénomènes secondaires les plus destructeurs après l'effondrement des bâtiments. Dans l'est du Canada, aucun décès n'a été associé à des mouvements de terrain déclenchés par des séismes, si ce n'est peut-être pour une coulée argileuse survenue en 1870 cinq jours après un séisme de magnitude 6.5. Toutefois, certaines conditions défavorables pouvant conduire à des effets dévastateurs sont présentes dans les basses-terres du sud-est de l'Ontario et du sud du Québec. Cette région, en partie recouverte de dépôts d'argiles sensibles propices au développement de mouvements fortement rétrogressifs, est caractérisée par une sismicité intraplaque modérée, mais où des séismes de magnitude 7, voire plus, peuvent se produire tous les 500 à 1 000 ans en moyenne. Par ailleurs, la majeure partie de la population actuelle de l'est du Canada est concentrée dans cette région. Cette menace est illustrée à la fois par des récits historiques et des études de paléo-sismologie qui indiquent que de grands mouvements rétrogressifs d'une superficie de plusieurs kilomètres carrés ont été provoqués par des séismes au cours du dernier millénaire, parfois dans des zones maintenant très urbanisées. Une analyse préliminaire du risque encouru par la population est présentée pour différents scénarios, en s'appuyant sur un diagramme fréquence-conséquence. Quelques mesures permettant, d'une part, de mieux caractériser l'aléa, et d'autre part, de réduire l'exposition au risque, sont finalement proposées et discutées.

Les enregistrements morphosédimentaires de la paléosismicité holocène dans les lacs du sud et de l'est du Québec

P. Lajeunesse, A.-P. Trottier, A. Normandeau, A. Gagnon-Poiré, G. Philibert, B. Sinkunas

Laboratoire de géosciences marines, Département de géographie, Université Laval

Des formes et dépôts de mouvements de masse observés au fond des lacs de l'est du Canada ont été associés à des événements de tremblements de terres postglaciaires dont l'épicentre était situé dans les zones sismiques intra-plaques de l'Ouest du Québec et de Charlevoix-Kamouraska ; cette dernière étant la zone sismique la plus active de l'est du pays, avec 5 séismes majeurs et des centaines de séismes mineurs survenus durant les temps historiques. Depuis une dizaine d'année, l'équipe du Laboratoire de géosciences marines de l'Université Laval a entrepris des travaux de cartographie et de datation des mouvements de masse sous-lacustres dans le sud et l'est du Québec afin (1) d'identifier les événements de tremblements de terre survenus au-delà des archives historiques et (2) de mieux comprendre les effets de ces séismes sur l'évolution morphosédimentaires des bassins lacustres. Afin d'atteindre ces objectifs, des levés bathymétriques à haute résolution (échosondeur multifaisceaux) et au profileur acoustique de sous-surface (Chirp) ainsi que du carottage de sédiments ont été réalisés dans plusieurs lacs (Maskinongé, Lac-aux-Sables, Mékinac, Saint-Joseph, Saint-Charles, Jacques-Cartier, Témiscouata, Pohénégamook, St-Jean, Walker, Pentecôte, Pasteur, Manicouagan). Ces travaux ont permis d'identifier une série de d'événements survenus depuis la déglaciation, lesquels se concentrent (1) pendant la déglaciation, soit à l'intérieur même des unités sédimentaires glacio- lacustres/marins (silts argileux) et (2) au cours du dernier millénaire, ayant remobilisé les dépôts glacio- lacustres/marins et postglaciaires (gytja). Peu ou pas d'événements sont observés entre ces deux périodes sur les profils se sous-surface. De plus, les événements du dernier millénaire ne sont pas enregistrés dans les lacs situés dans l'est du Québec. Ces résultats démontrent aussi qu'une combinaison de données hydroacoustiques et de carottes de sédiments peut fournir des enregistrements fiables de la paléosismicité dans un contexte de faible taux de sédimentation, à condition que les lacs analysés soient situés à une certaine distance des zones sismiques afin d'éliminer un 'bruit de fond' causé par plusieurs petits événements.

Développement de la méthode pseudo-statique spectrale pour l'analyse de la stabilité dynamique des talus argileux

Mourad Karray, ing., Ph.D.

Professeur titulaire, Département de génie civil et du bâtiment, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec) J1K 2R1, Canada

Une méthode pseudo-statique spectrale adaptée à l'analyse parasismique des pentes argileuses a été développée. Cette nouvelle méthode consiste à ajuster le coefficient sismique, $k_h(z)$, en fonction de la profondeur, des propriétés dynamiques du dépôt et de la pente (T_0 ou f_0) et de la zone sismique. Dans ce projet, plus de 10000 simulations numériques ont été réalisées et synthétisées. Une procédure simple a ainsi été développée pour définir la variation du coefficient pseudo-statique en fonction de la profondeur. Une large gamme de géométries de talus argileux (1,75H :1V à 6H :1V) et différentes épaisseurs de dépôt (5 à 50 m) ont d'abord été examinés en utilisant un indice de plasticité de 30. L'ensemble des analyses démontre que la variation du coefficient pseudo-statique avec la profondeur (équation 1) permet d'avoir des surfaces de rupture similaires à celles retrouvées dans les analyses dynamiques.

D'un autre côté, des analyses qui permettent d'examiner l'effet de l'indice de plasticité ont été effectuées. Ces analyses montrent que le coefficient pseudo-statique augmente avec l'augmentation de l'indice de plasticité de l'argile constituant le dépôt. Cette augmentation est presque linéaire pour des I_p inférieurs à 40 et semble dépendre davantage de l'inclinaison de la pente que de la variation de la résistance au cisaillement, S_u ou de l'épaisseur du dépôt. Des relations ainsi que des valeurs de conception ont été proposées entre le rapport du coefficient pseudo-statique, par rapport à celui déterminé pour I_p de 30, et l'indice de plasticité.

La méthode a été implantée dans un programme commercial SVSlope développé par SoilVision et des exemples ont été traités afin de montrer la fiabilité de l'approche.

La présentation fera un bilan de l'ensemble des travaux réalisés et exposera la méthodologie développée. Elle présentera ensuite des pistes pour les recherches futures.

Utilisation d'explosifs à proximité de pentes en argile sensible

S. Bouchard^{1,2}, S. Leroueil¹, D. Leboeuf¹

1. Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec

2. SNC-Lavalin, Mines et métallurgie, Québec

Un grand glissement de terrain est survenu sur la Basse-Côte Nord du Québec au village de La Romaine, suite à des travaux de sautage. Le glissement a eu lieu le 1er août 2009 et les sols en place sont majoritairement de l'argile sensible, un matériau qui pourrait être sensible aux vibrations. Cet événement a suscité de nombreux questionnements sur l'effet des vibrations sur la stabilité des pentes en argile sensible. Un critère de 25 mm/s comme limite de vitesse en pointe des particules est généralement accepté dans la littérature lorsqu'il y a du sautage à proximité de sols sensibles et c'est ce qui est utilisé officiellement dans la norme Norvégienne. Toutefois, au Québec, il y a absence d'une telle norme ou d'un critère lorsque du sautage est prévu près d'une pente en argile sensible. Dans le cas de La Romaine, il n'y a pas eu d'enregistrement des vibrations et les calculs à rebours montrent que les vitesses en pointe des particules dépasseraient 500 mm/s ce qui est nettement supérieur à la limite généralement utilisé pour un tel cas. Cette présentation fait un survol de la problématique générale des sautages à proximité de sols sensibles et présente l'inventaire des glissements de terrain dans les argiles sensibles ayant pu être causés par des sautages. La méthode utilisée pour modéliser un sautage dans une pente avec un logiciel de calcul de différences finies est également présentée. Les résultats préliminaires montrent un effet important entre la vitesse en pointe des particules (et la pression transmise dans le sol) et les déformations de cisaillement.

L'éboulis de Québec du 19 septembre 1889 revisité

J. Locat, D. Turmel

Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN),
Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, G1V 0A6

Le glissement rocheux de 1889 le long de la rue Champlain est celui qui a causé le plus de décès parmi les multiples glissements qui se sont produits dans cette partie de la ville de Québec au cours du 19^e siècle. Ce glissement a marqué un jalon important dans notre façon de voir ces phénomènes tant du point de vue technique que politique. Trois volets de cette étude, dont un article sera soumis à la Revue canadienne de géotechnique¹ sont présentés ici : (1) l'analyse des photographies anciennes avant et après le glissement de 1889, (2) l'analyse faite par Baillaigé et (3) une révision de son analyse par une approche à l'équilibre limite. L'étude de Baillaigé a fort probablement été une des premières études détaillée d'un glissement rocheux au Canada. Baillaigé a débuté ses observations peu de temps après le glissement de 1841 qui avait causé 32 pertes de vie et qui jouxte celui de 1889 à l'ouest. La rétro-analyse du glissement de 1889 montre bien que Baillaigé avait bien compris et surtout bien prédit en 1879 la catastrophe qui s'est produite 10 ans plus tard, causant 35 décès. La rétro-analyse avec *RocTopple* confirme (fig. 1) que le glissement a été un basculement causé par un talus rocheux abrupt (plus de 75° de pente) avec une stratification subverticale comprenant de multiples fissures dont une fissure amont très ouverte (plus d'un mètre) et qu'un drain bouché en amont a permis le remplissage de cette fissure lors de pluies abondantes qui a entraîné la rupture du talus. À la suite de l'éboulis de 1889 et jusqu'au début du 20^e siècle, des travaux correctifs ont été réalisés sur le site du glissement lesquels visaient surtout le reprofilage du talus, comme en 1841, le tout suivi de la reconstruction du mur de la Terrasse Dufferin dans ce secteur. Suite à d'autres observations et analyses, des travaux de stabilisation (surtout des ancrages) ont été réalisés en 1960 sous la Terrasse Dufferin. La rétro-analyse du cas de 1889 pointe vers un besoin de vérifier si des conditions semblables, en termes géométrique et structural, persistent ailleurs le long de la falaise Champlain.

¹ Locat, J., et Turmel, D., 2019. Le glissement rocheux du 19 septembre 1889 le long de la rue Champlain, Québec: une catastrophe prédite par Charles Baillaigé. À soumettre à la Revue canadienne de géotechnique.

Site Gascons: 8 ans d'observations interférométriques radar

F. Charbonneau¹, C. Cloutier², R. Couture¹, J. Locat³ et V. Singhroy¹

¹ Ministère des Ressources naturelles Canada, Ottawa

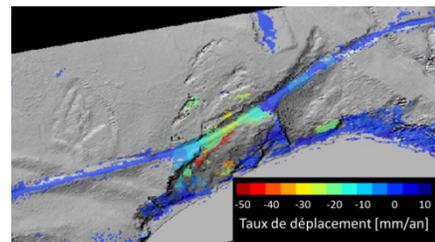
² Ministère des Transports du Québec, Québec

³ Université Laval, Québec

Le suivi de glissements de terrain affectant des infrastructures de transport est important pour la sécurité de la population et leur caractérisation géotechnique est essentielle à l'élaboration de plan de mitigation. Par leur blocométrie hétérogène sur une petite superficie, certains systèmes de glissement peuvent être complexes à caractériser. Le site d'étude Gascons en Gaspésie est un bel exemple de complexité. En partenariat avec les ministères des Transports Québec et des Transports Canada, l'Université Laval a instrumenté le site Gascons avec des fissuromètres numériques, des chapelets de fibre optique, un inclinomètre et autres points de contrôle passifs. Ce supersite était également l'occasion de démontrer le potentiel et les limitations de l'interférométrie radar (InSAR) satellitaire comme outil de surveillance à distance.

Afin de maximiser l'information InSAR en zone de végétation dense et sur la portion escarpée, un réseau de 23 cibles métalliques pouvant être suivi par InSAR avec une grande précision a été déployé en 2009 et 2010 sur le site. Depuis, le satellite canadien RADARSAT-2 acquiert des données radar à haute résolution (~1m) couvrant le site selon trois géométries de visée et ce, tous les 24 jours. Ce plan d'acquisition permet d'estimer des taux de déplacement de la surface de l'ordre du mm/an selon les axes de visée et également de les projeter sur le plan horizontal et l'axe vertical. Les cibles ponctuelles ont permis d'observer une dynamique spatiale hétérogène des différents blocs et mis en évidence les déplacements plus rapide dans la portion Est du site. La cible sur le mur de soutènement a un taux annuel de déplacement vertical de -45 mm/an et un taux horizontal de 30 mm/an. Alors que le petit massif bouge aux taux vertical et horizontal de -10 mm/an et 25 mm/an respectivement. Sur la période de huit ans d'observation, on perçoit de légères accélérations des déplacements au printemps, mais dans l'ensemble les taux annuels sont constants.

Malgré le relief accidenté, la technique d'analyse à fenêtre variable a permis de quantifier les déplacements le long du chemin de fer à partir de la série d'acquisitions aux passages ascendants. On observe quatre portions distinctes s'alignant avec les mesures du chapelet de fibre optique. Les taux de déplacements le long de l'axe de visée varient de 10 à 46 mm/an pour la portion active du site (figure ci-contre). Malheureusement les déplacements dans la zone d'éboulis inférieure aux caissons du mur de soutènement ne peuvent pas être estimés dû à la variation constante de la rugosité de la surface entraînant une perte de cohérence InSAR.



L'InSAR a permis de couvrir de façon régulière les portions du site pour lesquelles aucun instrument de mesure automatique était présent. Avec ses trois satellites, l'arrivée de la Mission Constellation RADARSAT en 2019 permettra le suivi InSAR aux quatre jours, rendant ainsi possible la surveillance d'événements évoluant rapidement, telle une zone d'éboulis ou un dégel printanier « mouvementé ».

Analyse de la stabilité de pentes minières rocheuses à proximité d'ouvrages de génie civil : le cas de mine LAB Chrysotile

M. Grenon¹, S. Amoushahi¹, J. Locat², D. Turmel²

1. Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux, Université Laval, Québec

2. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec

Courriel: martin.grenon@gmn.ulaval.ca

Au cours des dernières années, plusieurs grandes mines à ciel ouvert ont débuté le processus d'extraction dans la province de Québec au Canada, et certains des plus grands puits prévus sont situés à proximité d'infrastructures publiques. Historiquement, les grandes mines à ciel ouvert étaient peu nombreuses dans plusieurs régions minières, notamment l'Abitibi, où les mines souterraines sont la norme. En tant que partie intégrante de l'acceptation sociale d'une exploitation minière à ciel ouvert, la stabilité des pentes doit être soigneusement analysée au cours du processus de conception, et la présence d'infrastructures publiques près des pentes doit être dûment examinée. La province de Québec n'a pas de lignes directrices précises au sujet de ces considérations de conception. Cet article fournit un aperçu de la littérature sur certaines pratiques actuelles concernant la conception des pentes de l'exploitation minière près d'une infrastructure publique. Afin de démontrer son applicabilité dans le contexte de la province de Québec, l'article présente une analyse de la stabilité du mur ouest de la mine à ciel ouvert LAB Chrysotile, à Thetford Mines (Québec), près de la nouvelle route 112. Des analyses déterministes et probabilistes ont été menées à l'aide des méthodes de la réduction de la résistance au cisaillement par éléments finis et de l'équilibre limite pour évaluer la stabilité des pentes. L'impact de l'assèchement rapide et du remplissage de la fosse, ainsi que la stabilité à long terme de la pente ont également été étudiés. Les résultats de toutes les analyses révèlent que les pentes de l'exploitation minière actuelle de LAB Chrysotile sont acceptables dans les limites des critères de conception.

Conception et mise en route d'un système de surveillance sismique pour le suivi de la stabilité de parois rocheuses

B. Giroux¹, J. C. Dupuis²

1. INRS-ÉTÉ, Québec, Canada

2. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec

Ce projet vise à mettre au point une méthode de surveillance continue de la stabilité des parois qui permettra de localiser dans l'espace et dans le temps les foyers d'instabilité qui sont susceptibles de causer des chutes de pierre, ceci pour aider la planification et l'optimisation des opérations d'entretien. La méthode est basée sur l'écoute sismique car les foyers d'instabilité sont associés à des changements de contraintes qui peuvent générer des ondes sismiques. Le projet comporte quatre volets. D'abord, on vise à évaluer les limites de détectabilité des changements de contraintes en fonction des conditions de bruit ambiant et du volume de pierre se décrochant de la paroi. Le deuxième volet porte sur l'automatisation de la discrimination des signaux d'intérêt. Le troisième volet vise à mieux comprendre les liens entre les chutes de pierre et les variables climatiques. Finalement, la précision de la localisation des foyers d'instabilité est le sujet du quatrième volet.

En collaboration avec la compagnie ArcelorMittal, un système de surveillance constitué de quatre stations sismiques comportant chacune quatre capteurs a été mis en place en septembre 2018 pour une période de deux ans, sur une falaise en bordure d'une voie ferrée sur la Côte-Nord, où il existe un historique de chute de pierre. Une station météorologique sera ajoutée au printemps 2019. Les données, enregistrées en continue, permettront de répondre aux quatre volets du projet.

Une approche récemment développée pour la détection d'événements de faible magnitude pour le monitoring de la fracturation hydraulique sera testée dans notre contexte. Cette approche, nommée tomographie d'émission sismique (TES), permet de détecter et localiser des événements sismiques de magnitudes inférieures à ce qui est détectable avec les méthodes de seuillage classiques. L'idée consiste à capitaliser sur le fait que l'énergie émise par une source sismique présente une certaine cohérence qui sera décalée dans le temps aux différents capteurs en raison des distances différentes entre la source et les différents capteurs. En procédant cellule par cellule dans un modèle 3D, on peut calculer le décalage temporel connaissant le modèle de vitesse, et calculer la cohérence sismique à chacune des cellules. Si la cohérence est élevée, la probabilité est forte qu'un événement provienne de cette cellule. La cohérence étant calculée à partir des signaux mesurés à tous les capteurs, on augmente en quelque sorte le rapport signal-sur-bruit « global », ce qui permet de détecter des événements de magnitude plus faible que ce qui est possible par seuillage.

L'écoute sur une période de deux ans permettra de construire un catalogue d'événements sismiques à partir duquel nous pourrons établir des critères statistiques utiles à l'interprétation des signaux. Des algorithmes d'apprentissage automatique seront testés pour leur classification, dans le but d'automatiser la méthode. Des algorithmes dits supervisés pourront être utilisés pour la classification étant donné que nous allons disposer d'un catalogue d'événements identifiés.

Nous allons étudier les corrélations entre les variations de température et de pression atmosphérique, les précipitations, et le taux des radiations solaires pour quantifier l'influence de ces paramètres sur les mécanismes causant les chutes de pierre. Ces travaux, combinés à l'étude de la signature sismique, permettront de mieux comprendre les mécanismes au foyer des émissions sismiques, et de voir si les variables climatiques pourraient être utilisées comme proxy pour anticiper les chutes de pierre.

Finalement, un algorithme d'inversion conjointe hypocentre-vitesse développé par notre groupe de recherche sera modifié pour supporter des maillages non structurés, mieux adaptés à la géométrie des falaises. La précision de ce code, qui permet de localiser les événements, sera évaluée.

Identification des principaux risques naturels actuels et appréhendés sur le territoire des communautés du Nunavik dans une perspective de changements climatiques.

S. Aubé-Michaud¹ et M. Allard^{1,2}

¹ Centre d'études nordiques

² Département de géographie, Université Laval

Dans un contexte de réchauffement climatique, les communautés inuites du Nunavik doivent composer avec des processus géomorphologiques propres aux milieux arctiques qui constituent des risques naturels. Dans ces milieux froids, des conditions climatiques particulières (plusieurs journées chaudes consécutives) augmentent l'instabilité de la couche active et favorisent les glissements de type détachement de la couche active. Les accumulations de neige sur les reliefs accidentés augmentent les risques d'avalanches. Une hausse importante des températures de l'air au printemps accompagnée de vents violents et de pluie accélère la fusion du manteau neigeux provoquant le déclenchement d'avalanches de neige humide. Il est nécessaire de déterminer les secteurs susceptibles d'être exposés aux aléas naturels afin d'assurer un développement et un aménagement sécuritaire des collectivités ainsi qu'un entretien subséquent des infrastructures. Une méthode simple et efficace sous forme de grille d'analyse selon huit catégories de critères a été développée afin de déterminer le niveau de risque des aléas naturels propres à chacune des communautés du Nunavik. La démarche consiste à établir l'importance respective des divers risques en fonction des caractéristiques propres à l'aléa potentiel ainsi que de l'évaluation des probabilités d'occurrence de l'aléa en cause et de ses conséquences potentielles. Une cartographie de susceptibilité de risque pour chaque village concerné a aussi été réalisée en fonction des événements passés et ceux appréhendés.

sarah.aube-michaud@cen.ulaval.ca

michel.allard@cen.ulaval.ca

Portrait de la distribution temporelle et spatiale des glissements de terrain au Québec

L. Poulin Leboeuf ¹

¹ Université Laval et Ministère des Transports

Les mouvements de terrain sont un phénomène naturel fréquent dans les régions habitées du Québec méridional. La majorité des cas signalés survient à l'intérieur des limites de transgression marine post-glaciaire où se vit 90 % de la population québécoise. Malgré leur importance dans la province, ces mouvements n'ont fait l'objet jusqu'à présent que d'études statistiques et géomorphologiques très fragmentaires. De ce fait, il s'avère complexe de comprendre et de corrélérer l'occurrence des mouvements de sol à différentes périodes de l'année et de cerner les facteurs climatiques en cause. À partir de la banque de données du ministère des Transports du Québec, l'objectif général de cette recherche est de dresser un portrait général des mouvements de terrain et des circonstances ou facteurs causaux qui leur sont associés, à l'aide d'analyses statistiques et descriptives de leurs contextes géomorphologique, géométrique, spatial et temporel. Ces travaux ont permis dans un premier temps de dresser différents portraits des mouvements de sol pour la période couvrant de 1970 à 2017. Dans un deuxième temps, on a examiné s'il était possible de confirmer l'existence d'effets de purge ou d'amplification en utilisant les données disponibles pour trois événements météorologiques particuliers : les fortes accumulations de neige de l'hiver 2008, les pluies torrentielles de l'Outaouais en 2011 et les apports en eau exceptionnels du printemps 2017.

laurence.poulin-leboeuf.1@ulaval.ca

Prévision opérationnelle des mouvements de versant dans un contexte de changement climatique.

F. Gauthier¹, T. Birien¹, F. Meloche¹, Y. Boulet¹, F. Banville-Côté^{1,2}, D. Boucher³, D. Fortier⁴, A. Langlois⁵, F. Bossé⁶, C. Cloutier⁶

¹ Centre d'études nordiques, Laboratoire de géomorphologie et de gestion des risques en montagne (LGGRM), Module de géographie, Université du Québec à Rimouski

² Direction des Inventaires et du Plan, Direction générale du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, ministère des Transports du Québec

³ Avalanche Québec

⁴ Centre d'études nordiques, GEOCRYOLAB, Département de géographie, Université de Montréal

⁵ Centre d'études nordiques, Département de géomatique, Université de Sherbrooke

⁶ Secteur mécanique des roches, Direction géotechnique et géologie, ministère des Transports du Québec

Les avalanches de neige, les chutes de blocs de glace, les chutes de pierres, les coulées de débris et les crues soudaines représentent des aléas majeurs pour les usagers des routes de la Haute-Gaspésie. Annuellement, le ministère des Transports du Québec (MTQ) effectue plus de 300 interventions de déblaiement de dépôts d'avalanche, de blocs de glace ou de débris de mouvements de terrain sur les routes 132 et 198. Pour le moment, la gestion de l'aléa est réactive et s'appuie sur l'expérience de la « patrouille de roche » qui assure le maintien des routes. Des analyses croisées entre les interventions du MTQ et les données des stations météorologiques de la région ont démontré que l'occurrence de ces aléas peut être expliquée à l'aide de modèles statistiques (p.ex. : modèle logistique et arbre de classification). Cependant, une connaissance approfondie des facteurs causaux de ces aléas est nécessaire pour soutenir le développement d'une capacité prédictive. Pour ce faire, un réseau de stations micrométéorologiques a été implanté directement sur les versants les plus problématiques du territoire. Au total, 17 stations et sites d'études sont maintenant suivis par le Laboratoire de géomorphologie et de gestion des risques en montagne (LGGRM). En fonction du processus étudié, les stations collectent des données de précipitation (pluie et neige), de hauteur et de transport de neige, d'irradiation, de vitesse et direction du vent, de pression atmosphérique, de température de l'air, d'humidité relative, d'humidité de surface des parois rocheuses, de température de surface des parois rocheuses et jusqu'à 5,5 mètres de profondeur et de déformation des discontinuités. En parallèle, chaque site a fait l'objet d'une caractérisation géomorphologique et le suivi des processus est assuré par des caméras automatiques, des relevés Lidar ou de photogrammétrie et les relevés d'intervention de la « patrouille de roche » du MTQ. L'étude approfondie des facteurs aggravants et déclencheurs des différents aléas permettra de soutenir le choix des variables explicatives et prédictives retenues dans les modèles statistiques. Enfin, le projet s'intéresse également aux impacts des changements climatiques (extrêmes climatiques) sur l'occurrence, la fréquence et la magnitude de ces aléas.

Le tassement au dégel du pergélisol riche en glace: un risque naturel répandu au Nunavik (Québec)

R. Fortier, ing., Ph.D.¹, J. Fortin²

1. Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec (Québec)

2. Ministère des transports du Québec, Québec (Québec)

Dans le contexte du réchauffement climatique anticipé aux hautes latitudes nordiques lors des prochaines décennies, le tassement au dégel du pergélisol riche en glace est un risque naturel qui affecte la performance, les coûts d'entretien et la durée de vie utile des infrastructures nordiques et le fonctionnement des écosystèmes nordiques. Pour mieux comprendre cet aléa, un suivi annuel des tassements au dégel du pergélisol le long d'une section de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq au Nunavik (Québec) dans la zone de pergélisol discontinu a été réalisé depuis 2006. Suite à des travaux d'investigation géotechnique et géophysique dont un essai de pénétration au piézocône, des profils de géoradar et une tomographie de résistivité électrique, cette route est construite sur une couche de sable stable au dégel qui recouvre une unité de silts riches en glace. Basé sur les résultats de simulation numérique du régime thermique du remblai routier et de l'infrastructure sous le remblai, l'augmentation de la température de l'air de l'ordre de 2 à 3 °C observée depuis les vingt-cinq dernières années au Nunavik et l'isolation thermique du couvert nival qui se forme en hiver sur les épaulements et au pied du remblai sont à l'origine de la dégradation du pergélisol sous le remblai. En outre, un taux de dégel de 0.317 m/an a été estimé. Alors que seule la partie supérieure de la couche de sable sous le remblai subissait initialement les cycles saisonniers de gel-dégel, le front de dégel a atteint la couche de silts riches en glace instable au dégel en 2003. Ce n'est qu'en 2005 que les premiers signes d'affaissement de la chaussée observés à l'œil nu ont été signalés. Le dessus du remblai à ce moment-là était ondulé avec des crêtes et des creux de l'affaissement qui s'étendaient sur toute la largeur du remblai. Par rapport aux plans tels que construits de la route, des tassements au dégel aussi élevés que 1.60 m ont été observés depuis la construction de la route en 1991 pour des taux de tassement mesurés de 0.056 à 0.138 m/an. Les coefficients de consolidation obtenus par rétrocalcul varient entre 1.37 et 2.44 m²/an pour des rapports de consolidation au dégel correspondants de 1.021 à 0.765. Les valeurs de ces deux paramètres sont comparables à celles trouvées dans la littérature pour des essais de consolidation au dégel en laboratoire sur des échantillons de pergélisol riche en glace. La consolidation au dégel de la couche de silts est presque complétée et seuls de faibles tassements causés par la consolidation secondaire sont attendus le long de la section étudiée de la route d'accès à l'aéroport d'Umiujaq.



Les étalements dans les argiles sensibles

Ariane Locat¹, Serge Leroueil¹, Denis Demers² et Pascal Locat²

¹Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval

²Section des Mouvements de terrain, Direction de la géotechnique et de la géologie, Ministère des Transports du Québec

Les étalements sont un type de glissement de terrain survenant dans les argiles sensibles de l'Est du Canada (Locat et al. 2011 et Demers et al. 2014). Ils sont caractérisés par des débris s'étant disloqués en blocs d'argile plus ou moins intacts ayant la forme d'horsts et de grabens et s'étant déplacés sur une surface de rupture quasi-horizontale (voir figure ici-bas). Selon les quelques témoins de ces événements, les étalements surviendraient rapidement, sans signes avant-coureur connus, et couvrent de grandes superficies (> 1 ha). De plus, les analyses de stabilité conventionnelles n'arrivent pas à expliquer l'étendue de ces glissements. Ces glissements posent donc un réel danger pour la population et les infrastructures situées sur les dépôts d'argiles sensibles et justifient le besoin d'outils adéquats permettant d'évaluer la susceptibilité d'un talus argileux à ce type de glissement de terrain. Quinn et al. (2011) et Locat et al. (2011) ont tous deux proposé que la rupture progressive pouvait être impliquée dans ce type particulier de glissement de terrain. La prise en compte du comportement anti-écrouissage du sol lors de la rupture progressive permet d'expliquer la propagation d'une surface de rupture quasi-horizontale dans un dépôt de sol intact et la dislocation de la masse de sol sus-jacente. Récemment, l'application de la rupture progressive à l'aide d'un modèle numérique en une dimension à différents cas bien documentés d'étalement (Durand 2016; Locat et al. 2015 et 2017) a permis de vérifier que la contrainte de cisaillement dans les talus analysés serait près de la résistance au cisaillement du sol. Une faible résistance à grandes déformations (donc une sensibilité élevée) entraînerait une augmentation de la distance de propagation de la surface de rupture. La rapidité à laquelle le sol perd sa résistance une fois la résistance en pic atteinte (la fragilité du sol) influencerait surtout l'initiation de la rupture progressive mais aussi, à plus petite échelle, la distance de propagation. Dans un sol présentant un comportement fragile, dont la résistance diminue rapidement une fois la résistance en pic atteinte, une plus faible perturbation serait donc nécessaire pour initier une rupture progressive et celle-ci se propagerait sur une plus grande distance. Ces analyses ont aussi démontré que le comportement du sol nécessaire afin d'expliquer l'initiation et l'étendue des étalements serait plus sensible que celui mesuré lors d'essais triaxiaux ou de cisaillement simple standard ne pouvant pas cisailer les échantillons à de grandes déformations. Des essais de cisaillement annulaire sont donc envisagés afin de mesurer le comportement du sol à grandes déformations et de déterminer la résistance mobilisée le long d'une surface de rupture. Finalement, dans bien des cas, la diminution de la contrainte horizontale pendant la propagation de la rupture progressive serait assez élevée pour que la rupture active du sol soit atteinte, ce qui permettrait d'expliquer la dislocation de la masse de sol en horsts et en grabens. Des analyses en deux dimensions, prenant en compte la rupture progressive, sont par contre nécessaires afin de bien définir les conditions d'initiation, de propagation et de dislocation des débris.

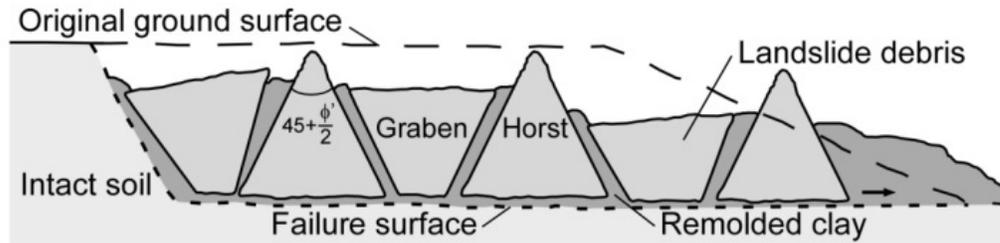


Figure 1 : Représentation schématique d'un étalement dans les argiles sensibles.

- Demers D., Robitaille D., Locat P. and Potvin J. 2014. Inventory of large landslides in sensitive clays in the Province of Québec, Canada: preliminary analysis. In *Landslides in Sensitive Clays: From Geosciences to Risk Management*. Advances in Natural and Technological Hazards Research 36, L'Heureux J.-S. et al. (eds.), Springer, pp. 77-89.
- Durand A. 2016. Contribution à l'étude des étalements dans les argiles sensibles de la mer de Champlain. Master thesis. Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval. 174p.
- Locat A., Leroueil S., Demers D. and Locat J. 2017. The Saint-Barnabé case study, In *Understanding landslides through case studies*. Leroueil S & Picarelli L (eds.) Taylor & Francis Group. Accepted
- Locat A., Leroueil S., Fortin A., Demers D. and Jostad H.P. 2015. The 1994 landslide at Saint-Monique, Quebec : Geotechnical investigation and application of progressive failure analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(4) : 490-504.
- Locat A., Leroueil S., Bernander S., Demers D., Jostad H.P. and Ouehb L. 2011 Progressive failures in Eastern Canadian and Scandinavian sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(11): 1696-1712.
- Quinn, P.E., Diederichs, M. S., Rowe, R. K. and Hutchinson, D. J. 2011. A new model for large landslides in sensitive clay using a fracture mechanism approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(8): 1151-1162.

Synthèse des caractéristiques de 14 étalements dans les argiles sensibles

J. Therrien^{1,2}, A. Locat², S. Leroueil²

1. Ministère des transports du Québec

2. Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec

Les sols argileux sur le territoire Québécois ont pour caractéristique d'être fréquemment sensibles au remaniement. Cette propriété géotechnique de l'argile la rend susceptible aux grands glissements de terrain et notamment aux étalements. Ce type de mouvement présente des distances de recul qui peuvent atteindre quelques centaines de mètres à partir du sommet du talus. L'intérieur de la cicatrice de ce type de glissement est caractérisé par des prismes triangulaires ayant la forme de horsts et des grabens. Peu de personne ont été témoins de ces glissements et les conditions qui les prédisposent ne sont pas encore bien connues à ce jour.

Le ministère des Transports du Québec dispose d'une base de données contenant plusieurs cas d'étalement. À partir de cette dernière, une compilation de 14 cas d'étalement dans les argiles sensibles a été réalisée sous forme de synthèse qui comprend l'analyse des caractéristiques de la pré-rupture, de la rupture et de la post-rupture. Les données analysées sont principalement géométriques, géomorphologiques et géotechniques.

L'analyse des caractéristiques de la pré-rupture de talus où des étalements sont survenus fait ressortir des plages de valeurs de hauteurs et d'inclinaisons assez faibles. L'analyse des données géotechniques montre que les étalements surviennent dans tous les types de sols argileux provenant des anciennes mers postglaciaires. Une relation possible entre le coefficient du poids des terres au repos, l'inclinaison et la hauteur du talus pourrait être explorée plus en détails afin de mieux comprendre les prédispositions aux étalements.

L'analyse des caractéristiques de la post-rupture est principalement axées sur la géomorphologie des débris. Les horsts présentent des angles en pointes approchent 60° , ce qui s'apparente à une rupture active. Cette étude semble démontrer une relation entre le nombre de horsts et la hauteur du talus avant la rupture. Des relations avec d'autres paramètres morphologiques ont aussi été explorées.

Cette synthèse met en évidence la complexité d'identifier des conditions particulières prédisposant aux étalements et plusieurs aspects restent à approfondir.



Analyse du glissement de Saint-Fabien de 1976 comme un cas de rupture progressive dans les argiles sensibles

F. Tremblay-Auger¹, A. Locat¹, S. Leroueil¹, D. Demers²

1. Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN), Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec

2. Ministère des Transports du Québec, Québec

En décembre 1976, un important glissement de terrain s'est produit près de la municipalité de Saint-Fabien, à 270 km au nord-est de la ville de Québec, au Canada. La zone du glissement se situe au creux d'une vallée rocheuse appalachienne partiellement remplie par des argiles sensibles de la mer de Goldwaith, recouvertes d'un dépôt de tourbe en exploitation au moment du glissement (figure 1). De plus, la route 132 traverse la zone du glissement et des travaux d'élargissement du remblai routier étaient en cours le long de cette dernière peu avant le glissement. Une des particularités de ce cas est que la surface du sol ainsi que la surface de rupture sont pratiquement horizontales. Aussi, cette dernière s'étend sur une distance de 200 m vers le nord et des zones passive et active ont pu être observées dans les débris. Le glissement faisant plus de 600 m en largeur a emporté avec lui la route 132, ainsi que le chemin de fer du CN. L'analyse de stabilité conventionnelle n'a pas permis d'expliquer l'étendue de la rupture et un autre mécanisme de rupture a été envisagé pour expliquer le glissement; soit la rupture progressive vers le bas comme décrit par Bernander (2000) et Locat et al. (2011), bien que rarement observée dans les argiles de l'est du Canada. En effet, la rupture progressive vers le haut est utilisée jusqu'à présent pour expliquer les étalements, qui se produisent dans les talus près de cours d'eau au Québec, alors que la rupture progressive vers le bas est plutôt observée dans des vallées argileuses en Scandinavie. Les investigations géotechniques de ce cas ont été effectuées par le Ministère des Transports (MTQ) en trois phases. La première a été réalisée en 1976-1977, après l'événement, et comportait des forages, des scissomètres, ainsi que la pose de piézomètres. La deuxième a été entreprise en 2005 et incluait des sondages au piézocône et au scissomètre, de nouveaux forages et la pose de piézomètres. Plus récemment en 2018, un nouveau forage et deux sondages au piézocônes ont été faits et deux nouveaux piézomètres ont été posés pour compléter l'information manquante pour la modélisation. Un levé gravimétrique, couvrant la vallée de part et d'autre, a permis de déterminer la profondeur du till. Ces données ont été mises à contribution pour la modélisation numérique en utilisant la méthode présentée par Locat et al. (2013, 2015). Par contre, la rupture a été initiée en sommet de pente au lieu d'en pied de talus. L'approche consiste en la modélisation numérique des contraintes initiales dans le dépôt avec l'aide du logiciel PLAXIS 2D (PLAXIS, 2018) et ensuite de modéliser l'initiation et la propagation de la rupture progressive le long de la surface de rupture potentielle avec le code d'éléments finis BIFURC (Jostad and Andersen, 2002). Les résultats de la modélisation ont permis de remarquer que le concept de rupture progressive pouvait expliquer l'initiation et l'étendue de la rupture observée à Saint-Fabien. De plus, l'influence des travaux le long de la 132 et de l'exploitation de la tourbe sur les contraintes initiales du dépôt a aussi été vérifiée.

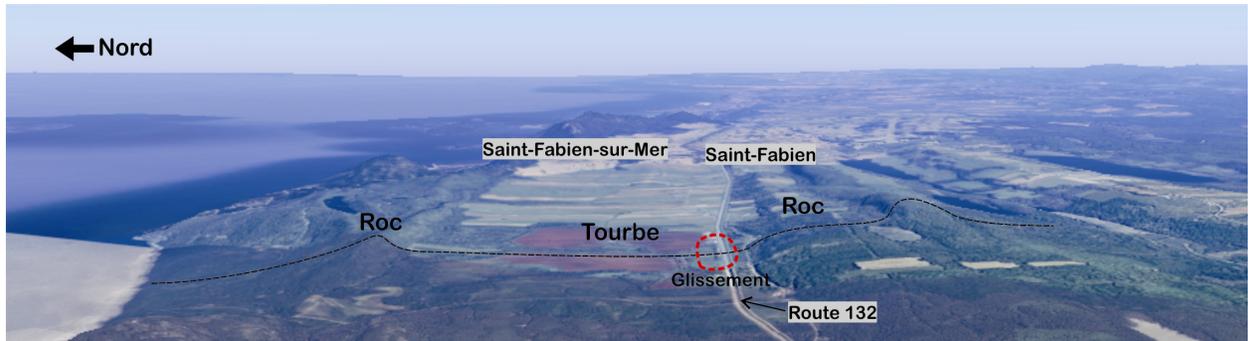


Figure 1: Localisation du glissement de Saint-Fabien, Québec

BIBLIOGRAPHIE

Bernander, S. 2000. *Progressive landslides in long natural slopes, formation, potential extension and configuration of finished slides in strain-softening soils*, Licentiate Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

Jostad, H.P. et Andersen, L. 2002. *Capacity analysis of anisotropic and strain-softening clays*, Compte-rendu du NUMOG VIII, Rome, Italy.

Locat, A., Leroueil, S., Bernander, S., Demers, D., Jostad, H.P. et Ouehb, L. 2011. *Progressive failures in eastern Canadian and Scandinavian sensitive clays*, Canadian Geotechnical Journal, 48: 1696-1712.

Locat, A., Jostad, H.P. et Leroueil, S. 2013. *Numerical modeling of progressive failure and its implication to spreads in sensitive clays*. Canadian Geotechnical Journal, 50: 961-978.

Locat A., Leroueil, S., Fortin, A., Demers, D. et Jostad, H.P. 2015. *The 1994 landslide at Saint-Monique, Québec: geotechnical investigation and application of progressive failure analysis*. Canadian Geotechnical Journal, 52: 490-504.

PLAXIS. 2018. *PLAXIS 2D 2018*, PLAXIS bv, Delft, Netherlands

Étude de l'infiltration et des variations verticales de la pression interstitielle dans un massif argileux: cas de Ste-Anne-de-la-Pérade (Québec)

A. Germain¹, J.-M. Lemieux¹, N. Kokutse¹

¹Université Laval, Faculté des sciences et de génie, Département de géologie et de génie géologique, Québec

La vallée du St-Laurent est caractérisée par des dépôts argileux marins et lacustres postglaciaires qui sont sensibles aux glissements de terrain. Un des facteurs importants responsable du développement de tels glissements est l'augmentation des pressions interstitielles due à l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette infiltration est plus importante lors de la fonte de la neige au printemps ou durant des événements climatiques extrêmes, comme de fortes précipitations, ce qui réduit la contrainte effective du sol. Dans le contexte des changements climatiques, ces événements climatiques extrêmes sont susceptibles de se produire plus souvent. Cette étude cherche à comprendre et prédire la réponse de la pression interstitielle aux événements climatiques dans les dépôts argileux, ce qui permettra une meilleure compréhension des mécanismes qui engendrent des glissements de terrain et aidera à réduire leur impact.

Le site d'étude présenté ici est situé à Sainte-Anne-de-la-Pérade (Québec) sur un terrain plat afin de faciliter la prise de données et leur interprétation. La stratigraphie du site a été déterminée ainsi qu'une caractérisation géotechnique des couches. Des données météorologiques et hydrogéologiques à haute résolution temporelle sont collectées à partir d'une station météorologique et de piézomètres à corde vibrante. Les résultats préliminaires des analyses ont permis de comprendre en partie la dynamique d'infiltration verticale sur le site. Des investigations complémentaires sont en cours en vue de caractériser les directions d'écoulement puisqu'une rivière (Sainte-Anne), située à environ 400 m du site d'étude, pourrait avoir un impact sur les pressions interstitielles observées et sur les directions d'écoulement. À terme, toute la caractérisation permettra d'élaborer le modèle qui servira à comprendre l'impact des changements climatiques sur l'évolution des pressions interstitielles dans le dépôt argileux.

Énergie de remaniement et glissement-coulée dans les argiles sensibles au Québec: Observations de terrain.

P. Locat^{1, 2}, S. Leroueil¹, D. Demers²

¹Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval

²Section des Mouvements de terrain, Direction de la géotechnique et de la géologie, ministère des Transports du Québec

Pour qu'une coulée argileuse puisse se produire, il est reconnu dans la littérature (Tavenas 1984, Leroueil 1996, Demers et coll. 2014) qu'il est nécessaire :

1. D'avoir un premier glissement de terrain en condition drainée;
2. Que l'escarpement arrière du premier glissement de terrain soit instable en condition non drainée;
3. Que l'argile puisse s'écouler, une fois remaniée, c.-à-d. que $I_L > 1,2$ (ou $Su_r < 1$ kPa) sur une épaisseur suffisante du dépôt;
4. Que l'énergie disponible lors de la rupture d'une tranche de terrain en condition non drainée dépasse un certain seuil afin que l'argile constituant cette tranche de sol atteigne un degré de remaniement suffisant pour s'écouler;

L'étude présentée ici a permis de documenter les points 3 et 4 mentionnés ci-dessus, à partir de l'examen récent de cas de glissements de terrain dans les argiles sensibles de l'est du Canada pour lesquels des données géotechniques et géométriques de bonne qualité sont disponibles dans la littérature et dans les archives du ministère des Transports du Québec.

Modélisation numérique des coulées argileuses

D. Turmel^{1,2}, A. Locat², J. Locat¹, P. Locat^{2,3}, S. Leroueil², D. Demers³

¹. LERN, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec

². LERN, Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Québec

³. Ministère des Transports du Québec, Québec.

Les glissements de terrain sont généralement décrits comme ayant quatre étapes, soit la pré-rupture, la rupture, la post-rupture, et finalement la réactivation. La phase de rupture se caractérise par la formation d'une surface de rupture, tandis que la phase de post-rupture comprend le mouvement du sol suite à la formation de la surface de rupture, jusqu'à l'arrêt des matériaux. Dans le sud du Québec, la majorité des glissements de terrain se produisent dans des matériaux argileux postglaciaires. Parmi ces glissements, notons les glissements faiblement ou non rétrogressifs, tels les glissements superficiels ou les glissements rotationnels, et les glissements fortement rétrogressifs, tels les étalements et les coulées argileuses. Cette dernière catégorie de glissements est caractérisée par une distance de recul pouvant atteindre plusieurs dizaines, sinon des centaines de mètres. De plus, par exemple dans le cas des coulées argileuses, la propagation des débris peut atteindre des distances de plusieurs centaines de mètres, et ce sur des terrains relativement plats.

Afin de pouvoir atteindre ces distances de parcours impressionnantes, les matériaux doivent passer de leur état intact à leur état remanié présentant une très faible résistance au cisaillement (<1 kPa). Ce remaniement consomme une partie de l'énergie potentielle qui ne peut alors être utilisée en énergie cinétique pour le mouvement. Afin de pouvoir modéliser adéquatement la distance de propagation des débris des coulées argileuses, cette perte d'énergie se doit d'être considérée dans la modélisation. Actuellement, les analyses à rebours sont effectuées en ajustant les paramètres rhéologiques, trouvés par essais et erreurs en fonction de la distance de parcours. Les paramètres apparents obtenus tiennent compte du remaniement mais par contre, il n'existe pour le moment aucune manière de calibrer ces paramètres apparents avec les données de terrain et de laboratoire.

Une nouvelle approche a donc été développée, où l'énergie perdue dans le remaniement est soustraite de l'énergie potentielle du glissement, et ce directement dans la modélisation. Les travaux précurseurs de Flon (1982) sur l'énergie de remaniement et les travaux successifs de Locat et al. (2008) par exemple permettent de déterminer, en fonction des paramètres géotechniques des matériaux, l'énergie perdue dans le remaniement. Ces divers paramètres sont alors intégrés, et la rhéologie réelle des matériaux, trouvée à l'aide d'essais en laboratoire, peut être utilisée dans les modélisations numériques. Nous présenterons ici ces aspects de la modélisation numérique, en nous basant sur une étude de cas réelle où des données morphologiques, géotechniques et rhéologiques sont disponibles.

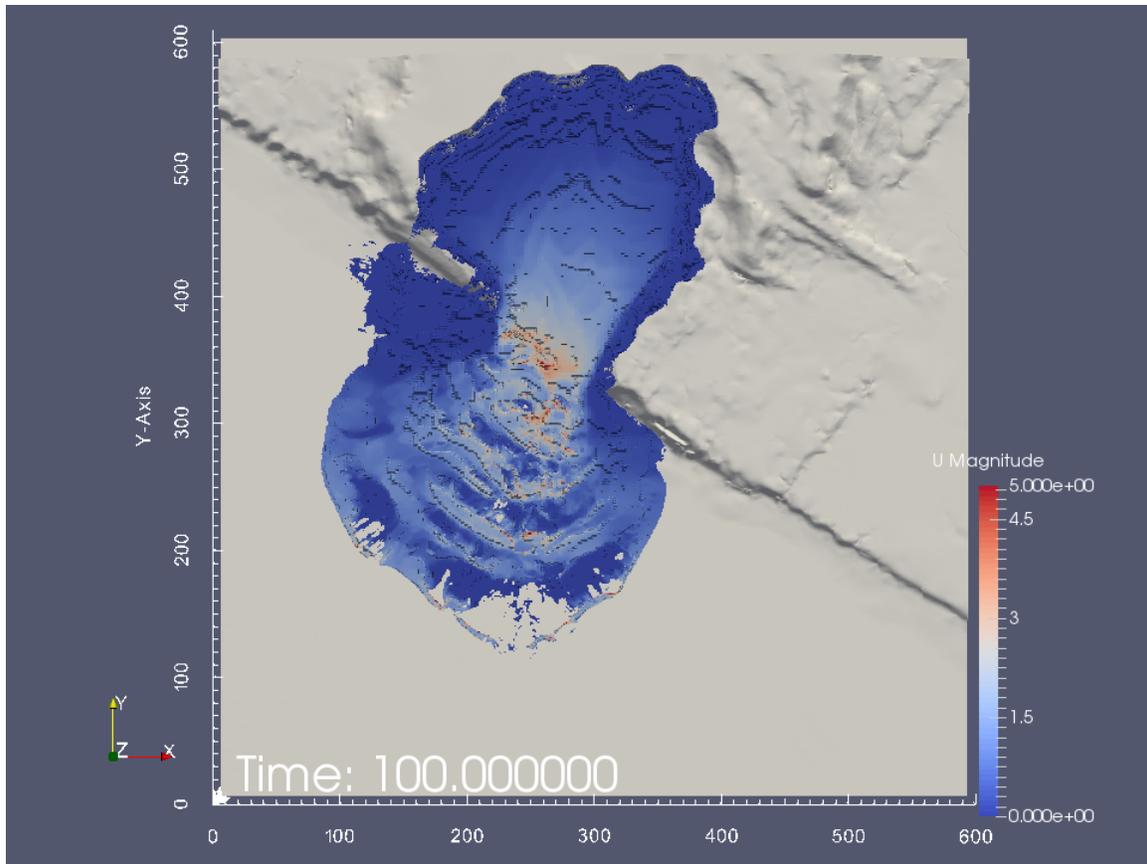


Figure 1. Exemple de modélisation de la coulée argileuse de Rivière Saint-Jean

Flon, P., 1982, Énergie de remaniement et régression des coulées d'argiles, M.Sc. thesis, Department of civil engineering, Laval University, Quebec, Canada.

Locat, P., Leroueil, S., and Locat, J., 2008, Remaniement et mobilité des débris de glissements de terrain dans les argiles sensibles de l'Est du Canada, in Compte-rendu de la 4^e conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion, pp. 97-106.

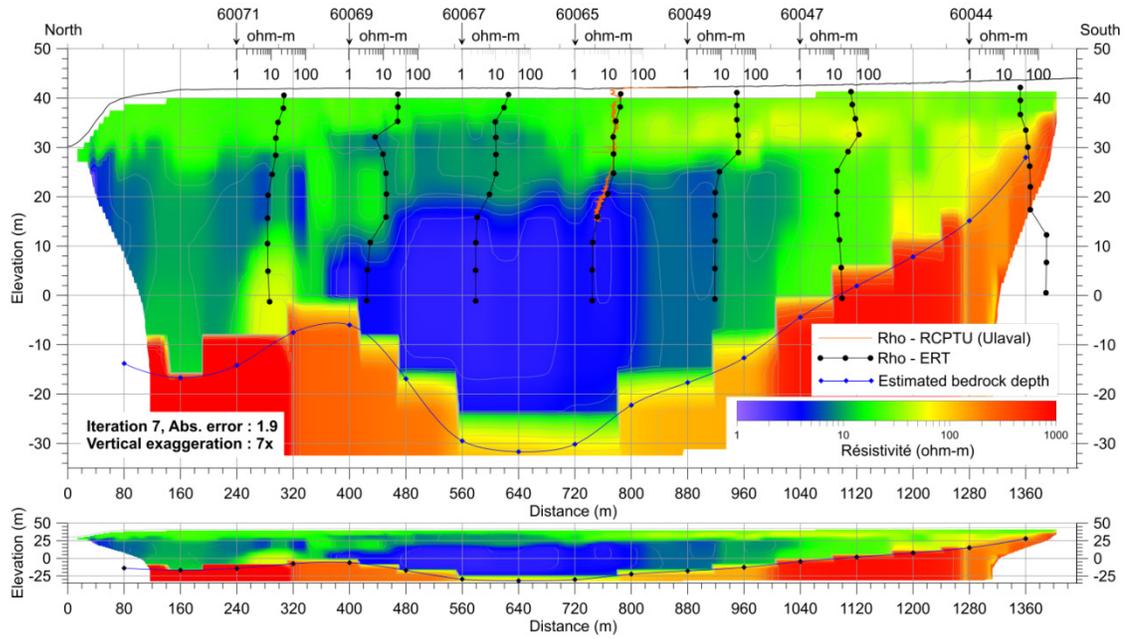
Propriétés géotechniques et électriques de l'argile sensible de Saint-François-de-la-Rivière-du-Sud, Québec, Canada

Sandra Veillette¹, Ariane Locat¹ & Richard Fortier¹, Karine Bélanger², Denis Demers²

1. Université Laval, Québec, Québec, Canada

2. Ministère des Transports, Québec, Québec, Canada

Plusieurs cicatrices de coulée argileuse dans un dépôt d'argile ont été cartographiées le long des berges de la rivière du Sud dans la région de Saint-François-de-la-Rivière-du-Sud près de Montmagny, Québec, Canada. En collaboration avec le Ministère des Transports du Québec et l'Université Laval, des travaux d'investigation géotechnique et géophysique, dont notamment des essais de pénétration au piézocône, de l'échantillonnage lors de forages et de la tomographie de résistivité électrique, ont été réalisés pour caractériser les propriétés géotechniques et électriques de ce dépôt d'argile afin d'évaluer si la tomographie de résistivité électrique est une méthode géophysique adéquate de cartographie des zones potentiellement exposées aux glissements de terrain fortement rétrogressifs. La tomographie de résistivité électrique d'une longueur de près de 1500 m a été réalisée perpendiculairement à l'axe de la vallée sur la rive sud de la rivière du Sud. Six essais de pénétration au piézocône, dont un muni d'un module de résistivité électrique, ainsi que trois forages ont été réalisés le long de cette ligne de levé. Des essais géotechniques de base ont aussi été faits sur les échantillons du dépôt d'argile. Selon les résultats, quatre unités distinctes d'argile ont été identifiées dans le dépôt. L'unité située en surface (unité A) est constituée d'argile sensible au remaniement, c'est-à-dire que la résistance au cisaillement à l'état remanié du sol est inférieure à 1 kPa, alors que les trois unités sous-jacentes (B, C, D) sont constituées d'argile dont la résistance au cisaillement à l'état remanié est supérieure à 1 kPa. Pour chacun des échantillons d'argile recueillis sur le terrain, les résultats des essais géotechniques ont été comparés avec la résistivité électrique du modèle de résistivité électrique obtenu, ainsi qu'avec la salinité de leur eau interstitielle. Tous les échantillons d'argile sensible au remaniement correspondaient aux mesures de résistivités électriques de plus 10 ohm-m et la salinité de l'eau interstitielle était inférieure à 2,8 g/l. Des corrélations entre les différentes propriétés des échantillons ont été déterminées. Il y a une relation claire entre la salinité de l'eau interstitielle et la résistivité électrique mesurée. Toutefois, quelques points de mesures, qui proviennent de l'unité B, ne suivent pas parfaitement cette relation. En effet, ces échantillons ont une résistance au cisaillement à l'état remanié plutôt élevée, alors que leur résistivité électrique est parfois supérieure à 10 ohm-m. La teneur en particules silteuses des échantillons de cette unité est légèrement plus élevée que les autres et leur teneur en eau est plus faible. Cela met en évidence que la salinité n'est pas le seul facteur qui influence la résistivité électrique mesurée.



Suivi des pentes argileuses au Québec dans le contexte des changements climatiques: instrumentation.

Nomessi Kokutse¹, Alexandra Germain¹, Jean-Michel Lemieux¹

¹Université Laval, Faculté des sciences et de génie, Département de géologie et de génie géologique, Québec

Au Québec, les glissements de terrain dans les argiles sensibles devraient augmenter de manière significative dans le futur compte tenu des changements climatiques (précipitations extrêmes, hausse des températures, etc). Pour une gestion adéquate de ces aléas, il est important d'avoir une meilleure compréhension des conditions climatiques et hydrogéologiques d'initiation de ces ruptures de pentes. L'état actuel des connaissances à l'échelle de la province étant insuffisant, une vaste étude a été entreprise dans le cadre d'un partenariat entre le Ministère des Transports du Québec, le Ministère de la Sécurité Publique du Québec et l'Université Laval. Les objectifs sont : (1) Acquérir des données pour caractériser les conditions d'eau souterraine et météorologiques d'initiation des glissements, (2) Estimer l'impact des changements climatiques sur les pressions interstitielles dans les dépôts argileux.

Différents sites ont été retenus pour l'instrumentation sur la base de critères permettant de tenir compte de la variabilité des conditions hydrogéologiques, climatiques, des types de glissements de terrain, etc. Les différents sites retenus pour l'étude, leur répartition spatiale à l'échelle de la province et toute l'instrumentation requise sont présentés. Par ailleurs, sont aussi exposés les aménagements d'installation de piézomètres à corde vibrante dans la zone saturée des dépôts, les équipements de suivi des teneurs en eau dans la zone non saturée, etc. Quelques résultats issus de ces observations sont également présentés, à titre d'exemples de données issues de l'instrumentation.