Caractérisation et surveillance d'un glissement rocheux actif d'une mine à ciel ouvert en utilisant le LiDAR

Philippe Caudal & Martin Grenon

Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux – Université Laval, Québec, QC, Canada

Jacques Locat & Dominique Turmel

Département de géologie et de génie géologique - Université Laval, Québec, QC, Canada

ABSTRACT

In July 2012, a large slope failure was initiated on the east wall of LAB Chrysotile Mine in Thetford Mines Québec, Canada. This slope failure had an irremediable impact on the regional highway located at the crest of the slope thus affecting the economy of the local communities. The paper main focus is the investigation of that rock slide using both terrestrial (TLS) and airborne (ALS) laser scanning. Since 2010, three ALS and twelve TLS were performed to characterize and monitor the slide. Laser scanning was first used to investigate the geometry of the slide, its volume, topography, size and orientation of the scarp, etc. It was then used to investigate the rock slide 3D displacement thus enabling a better understanding of the sliding kinematics. This paper is clearly showing the ability of LiDAR scanning in providing insightful quantitative information on large rock mass sliding.

RÉSUMÉ

En Juillet 2012, une large rupture de pente s'est produite sur le mur Est de la mine LAB Chrysotile de Thetford Mines Québec, Canada. Cette rupture de pente a eu un impact irrémédiable sur la route régionale située au sommet de la pente, affectant l'économie des communes environnantes. L'objet de cet article est de comprendre ce glissement de terrain en utilisant à la fois le LiDAR à balayage laser terrestre (TLS) et aérien (ALS). Depuis 2010, trois ALS et douze TLS ont été réalisés pour caractériser et surveiller le glissement. Le balayage laser a d'abord été utilisé pour étudier la géométrie du glissement : son volume, la topographie, la taille et l'orientation de l'escarpement, etc. Il a ensuite été utilisé pour étudier les déplacements 3D pour avoir une meilleure compréhension de la cinématique du glissement. Cet article montre clairement la capacité du balayage LiDAR à fournir des informations quantitatives pertinentes sur la masse rocheuse en mouvement.

1 INTRODUCTION

1.1 Généralités

Dans le cas d'une exploitation minière, l'intervention évolutive sur les pentes rocheuses augmente les instabilités : basculement de blocs, glissements planaires, dièdres ou circulaires (Wyllie and Mah 2004). Ces aléas devant être fortement réduits, il faut optimiser la conception de ces ouvrages miniers en intégrant les concepts de sécurité, de récupération du minerai et de rentabilité pour satisfaire aux objectifs attendus par les opérateurs miniers et les investisseurs. Pour respecter ce cahier des charges, la phase de surveillance des pentes minières est cruciale (Read and Stacey 2009), car elle permet d'assurer leur stabilité et de gérer les instabilités pendant et après la période d'exploitation.

Le développement de nouvelles technologies au cours des dix dernières années en termes d'outils de mesures, a apporté une avancée considérable quant à l'efficacité et l'amélioration des procédures de surveillance; la photogrammétrie (Lato and Vöge 2012), le GB-SAR (ground-based synthetic aperture radar) (Teza et al. 2008, Antonello et al. 2004) ou LiDAR (*Light Detection And Ranging*) (Jaboyedoff et al. 2012) sont les principaux outils qui vont dans ce sens.

Les LiDAR terrestre (Optech 2011) et aéroporté sont les outils qui ont été choisis pour réaliser l'étude proposée dans cet article qui porte sur la surveillance d'un glissement rocheux. Tel qu'indiqué par Lato et al. (2012), en combinant les nuages de points de ces deux types de LiDAR, une caractérisation structurale du massif rocheux peut être réalisée. En associant cette étude à celle de la quantification des déplacements, tel que proposé par Eberhardt et al. (2004), les mécanismes du glissement à l'échelle du massif se précisent.

1.2 Principe du LiDAR

Le LiDAR est un outil de mesure utilisant la technologie LASER pour numériser des surfaces dont l'aire peut varier du mètre carré au kilomètre carré. Deux méthodes de mesure existent. La première concerne le LiDAR terrestre qui consiste à mesurer le TOF (*time of flight*), temps de vol aller-retour d'une impulsion lumineuse pour permettre de générer des nuages de points nommés TLS (*Terrestrial LiDAR Scanning*) (Gordon and Charles 2008) (Figure 1). La deuxième méthode consiste à émettre en continu des impulsions déphasées à fréquences multiples. Cette méthode nommée CW (*Continus Wave*) est utilisée pour les LiDAR aéroportés (Wehr and Lohr 1999). Cette technique permet d'obtenir un nuage de points nommé ALS (*Airborn LiDAR Scanning*) (Figure 1).





Les avantages du LiDAR terrestre (Optech 2011) sont un paramétrage aisé, une acquisition des données pratique sur clef USB, une résolution spatiale paramétrable pouvant passer du centimètre au mètre entre chaque point et une grande mobilité permettant de numériser sous plusieurs angles des surfaces étendues. Son positionnement au sol a également l'avantage de numériser les occlusions ne pouvant pas l'être avec le LiDAR aéroporté. Par contre, ce dernier numérise de plus grandes surfaces, de l'ordre de plusieurs km², plus rapidement que le LiDAR terrestre (Abeliàn et al. 2014, Gordon and Charles 2008).

Les désavantages du LiDAR terrestre sont la distance maximale limitée entre le point de positionnement du LIDAR et la surface rocheuse (1.8km pour une réflectivité de 80% avec un positionnement face au massif pour le LiDAR ILRIS-3D-ER et une utilisation limitée ou proscrite en cas de forte humidité, de pluie ou de neige. De plus, le nombre de zones d'ombres peut être important selon que la numérisation du massif se fasse depuis un nombre de points de positions LiDAR limité et/ou des écarts d'angle de vue insuffisamment grands (Abeliàn et al. 2014, Gordon and Charles 2008). Une numérisation LiDAR aéroporté peut diminuer le nombre de zones d'ombres si les contraintes de positionnement au sol sont trop importantes.

Les cas d'études avec utilisation LiDAR sont nombreux et montrent un éventail très large des possibilités offertes par cette technologie (Jaboyedoff et al. 2012, Lato et al. 2012, Ferrero et al. 2009, Froese 2009, Teza 2008).

1.3 Cas d'étude

La mine à ciel ouvert LAB Chrysotile (profondeur de la fosse principale : 330m) est localisée à proximité de la ville de Thetford Mines, Québec, Canada. Depuis l'arrêt de son exploitation pour des raisons économiques et l'arrêt des pompages en 2011, un glissement s'est produit sur le mur Est de la fosse le 12 juillet 2012. Cette rupture a eu pour conséquence d'emporter une portion de la route 112 sur laquelle des fissures de tension étaient apparues dès 2011. La route 112 étant la route principale et l'axe économique de la région, sa fermeture a des conséquences importantes pour la population locale. Pour cette raison, cette portion de route a fait l'objet d'une surveillance par le MTQ (Ministère des Transports du Québec) dès l'apparition des premières fissures (Dorval 2011). À partir de juin 2012, le mécanique Laboratoire de des du roches



Figure 2. Surveillance LiDAR aéroporté (ALS) du mur Est de la mine LAB Chrysotile le 22 novembre 2010.



Figure 3. Surveillance LiDAR aéroporté (ALS) du mur Est de la mine LAB Chrysotile après la rupture du 12 juillet 2012.

Département de génie des mines de l'Université Laval a poursuivi la surveillance du mur Est de la fosse à l'aide d'un LiDAR terrestre (Optech 2011). Ce suivi a permis de produire une série de MNT (*Modèles Numériques de Terrain*) (Figure 2 et Figure 3) pour reconstituer l'évolution du glissement sur 18 mois et montrer que le glissement était toujours actif en novembre 2013. D'autres travaux actuellement en cours portent sur l'analyse de la stabilité du mur Ouest de la fosse à proximité du nouveau tracé de la route 112 (Amoushahi et al. 2014).

2 SURVEILLANCE LIDAR

2.1 Positions du LiDAR terrestre

Deux positions A et B ont été choisies (Figure 4) pour effectuer la numérisation jusqu'à l'ennoiement du point B au cours de l'été 2013. Par conséquent, les TLS sont enregistrés uniquement du point A à partir de septembre 2013; d'autres positions LiDAR n'ont pas pu être choisies pour des raisons de sécurité ou d'inaccessibilité.



Figure 4. Positions du LiDAR face au mur Est.

2.2 Suivi LiDAR

Avant septembre 2013, deux TLS étaient obtenus (2 positions A et B) et combinés pour produire un TLS unique avec une densité moyenne de 22 cm entre les points. Cette densité a été maintenue à partir de septembre 2013 depuis l'unique point de mesure A. Or la distance de ce point à la zone Sud du mur Est, dépasse la distance optimale qui est d'environ 1.8km. Par conséquent, le MNT produit à partir de ces nuages de points, est constitué de nombreuses zones d'ombres pour ce secteur. En revanche, selon Bonnaffe et al. (2007), le niveau de détail reste suffisant pour obtenir de bons résultats. Pour améliorer la précision, les TLS obtenus (Tableau 1) ont ensuite été combinés à l'ALS qui le précède pour produire un MNT pour chaque date d'enregistrement (Figure 2, Figure 3). Autrement dit, 15 MNT ont été réalisés pour reconstituer l'évolution du glissement du mur Est sur 2 années consécutives (Tableau 1). La rupture s'étant produite le 12 juillet 2012,

la géométrie de la fosse a donc été capturée avant et après la rupture.

Tableau 1. Dates des relevés LiDAR au cours de la période de surveillance.

MNT_ID	Type de nuage de points	Date du relevé	Temps écoulé (jours)
0	ALS	22 nov 2010	-
1	TLS	29 juin 2012	0
2	TLS	11 juil 2012	12
3	ALS	13 juil 2012	14
4	TLS	02 août 2012	34
5	TLS	29 août 2012	61
6	TLS	27 sept 2012	90
7	TLS	12 nov 2012	136
8	TLS	05 juin 2013	341
9	TLS	17 juin 2013	353
10	ALS	05 août 2013	402
11	TLS	19 sept 2013	447
12	TLS	19 sept 2013	447
13	TLS	11 oct 2013	469
14	TLS	08 nov 2013	497

3 ANALYSE PRÉLIMINAIRE

3.1 Géologie

La géologie du site est schématisée sur les Figure 5 et Figure 6. Le mur Est est constitué de péridotite massive dans la partie haute (en jaune sur les Figure 5 et Figure 6) et de serpentinite schisteuse dans la partie basse (en orange sur la Figure 5 et Figure 6). Une bande de granite massive (en vert sur Figure 5) traverse la mine dans la direction SO-NE. Pour finir, deux inclusions de talc sont présentes dans la partie basse du mur Sud de la fosse principale (en violet sur Figure 5).



Figure 5. Plan de la mine LAB Chrysotile avec la géologie avec l'axe Nord orienté vers la droite. (Beauchamp 1994)

D'autres plans sur papier fournis par le bureau d'ingénierie de la minière permettent d'estimer

l'orientation et le pendage du plan qui sépare la serpentinite de la péridotite massive dans le mur Est. L'orientation de ce plan est estimée à 60°/046°. La géologie simplifiée du mur Est peut être représentée comme proposée selon une section du mur Est (Figure 6).



Figure 6. Géologie simplifiée du mur Est selon une coupe orientée selon la direction de 250°.

3.2 Orientation et géométrie des pentes

Pour la suite de l'étude, le mur Est de la mine LAB Chrysotile est divisé en 4 secteurs (secteur 1, 2, 3 et 4 sur la Figure 7) et le mur Sud en 2 secteurs (secteur 5 et 6 sur la Figure 7). Cette procédure permettra par la suite de regrouper les vecteurs déplacements par secteur.



Figure 7. Division de la zone d'instabilité en 6 secteurs

L'orientation moyenne de la pente a été évaluée pour chaque mur à l'aide du logiciel Polyworks (Innovmetric 2012). Le pendage et la direction du pendage est de 42°/250° pour le mur Est (secteur 2, 3 et 4), de 36°/295° pour le mur Sud-Haut (secteur 5) et 31°/320° pour le mur Sud-Bas (secteur 6).

3.3 Étendue du glissement

Un différentiel entre MNT selon l'axe vertical fait ressortir l'étendu du glissement (ligne bleu sur la Figure 8). L'analyse de cette image permet de conclure que la masse en mouvement excède largement celle de la zone ciblée au départ pour l'étude (délimitée par la ligne blanche sur la Figure 8). En effet, elle s'étend de 250m plus en arrière vers le Sud-Est de la fosse principale. Les limites du glissement sont confirmées sur le terrain par la présence de fissures de tension. Finalement, le résultat de cette simple opération montre la pertinence d'utiliser le LiDAR pour obtenir de l'information quantitative de manière efficace tel que souligné par Prokop et Panholzer (2009).



Figure 8. Écart de distance (m), entre le MNT du 22 novembre 2010 et celui du 5 août 2013 avec la zone très active délimitée par la ligne blanche et l'étendue globale du glissement délimitée par la ligne bleue.

3.4 Variation du volume négatif

Comme déjà utilisé pour d'autres cas d'études (Abeliàn et al. 2010, Froese et al. 2009, Eberhardt et al. 2007, Squarzoni et al. 2003), une autre opération simple et rapide permet de mesurer les volumes déplacés entre 2 MNT. Autrement dit, le calcul du volume négatif ou positif entre deux MNT permet de détecter les zones d'érosion ou d'instabilités d'un massif. Concernant le glissement du mur Est de la mine LAB Chrysotile, il est intéressant de suivre son évolution à partir du volume négatif tel que schématisé à la Figure 9. La courbe obtenue (Figure 10) montre que l'activité du glissement présente un cycle « actif-stable » pour chaque année de suivi. En pratique, les points de cette courbe sont obtenus en mesurant les différences de volume entre le MNT du 29 juin 2012 et les suivants.

Le glissement du mur Est ayant débuté aux environs du 9 juillet, les auteurs considèrent que le volume négatif est négligeable entre le 29 juin 2012 et le 9 juillet 2012. Entre le 9 juillet et le 11 juillet, l'augmentation brutale du volume négatif est annonciatrice du glissement qui survient le 12 juillet. Un relevé LiDAR aéroporté a été enregistré le 13 juillet 2012 (jour 15 sur la Figure 10) et montre que le volume négatif passe subitement de 0,3.10⁶ m³ le 11 juillet 2012 à environ 2,7.10⁶ m³ le 13 juillet 2012. Puis, le glissement continue d'être actif pour se stabiliser au bout de 137 jours à 3,5.10⁶ m³ (Figure 10). Ne pouvant pas effectuer de mesure au cours de la période hivernale (en pointillée sur la Figure 10), les auteurs font l'hypothèse que pendant la période de gel (1^{er} décembre 2012 au 15 avril 2013), les déplacements sont négligeables. À partir de la fin de la période

hivernale et ce jusqu'au premier relevé LiDAR terrestre de 2013, effectué le 5 juin (jour 342 de suivi), les auteurs font l'hypothèse que la variation du volume négatif est linéaire. Cette période (en pointillé sur la Figure 10) qui suit celle de la période hivernale, montre que le volume occulté en haut de talus a augmenté par rapport au dernier volume négatif mesuré en 2012, pour atteindre 4,3.10⁶ m³. Par la suite, la forme de la courbe montre une diminution de la variation du volume négatif pour se stabiliser au début de la période hivernale 2013.



Figure 9. Schématisation des volumes négatifs et positifs après rupture de pente (Caudal et al 2014).



Figure 10. Variation du volume négatif cumulatif au cours de la période de surveillance du mur Est du 29 juin 2012 au 08 novembre 2013.

3.5 Vitesse et durée de remplissage

La vitesse de remplissage est calculée à partir du différentiel volumique et de l'élévation des surfaces d'eau dans les deux fosses entre chaque MNT. Les mesures ont été réalisées à l'aide du logiciel 3D Polyworks (Innovmetric 2012) en prêtant une attention particulière à l'interprétation des étendues d'eau faite par le LiDAR, comme signifié dans l'étude de Höfle et al. (2009). À partir des résultats obtenus, les vitesses de remplissage sont estimées à environ 500 m³/h pour la fosse principale et 430 m³/h pour l'extension N-E (Figure 5) (Caudal 2012). Pour finir, ces deux vitesses et le volume de la fosse ultime permettent d'estimer approximativement l'année de fin de remplissage à 2043 (Caudal 2012) en tenant compte de la période hivernale de 4,5 mois.

4 ANALYSE STRUCTURALE

L'analyse structurale préliminaire est réalisée sur la partie apparente de la surface de rupture du mur Est avec l'ALS 2013 et le dernier TLS enregistré en 2013. Ces deux nuages de points sont importés dans le logiciel Coltop (Terr@num 2013) qui calcule automatiquement la normale pour chaque point du nuage (Figure 11 et Figure 12). Concernant le TLS (Figure 12), le blanc est la couleur dominante du secteur Sud du mur Est. Cette dégradation du nuage s'explique par la présence de nombreuses zones d'ombres et une faible densité de points dans ce secteur, produisant, de fait, une forte contrainte pour le calcul des normales par Coltop. Pour l'ALS (Figure 11), les zones de couleur noire représentent des cavités non visibles depuis les airs. Elles ne contiennent aucune normale. Par conséquent, l'analyse structurale devient pertinente et significative lorsque ces deux nuages sont combinés pour compléter les zones d'ombres de l'une par les zones denses en normales de l'autre et réciproquement.



Figure 11. Normales de la surface de rupture extraites de l'ALS 2013.



Figure 12. Normales de la surface de rupture extraites du TLS novembre 2013.

L'analyse structurale de l'ALS permet de faire ressortir deux familles de joints en violet et bleu ciel sur la Figure 11. Pour le TLS, l'analyse est réalisée principalement sur une zone contrastée, cerclée en rouge sur la Figure 13, faisant ressortir plusieurs familles de joints. La combinaison des résultats obtenus des deux nuages permet de trouver 5 familles de joints à partir de 88 pôles (Tableau 2) et représentés par le stéréonet de la Figure 14 réalisé à l'aide du logiciel Dips 6.0 (Rocscience 2013). En comparant ces familles à celles proposées par le bureau d'ingénierie de LAB Chrysotile (Tableau 2) (Stacey 1978), les familles 1, 2 et 3 peuvent être considérées similaires en acceptant une certaine variabilité quant à la valeur moyenne. Cette hypothèse est confirmée par la dispersion assez élevée de l'orientation des joints comme l'indique la constante de Fisher K du Tableau 2. Pour terminer, la technique 3D permet de faire apparaître deux nouvelles familles (4 et 5

sur la Figure 14), non spécifiées par le bureau d'ingénierie. La famille 4 s'avère critique lors de l'analyse de la cinématique du glissement présentée à la section 5.



Figure 13. Agrandissement de la zone principale où a été mesurée la majorité des structures sur le TLS de novembre 2013.

Tableau 2 : Familles de joints déterminées par MNT et fournies par LAB Chrysotile.

Source	Famille ID	#Pôles	Dip/Dip Direction	K (Fisher)
	1	5	32°/081°	17.2
	2	19	78°/041°	63.8
MNT	3	23	77°/116°	19.4
	4	33	61°/302°	14.3
	5	8	49°/181°	26.6
	1	N/A	40°/080°	N/A
Chrycotilo	2	N/A	85°/255°	N/A
Chrysolile	3	N/A	80°/130°	N/A



Figure 14. Stéréonet des joints déterminés avec Coltop à partir des MNT (88 pôles).

À partir du stéréonet de la Figure 14, une analyse est réalisée pour connaître les types de glissements susceptibles de se produire sur le mur Est. Il ressort que seules des ruptures de type dièdre peuvent survenir. En prenant deux angles de friction (24° et 30°) compris dans l'intervalle proposé par le bureau d'ingénierie de la minière, la probabilité d'une rupture dièdre causée par l'intersection des familles de joints 4 et 5, s'élève à 63% pour 24° (Figure 15). Pour 30°, la probabilité descend à 47%. Le pôle représentant la ligne par l'intersection des plans des familles de joints 4 et 5 a une orientation estimée à 235°/35°. Son orientation explique la rupture dièdre localisée entre les secteurs 2 et 3 (Figure 7) et datant de 2009. Elle explique également la série de formes en dièdre formant le haut de la surface de rupture, située au-dessus du secteur 2 (Figure 16).



Figure 15. Probabilité de rupture cinématique de 64% d'avoir une rupture dièdre dans le mur Est, avec les familles de joints 4 et 5 pour un angle de friction de 24°.

5 CINÉMATIQUE DU GLISSEMENT

L'analyse structurale ne suffit pas à établir les causes de la rupture sur le mur Est. D'autres éléments doivent être apportés pour y parvenir et l'utilisation du LiDAR comme outil de surveillance est d'un intérêt certain pour atteindre cet objectif. En effet, à partir des MNT couvrant une période de 2 ans, des vecteurs déplacements peuvent être définis. Leurs composantes permettant de quantifier les déplacements ainsi que leur orientation, vont permettre notamment de déterminer s'il existe une cohérence entre l'orientation des vecteurs déplacements et l'orientation des familles de joints établie à la section précédente.

5.1 Vecteurs déplacements

Pour chaque secteur identifié à la figure 6, des points caractéristiques sont identifiables tout au long du suivi. Leur position sur chaque MNT est reliée pour produire des vecteurs déplacements. Par exemple, la Figure 16 montre visuellement la position des vecteurs déplacements pour la route 112 (secteur 1). Les vecteurs de couleur rouge représentent les déplacements entre le MNT du 11 juillet 2012 et celui du 13 juillet 2012. Pour des raisons de lisibilité, les vecteurs mesurés successivement entre les autres MNT ne sont pas représentent la somme des vecteurs déplacements en bleus représentent la somme des vecteurs déplacements mesurés entre tous les MNT jusqu'au 5 août 2013.

Le Tableau 3 présente l'orientation des déplacements moyens pour les différents secteurs, tandis que le Tableau 4 présente la dispersion autour de cette valeur moyenne. Les secteurs 1 et 6 se distinguent des autres par un nombre de vecteurs plus petit. En fait, la route 112 (secteur 1) et la butée du mur Sud (secteur 6) ont des formes plutôt planes et régulières ne permettant pas de faire ressortir et de relier aisément des singularités terrain.



Figure 16. Vecteurs déplacements pour la période entre le 11 et 13 juillet 2012 (en rouge) et du 13 juillet 2012 au 5 août 2013 (en bleu).

Tableau 3. Direction/Plongée des vecteurs déplacements moyens et leur composante cartésienne.

Secteur ID	Direction/ Plongée	Vecteur déplacement unitaire (composantes cartésiennes)		
		Est	Nord	Élévation
1	275°/55°	-0.57	0.05	-0.82
2	270°/45°	-0.71	0.00	-0.71
3	280°/45°	-0.70	0.12	-0.71
4	260°/06°	-0.10	-0.17	-0.11
5	292°/20°	-0.87	0.35	-0.34
6	314°/03°	-0.72	0.70	-0.05

Tableau 4. Répartition et variabilité de la distribution des vecteurs déplacements par secteur.

Secteur ID	#Pôles	K (Fisher)
1	30	26
2	104	23
3	103	21
4	121	28
5	103	17
6	17	91

Étant donnée la dispersion moyenne des vecteurs pour les secteurs 1, 2 et 3, représentée par la constante de Fisher K (Tableau 4), et la valeur similaire des pôles moyens associés à ces mêmes secteurs (Tableau 3), leur orientation peut être considérée identique. Cette hypothèse s'applique uniquement à ces 3 secteurs, car les autres ayant des orientations trop différentes doivent être étudiés séparément.

Pour conclure cette section, l'ensemble de la partie supérieure du glissement sur le mur Est s'opère dans une seule et même orientation (275°/55°) tandis que la partie inférieure se déplace dans la même direction que la pente (section 3.2) avec une plongée très faible. Concernant le mur Sud, le déplacement se produit dans la même direction que la pente du haut pour le secteur 5 (section 3.2) et la pente du bas pour le secteur 6 (section 3.2).

5.2 Évolution des déplacements par secteur

Pour les secteurs 1 à 4, la composante cumulative selon l'axe des déplacements (Tableau 3) de chaque vecteur est représentée graphiquement sur la Figure 17. La comparaison des courbes obtenues montre une hétérogénéité significative des déplacements entre les secteurs 1 à 3. Si l'orientation est supposée similaire (section 5.1), les déplacements ne le sont pas.



Figure 17. Évolution des déplacements cumulatifs suivant la direction des vecteurs déplacements pour les secteurs 1, 2, 3 et 4.

Afin d'analyser plus finement ces hétérogénéités, la période de suivi est divisée en 3 périodes (Tableau 5). La première est de 2 jours et couvre la rupture du 12 juillet 2012. La deuxième couvre l'année 2012 après la rupture du 12 juillet et la troisième l'année 2013 (notons que les dates inscrites dans le Tableau 5 font référence aux dates d'enregistrement LiDAR). Pour chacune de ces périodes et chacun des secteurs du mur Est, la magnitude est mesurée (Tableau 5).

Au cours de la première période, la magnitude des secteurs 1 et 2 est identique et de 10m supérieure à celle du secteur 3. Ensuite, en restant du même ordre de grandeur, les magnitudes de ces secteurs montrent une certaine hétérogénéité. D'ailleurs, les déplacements associés au secteur 3 sont moindres que ceux du secteur 2 au cours de la deuxième période et deviennent plus grands au cours de l'année 2013. Les déplacements pratiquement horizontaux du secteur 4 sont mesurés sur la surface non recouverte par l'eau. Il est pertinent d'affirmer que les déplacements au pied de ce secteur sont beaucoup plus importants. Il n'est donc pas aisé d'analyser les déplacements de ce secteur correctement.

La surveillance du mur Sud n'étant pas aussi précise que celle du mur Est à cause de la distance importante entre le LiDAR et cette zone du mur, seuls les MNT produits à partir des ALS (Tableau 1) ont été utilisés pour mesurer les écarts de distance. Le MNT pouvant servir de référence à la mesure est celui construit à partir de l'ALS 2010. Si les déplacements dans cette zone ont débuté avant le 11 juillet 2012, il n'est pas possible de le savoir avec les données acquises au cours de la période de surveillance. Pour cette raison, les auteurs ont choisi de représenter les déplacements non cumulatifs sous forme d'histogramme (Figure 18). Il permet de montrer que les déplacements sont constants et quantifiés à 5m pour les 2 périodes dans le secteur 5. En revanche, ils diminuent fortement dans le secteur 6.

Tableau 5. Mesure de la magnitude du déplacement lors de la journée du 12 juillet 2012, puis pour le reste de l'année 2012 et enfin pour l'année 2013.

	Magnitude (m)		
Secteur ID	Du 11/07/12 au 13/07/12	Du 13/07/12 au 12/11/12	Du 12/11/12 au 08/11/13
1	66	22	27
2	65	24	20
3	54	16	24
4	56	21	18

5.3 Écarts de distances entre MNT

En utilisant les composantes des vecteurs du Tableau 3, il est possible de mesurer les écarts de distance entre chaque point du MNT du 29 juin 2012 et les autres. Cette opération traduit fidèlement l'évolution des déplacements selon les secteurs ciblés comme le montre la Figure 19 pour les secteurs 1, 2 et 3. Les hétérogénéités détectées au paragraphe précédent (Figure 17) sont localisées précisément sur la Figure 19; les secteurs 1 et 2 ont des déplacements de 20m plus importants que ceux du secteur 3. Deux raisons pourraient expliquer ce différentiel. La première est liée à la présence d'un massif rocheux d'une meilleure qualité dans le secteur 3, constitué principalement de péridotite massive. La deuxième raison est en lien avec le mur Sud qui en se déplaçant viendrait buter contre le mur Est et diminuer les déplacements dans le secteur 3. En réalisant la même opération pour le secteur 5 (Figure 20), on montre visuellement la cinématique des déplacements dans ce secteur. Le peu de variations de couleurs s'interprète comme une répartition homogène des déplacements, c'est-à-dire que le haut du mur Sud glisse de manière homogène dans son ensemble.



Figure 18. Évolution des déplacements non-cumulatifs suivant la direction des vecteurs déplacements pour les secteurs 5 et 6.



Figure 19. Évolution des déplacements (m) du glissement suivant l'axe du vecteur déplacement du secteur 1 (a) entre le MNT du 29 juin 2012 et le MNT du 13 juillet 2012 et (b) entre le MNT du 29 juin 2012 et le MNT du 5 août 2013.



Figure 20. Évolution des déplacements (m) du glissement suivant l'axe du vecteur déplacement du secteur 5 (a) entre le MNT du 22 novembre 2010 et le MNT du 13 juillet 2012 et (b) entre le MNT du 22 novembre 2010 et le MNT du 5 août 2013.

5.4 Synthèse

En comparant l'orientation des vecteurs déplacements à celles des familles de joints, il apparait que l'orientation de la famille de joints 4 est proche de celle des plans de glissements des secteurs 1, 2 et 3. L'analyse structurale présentée à la section 3.2 démontre qu'une rupture planaire sur les discontinuités de la famille 4 ne peut pas expliquer à elle seule le glissement de ce mur. Il est cependant possible d'expliquer le glissement dans la partie supérieure de la pente, dans le massif de péridotite qui est de bonne qualité, par un glissement le long des discontinuités de cette famille (Figure 21). La partie inférieure du glissement s'effectuerait alors au travers du massif rocheux de serpentinite qui est de plus faible qualité et il prendrait une forme circulaire (Figure 21). Des travaux préliminaires de modélisation numérique ont également démontré la validité de cette hypothèse, Caudal et al. (2014). Cette explication concorderait également avec les vecteurs déplacements mesurés dans le secteur 4. Une rupture le long du contact géologique contribuerait également à expliquer le comportement observé.

Concernant le mur Sud, il est difficile d'être aussi affirmatif, car trois MNT ne permettent pas de quantifier avec autant de certitude l'orientation des vecteurs déplacements tout au long du suivi. Cependant, il est raisonnable d'affirmer qu'une forme de glissement similaire à celle du mur Est expliquerait le comportement de la pente. Les déplacements bien plus lents s'expliqueraient principalement par la présence de la butée, mise en place par la minière, au pied de la pente.

6 CONCLUSIONS

De nombreuses études ont montré l'efficacité du LiDAR en termes de compréhension des mécanismes de rupture de pente. Concernant l'étude du glissement actif de Thetford Mines, l'utilisation des LiDAR terrestre et aéroporté a permis de reproduire son évolution sur 2 ans. Cette étude divisée en 3 phases, propose d'abord une série de mesures pouvant être rapidement effectuée à partir des MNT donnant ainsi une idée générale de la problématique (géométrie et orientation des pentes, étendue globale du glissement, vitesse de remplissage de la fosse et évolution du glissement par le biais de la mesure des volumes négatifs). La deuxième phase montre qu'une analyse structurale préliminaire a pu être réalisée et faire ressortir l'existence de 5 familles de joints, dont 3 confirment les informations en provenance du bureau d'ingénierie de LAB Chrysotile, mais également la présence d'une autre famille qui serait critique pour la stabilité d'ensemble de la pente. La troisième phase montre l'intérêt d'utiliser les MNT pour quantifier le mouvement. En déterminant des vecteurs déplacements, les mouvements sont quantifiés et la cinématique définie. Finalement, en combinant ces 3 phases d'analyse, la mécanique du glissement s'explique par la combinaison d'une rupture planaire et circulaire.



Figure 21. Cinématique du glissement mur Est après rupture.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le MTQ et le CRSNG pour leur aide financière. Les auteurs souhaitent également remercier le MTQ et LAB Chrysotile pour leur soutien logistique, ainsi que Catherine Cloutier pour son aide sur Coltop et Polyworks.

REFERENCES

- Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., and Blanchard, J. 2010. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. Geomorphology 119 (3–4):162-171.
- Amoushahi, S., Grenon, M., Locat, J., and Turmel, D. 2014. Assessment of the influence of an inactive open pit mine on the design of a Highway. Proceedings of GEOHAZARDS 6, June 15–18, Kingston, Canada
- Antonello, G., Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Nico, G., Sieber, A. J., and Tarchi, D. 2004. Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements. *Landslides* 1 (1):21-28.
- Beauchamp, Y. 1994. Thetford Mines Operations : presentation of the slope stability program on Nov. 10th 1994, 21. McGill University.
- Bonnaffe, F., Jennette, D., and Andrews, J. 2007. A method for acquiring and processing ground-based lidar data in difficult-to-access outcrops for use in three-dimensional, virtual-reality models. Geosphere 3 (6):501-510.
- Caudal, P. 2012. Analyse d'un glissement actif par suivi LiDAR et modélisation de la rupture : mine LAB Chrysotile à Thetford Mines (Québec). Cnam Paris, France.
- Caudal, P., Grenon, M., and Fabre, D. 2014. Suivi LiDAR et analyse de la stabilité d'un glissement de versant à la mine LAB Chrysotile, Black Lake, Québec, Canada. Proceedings of RSS 2014, April 2–4, Marrakesch, Morocco.
- Dorval, P. 2011. Fermeture de la 112 temporaire. Chronologie des événements et état de la situation, 31. Province de Québec, Canada: Ministère des Transport du Québec.

- Eberhardt, E., Stead, D., and Coggan, J. S. 2004. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41 (1):69-87
- Eberhardt, E., Bonzanigo, L., and Loew, S. 2007. Longterm investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part II. Mitigation measures and numerical modelling of deep drainage at Campo Vallemaggia. *Canadian Geotechnical Journal* 44:1181-1199.
- Ferrero, A. M., G. Forlani, R. Roncella, and H. I. Voyat. 2009. Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. Rock Mechanics and Rock Engineering 42 (4):631-665.
- Froese, C. R., Moreno, F., Jaboyedoff, M., and Cruden, D. M. 2009. 25 years of movement monitoring on South Peak, Turtle Mountain: understanding the hazard. Canadian Geotechnical Journal 46 (3):256-269.
- Gordon, P., and Charles, T. 2008. Terrestrial Laser Scanners. In *Topographic Laser Ranging and Scanning*, 87-126: CRC Press.
- InnovMetric Software Inc., 2012. Polyworks v. 12.0.17, build 5761, 64 bit.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. Natural Hazards 61 (1):5-28.
- Kasperski, J., Delacourt, C., Allemand, P., Potherat, P., Jaud, M., and Varrel, E. 2010. Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France). Remote Sensing 2 (12):2785-2802.
- Kemeny, J., Norton, B., and Turner, K. 2006. LIDAR for Rock Mass Characterization: Hardware, Software, Accuracy and Best-Practices. In American Rock Mechanics Association, ed. F. T. a. J. Kottenstette, 14. Golden, Colorado.
- Lato, M. J., and Vöge, M. 2012. Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 54 (0):150-158.
- Lato, M., Diederichs M. S., Hutchinson, D. J., and Harrap, R. 2012. Evaluating roadside rockmasses for rockfall hazards using LiDAR data: Optimizing data collection and processing protocols. *Natural Hazards* 60 (3):831-864.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Derron, M.-H., and Blikra, L. H. 2011. Detailed DEM analysis of a rockslide scar to characterize the basal sliding surface of active rockslides. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 116 (F2):F02016.
- Optech, 2011. ILRIS-3D-ER, Summary Specification Sheet. Ontario, Canada. Disponible sur : www.optech.ca/i3dtechoverview-ilris.htm.
- Prokop, A., and Panholzer, H. 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9 (6):1921-1928.

- Rabatel, A., Deline, P., Jaillet, S., and Ravanel, L. 2008. Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area. Geophysical Research Letters 35 (10):L10502.
- Read, J., and Stacey., P. 2009. *Guidelines for Open Pit Slope Design*: CSIRO Publishing.
- Rocscience Inc. 2013. Dips v 6.013.
- Squarzoni, C., Delacourt, C., and Allemand, P. 2003. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology* 68 (1–2):53-66.
- Stacey, P. 1978. Interim report to Lake Asbestos of Quebec LTD. on stability review of the B pit east wall, ed. G. Associates, 49: Golder Associates.
- Sturzenegger, M., and Stead, D. 2009. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engineering Geology 106 (3-4):163-182.
- Sturzenegger, M., and Stead, D. 2009. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9 (2):267-287.
- Terr@num, 2013. Coltop v1.8.4
- Teza, G., Atzeni, C., Balzani, M., Galgaro, A., Galvani, G., Genevois, R., Luzi, G., Mecatti, D., Noferini, L., Pieraccini, M., Silvano, S., Uccelli, F., and Zaltron, N. 2008. Ground-based monitoring of high-risk landslides through joint use of laser scanner and interferometric radar. International Journal of Remote Sensing 29 (16):4735-4756.
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., and Genevois, R. 2007. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. International Journal of Remote Sensing 28 (16):3425-3446.
- Wehr, A., and Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning -An introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 (2-3):68-82.
- Wyllie, D. C., and Mah, C. W. 2004. *Rock slope engineering : civil and mining*. 4th ed. London: Taylor & Francis.