

L'aléa chutes de pierres : la modélisation préliminaire 3D des trajectoires le long d'une infrastructure linéaire



*Challenges from North to South
Des défis du Nord au Sud*

François Noël, Catherine Cloutier, Dominique Turmel et Jacques Locat
Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN), Département de géologie et de génie géologique – Université Laval, Québec, Québec, Canada

ABSTRACT

Finely characterizing large terrain area is often a challenging task because time and resources are frequently limited. In the context of developing rockfall hazard tools, we propose a method that helps planning field works along linear infrastructures based on rockfall simulations carried out systematically and efficiently on every rock slopes located nearby the infrastructure. Indeed, the results are of great help to identify where field work must be carried. The proposed method uses the software RockyFor3D and only requires surface elevation obtained from aerial Lidar as input data. The study area starts near Port-Cartier (Québec) and extends 260 km north along the ArcelorMittal Infrastructures Canada railway and stops after the Groulx Mountains. In this paper, we propose a partially automatized method that helps to choose on which sectors to focus field work by telling if there is a possibility for a block to reach the linear infrastructure.

RÉSUMÉ

La caractérisation détaillée de vastes territoires pose un défi de taille et est souvent limitée par les ressources disponibles et le temps. Dans le cadre du développement d'outils reliés à l'aléa chutes de pierres, nous proposons une méthodologie qui aide la planification des travaux de terrain le long d'une infrastructure linéaire. Le secteur couvert débute à une dizaine de kilomètres de Port-Cartier (Québec) et s'étend sur 260 km jusqu'au nord des monts Groulx, le long du chemin de fer de la compagnie ArcelorMittal Infrastructures Canada. La trajectographie 3D aide à cibler les secteurs où des investigations plus détaillées sont nécessaires. Le logiciel RockyFor3D est utilisé pour les simulations. La topographie provient de données LiDAR aéroportés. Dans cet article, nous présentons une méthode partiellement automatisée qui permet d'éliminer les secteurs qui ne sont pas susceptibles de générer des chutes de pierres ayant le potentiel d'atteindre l'infrastructure.

1 INTRODUCTION

L'identification de l'aléa chute de pierres pour la classification des parois rocheuses bordant des ouvrages linéaires est une tâche d'envergure puisqu'un grand territoire doit être couvert. Les systèmes de classification des massifs rocheux et chutes de pierres, tel le Rockfall Hazard Rating System (RHRS, Pierson, 2012) permettent de faire une caractérisation rapide, mais ces méthodes sont critiquées à cause du niveau de détail limité de l'analyse effectuée (Pantelidis 2009 et 2010). Il importe donc de trouver un équilibre entre le niveau de détail, le temps et les ressources allouées à la tâche. L'un des objectifs du projet ParaChute est de développer une méthodologie qui optimise ces critères (Cloutier et al. cette conférence). Ce dernier se veut une continuité du développement méthodologique entrepris lors du projet Charlevoix qui couvrait le chemin de fer du groupe Le Massif. Une cartographie basée sur la morphologie en relief ombragé des données LiDAR avait été entreprise afin de mieux comprendre le territoire (Locat et al. 2013). Elle a été suivie d'analyses trajectographiques (Noël et al. 2013) et structurales.

Les modélisations trajectographiques détaillées sont habituellement réalisées bien après l'identification d'un massif rocheux potentiellement problématique à cause de

leur complexité. Avec la puissance de calcul croissante des ordinateurs et la disponibilité de levés LiDAR aéroportés et terrestres, les modélisations peuvent être introduites beaucoup plus tôt dans l'identification des parois rocheuses préoccupantes.

Le niveau de connaissance du terrain étant initialement faible lors de l'analyse de l'aléa, des paramètres conservateurs doivent être utilisés dans les modélisations préliminaires. Celles-ci ne remplacent donc pas celles détaillées qui sont réalisées plus tard au niveau des falaises préoccupantes. Elles permettent cependant de mieux cibler où l'attention doit être portée dans le but d'optimiser le temps accordé lors de la caractérisation terrain. Ce type d'approche a d'ailleurs été utilisé lors du projet MASSMOVE (Melzner et al. 2012).

Le présent article décrit l'approche retenue pour le projet ParaChute, qui permet de faire l'identification préliminaire des parois éloignées d'intérêt. Elle se base sur la trajectographie afin d'estimer le potentiel d'atteinte de l'ouvrage. La présence ou l'absence de blocs instables n'est pas considérée. En fait, dans une analyse complète, les étapes abordées précèderaient celles permettant d'évaluer le niveau d'instabilité. La méthode innove par l'automatisation des étapes aboutissant à l'analyse trajectographique 3D.

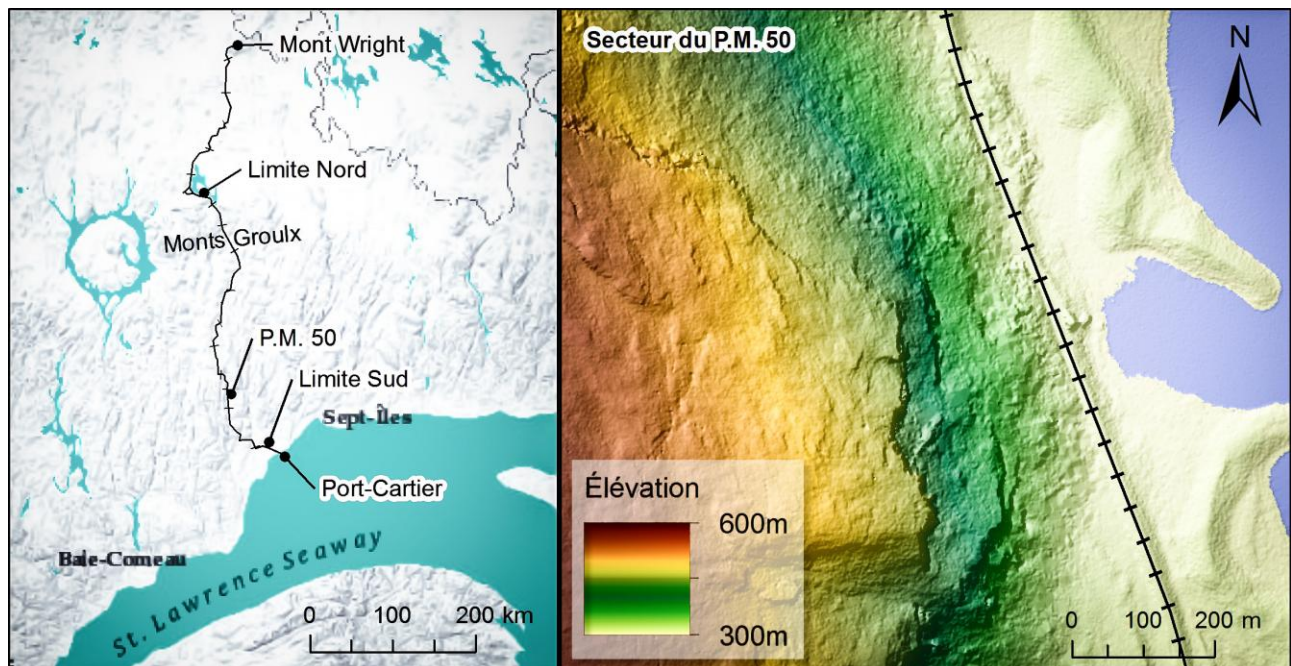


Figure 1. Cartes de localisation. À gauche, tracé du chemin de fer montrant le secteur couvert par le projet ParaChute (limites Sud et Nord). Le secteur du point miliaire 50 (P.M. 50) est localisé sur la carte. À droite, portion agrandie du secteur du P.M. 50.

1.1 Caractéristiques du terrain d'étude

Le chemin de fer de la compagnie ArcelorMittal Infrastructures Canada relie Port-Cartier à Mont Wright, au Québec. L'étude couvre 260 km de voie, débute au nord de Port-Cartier et s'étend jusqu'au nord des monts Groulx (figure 1). Les terrains traversés sont particulièrement sablonneux, graveleux et rocheux, avec de nombreux eskers, dépôts fluviaux, fluviaux glaciaires et morainiques.

Un massif rocheux avec un dénivelé variant entre 200 et 300 m est utilisé comme exemple pour représenter l'analyse réalisée sur les 260 km de voie. Quelques falaises sont situées en hauteur avec à leur pied d'imposants talus d'éboulis. Une centaine de mètres à plus de 400 mètres séparent la voie des parois sur environ 1 km (figure 1).

Étant donné qu'il est de plus en plus courant pour les projets couvrants de grandes superficies de réaliser des levés LiDAR aéroportés, la méthode présentée ici se base sur ce type de données. Elle pourrait alors facilement être appliquée à d'autres projets similaires.

2 MÉTHODOLOGIE

Avec la trajectographie 2D, plusieurs profils de pentes doivent être analysés pour bien représenter les formes de terrain d'un site. De plus, toute déviation latérale des projectiles ne peut être prise en compte. L'avènement de la 3D fait en sorte que des millions de trajectoires, avec chacune leur propre profil, peuvent être générées en une seule analyse. Cela permet de tenir compte de toutes les possibilités, n'étant limité que par la précision du terrain,

Portion automatisée

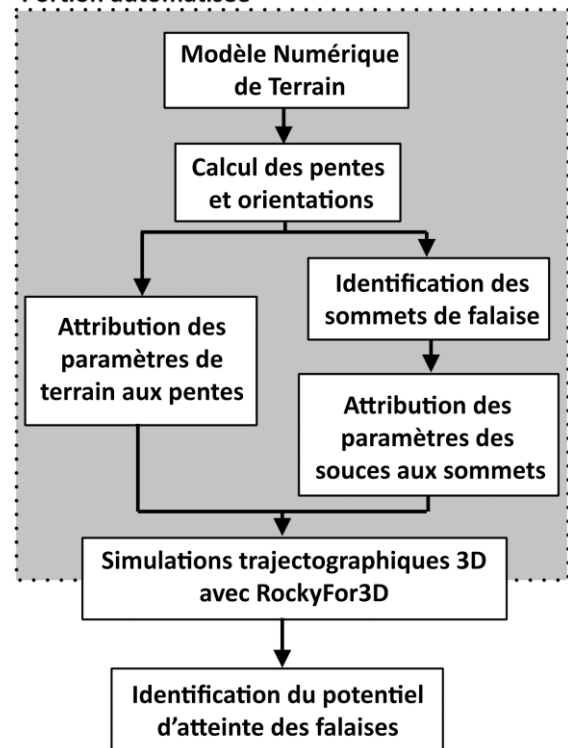


Figure 2. Organigramme simplifié présentant les étapes, principalement automatisées, de la méthode développée afin de faire l'identification préliminaire des parois potentiellement problématiques.

du modèle de calcul et le choix des paramètres d'entrées.

Dans le développement méthodologique, des efforts importants ont été consacrés afin d'automatiser le processus. Tel que présenté sur l'organigramme de la figure 2, les étapes automatisées peuvent être résumées à : l'importation du MNT, le calcul des pentes et de leurs orientations, l'identification des sommets de falaise, l'attribution des sources aux sommets de falaise, l'attribution des paramètres de terrain aux pentes et la gestion des simulations avec le logiciel RockyFor3D.

À partir des résultats des simulations, l'identification du potentiel que des trajectoires atteignent l'ouvrage peut être faite automatiquement. Cependant, la méthodologie ne permet pas de lier automatiquement ce potentiel aux falaises respectives. Cette étape doit donc être réalisée manuellement.

Dans les prochaines sous-sections, le choix du logiciel de trajectographie est justifié, les caractéristiques du MNT sont ensuite présentées. Les différentes étapes de la méthodologie sont alors abordées en détail en portant une attention particulière au choix des paramètres de terrain et des sources. La manière dont ils sont attribués automatiquement aux terrains est aussi détaillée. Enfin, il faut tenir compte qu'à ce stade initial de l'étude, les caractéristiques de terrains, la présence ou l'absence de blocs instables et la géologie structurale ne sont pas connues.

2.1 Logiciel de trajectographie

Les logiciels de trajectographie 3D permettent de tenir compte de la forme du terrain. Trois logiciels de ce type, CRSP-3D (Central Federal Lands Highway Division 2012), Rockfall Analyst (Lan et al. 2007, 2010) et RockyFor3D (RF3D) (Dorren et al. 2015), ont été testés. Ils ont été comparés à Rocfall (Rocscience, 2014) afin de vérifier leurs résultats. Le logiciel Rocfall Analyst est particulièrement intéressant lorsqu'il est question de cibler les parois potentiellement problématiques (Noël et al. 2013), puisqu'il permet de visualiser et manipuler individuellement les trajectoires en 3D.

Le logiciel RF3D a été retenu pour la modélisation préliminaire des trajectoires, notamment pour sa capacité de calcul permettant de couvrir de larges territoires rapidement et pour son potentiel d'automatisation et d'intégration à d'autres outils. De plus, sa capacité à tenir compte de la végétation pourrait s'avérer utile pour les simulations détaillées futures. Enfin, son modèle de calcul, partiellement stochastique, a été testé dans de nombreuses situations (Berger et al. 2011, Bourrier et al. 2007, 2009, Melzner et al. 2012, Ondercin et al. 2014). Les résultats obtenus lors de la comparaison sont similaires à ceux obtenus avec Rocfall lorsque les modèles tenant compte de la rotation des blocs et pondérant les coefficients de restitution en fonction de la vitesse d'impact sont utilisés. En utilisant les mêmes coefficients de restitution, les distances de parcours sont légèrement supérieures dans RF3D.

RF3D nécessite cependant de nombreuses couches matricielles d'information (*raster*) pour définir les paramètres en chaque point nécessaires aux simulations (Dorren et al. 2015). Un minimum de 10 couches doit être

préparé pour lancer les simulations : *dem*, *rocdensity*, *d1*, *d2*, *d3*, *blshape*, *rg70*, *rg20*, *rg10* et *soiltype*. La première est la couche de base des simulations : le MNT. Les 5 suivantes correspondent aux caractéristiques des blocs sources, c'est-à-dire leur masse volumique, dimensions et forme. Les 4 dernières correspondent aux caractéristiques des terrains sur lesquels ont potentiellement lieu les impacts. Elles comprennent la rugosité de surface rencontrée 70 %, 20 % et 10 % du temps et le type de sol.

2.2 Caractéristiques du MNT

Le MNT est généré à partir de levés LiDAR aéroportés réalisés à l'automne 2014 pour le projet. La densité de points au sol est d'environ 3 points par mètre carré. La taille des pixels du MNT est d'un mètre carré. Pour s'accommoder au logiciel RF3D, le territoire a été découpé en 98 tuiles de 4 km² (2000 X 2000 pixels) avec une bande d'environ 200 m de superposition entre chaque tuile afin d'éviter que les résultats soient influencés par les limites des *rasters*.

2.3 Outil d'automatisation

Générer manuellement les 10 couches nécessaires à RF3D pour chacune des 98 tuiles nécessite une quantité non négligeable de travail et de temps. De plus, la variabilité du travail manuel introduit de l'imprécision quant à la limite entre les types de terrain, leur complexité et la position des sommets de falaise. Cela justifie la nécessité d'automatiser la création des différentes couches. Ainsi, la modélisation préliminaire des trajectoires constitue une approche qui optimise la planification des travaux subséquents plutôt que de l'alourdir.

Pour se faire, plusieurs scripts ont été développés en langage Matlab et sont regroupés dans une interface graphique qui facilite leur utilisation. L'ensemble est conçu pour le travail en série (*batch processing*). Dans l'interface, il suffit d'indiquer le dossier contenant l'ensemble des MNT des secteurs à traiter. Ils sont ensuite automatiquement traités pour générer les couches nécessaires à RF3D. L'outil va même jusqu'à opérer RF3D automatiquement afin de générer les simulations selon les paramètres spécifiés.

L'outil peut aussi générer en série la carte des pentes (*slope*), la carte des orientations (*aspect*) et le relief ombragé (*hillshade*) selon la méthode de Burrough et McDonnel (1998).

Les sommets et pieds de falaise peuvent aussi être identifiés. Un sommet est identifié en un pixel si la pente y est supérieure à un certain seuil alors que le pixel au-dessus a une valeur inférieure.

Lorsque la géologie structurale est connue, il est possible d'effectuer les tests cinétiques simples pour les ruptures planaires, en dièdre et par basculement, basés sur les méthodes présentées par Keaton (2007) et Turner et al. (1996, 2012).

En plus du format matriciel, les résultats de l'ensemble des scripts peuvent être exportés sous forme de nuages de points pour une visualisation 3D facilitée. Il est aussi

possible d'utiliser des nuages de points comme MNT d'entrées pour l'outil. Un script de plus est alors accessible permettant l'identification des faces en surplomb. Les autres scripts restent fonctionnels à l'exception de celui d'identification des sommets et pieds des falaises. Il n'est cependant pas possible d'utiliser les nuages de points 3D avec RF3D.

Les informations générées par les scripts peuvent être utilisées à même l'outil comme critères pour spécifier les paramètres à attribuer aux couches de RF3D. Il est aussi possible d'ajouter des informations externes qui peuvent contribuer aux critères, par exemple une identification manuelle de dépôts de surface, la géologie, etc. Un critère pour l'attribution des sources pourrait alors être formulé de la sorte : définir une source si les pentes sont supérieures à 40°, qu'il y a possibilité de rupture planaire selon le test cinétique et que la géologie correspond à du gneiss. Concernant les paramètres de terrain, un critère pourrait par exemple avoir la forme suivante : attribuer les caractéristiques d'un terrain rocheux en un point si les pentes y sont supérieures à 70° même si les dépôts de surface indiquent un sol argileux; si toutefois les pentes sont inférieures à 70°, alors attribuer les caractéristiques correspondant au sol argileux des dépôts de surface.

L'outil d'automatisation est donc très utile pour créer les couches nécessaires à RF3D et opérer ce dernier automatiquement afin d'obtenir rapidement les résultats des simulations sur un grand territoire ou pour un grand nombre de scénarios. Il est cependant nécessaire de bien choisir les critères pour l'attribution des paramètres de terrain et l'identification des sources potentielles.

2.4 Choix des paramètres de terrain

Peu d'information concernant les types de terrains rencontrés sur le territoire à l'étude n'est initialement disponible. Les critères pour attribuer les paramètres de terrain ne se basent donc que sur les seuils de pentes. Cela a l'avantage d'être rapide puisqu'aucune autre donnée à part les MNT n'est nécessaire.

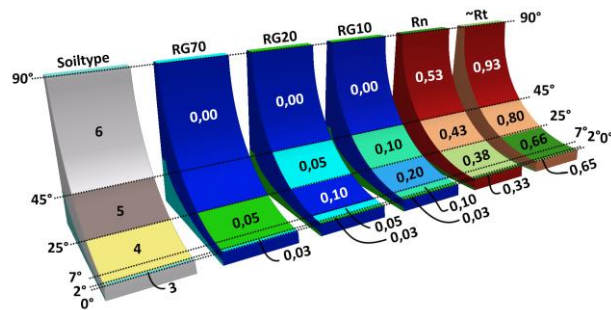


Figure 3. Classes de pente, paramètres de terrain pour RockyFor3D associés et coefficients de restitution correspondants. Les valeurs indiquées ont été attribuées directement par l'outil d'automatisation, en utilisant les formes de trempins comme MNT et les seuils de pentes comme critères.

Les seuils de 2°, 7°, 25° et 45° ont été utilisés, formant 5 classes de pente (figure 3). Les coefficients de restitution

les plus élevés sont attribués aux terrains abrupts, puisqu'il y a de fortes chances qu'ils soient composés de roc. Aucune rugosité n'est attribuée pour obtenir les coefficients de restitution maximaux comme dans l'étude d'Ondercin et al. (2014). Des rugosités ont cependant été utilisées pour les terrains moins abrupts. Les coefficients baissent donc à mesure que la pente diminue à cause du type de sol défini (*soiltype*) et de l'ajout de rugosités (*rg70*, *rg20* et *rg10*). Ces valeurs correspondent à celles des terrains denses et rocaillieux, puis plus terreux qui sont recommandés avec RF3D (Dorren, 2015). Les coefficients obtenus sont similaires à ceux utilisés par Berger et al. (2011), Bourrier et al. (2009) et Frattini et al. (2008). Ils sont plus conservateurs par rapport à ceux utilisés par Lambert et al. (2013), ce qui est normal puisque les caractéristiques de terrain ne sont pas encore connues en détail.

2.5 Identification des sources potentielles

L'étude trajectographique a pour but d'éliminer les parois qui n'ont aucun potentiel d'atteinte. Ainsi, toutes les sources potentielles doivent être considérées, qu'elles soient stables ou instables, étant donné que cette information n'est pas connue a priori. Les travaux de terrain subséquents et d'analyses structurales aideront à évaluer le potentiel d'instabilité des zones sources qui ont le potentiel d'atteindre l'ouvrage. L'ensemble des falaises a donc été considéré comme étant une source potentielle de chutes de pierres.

Les sources peuvent être déterminées de deux façons : (1) en considérant tous pixels avec une pente supérieure à une certaine valeur comme une falaise rocheuse ou (2) en utilisant les sommets des falaises uniquement. Avec la première option, la falaise est représentée par une surface, alors qu'avec la deuxième, elle est représentée par une ligne suivant les sommets. Ainsi, pour une même falaise, un plus grand nombre de pixels seront identifiés comme sources de chutes de pierres pour l'option 1 que pour l'option 2. Toutefois, dans un *raster*, une paroi subverticale couvre moins de surface qu'une qui est moins abrupte, mais de même hauteur. Cela engendre un biais dans les cartes de trajectographies puisqu'un plus grand nombre de trajectoires est simulé pour les falaises moins abruptes. Identifier le sommet des parois comme sources permet de limiter ce biais. En effet, pour des falaises similaires, mais d'inclinaison différente, un même nombre de sources leur sera attribué. Les pentes abruptes se trouvent donc représentées également avec les autres.

Trois types de sommets de falaise ont été utilisés, avec des seuils de 40°, 60° et 80°. Comme les pentes pour chaque pixel sont calculées en utilisant l'élévation des pixels voisins, un certain lissage est engendré. Les sommets de falaises avec les seuils de 60° et 80° ciblent donc les falaises ayant au moins quelques mètres de hauteur.

Des blocs fictifs de 40 ± 12 kg ont été attribués aux sommets. Aucune vitesse initiale ou hauteur additionnelle n'a été ajoutée.

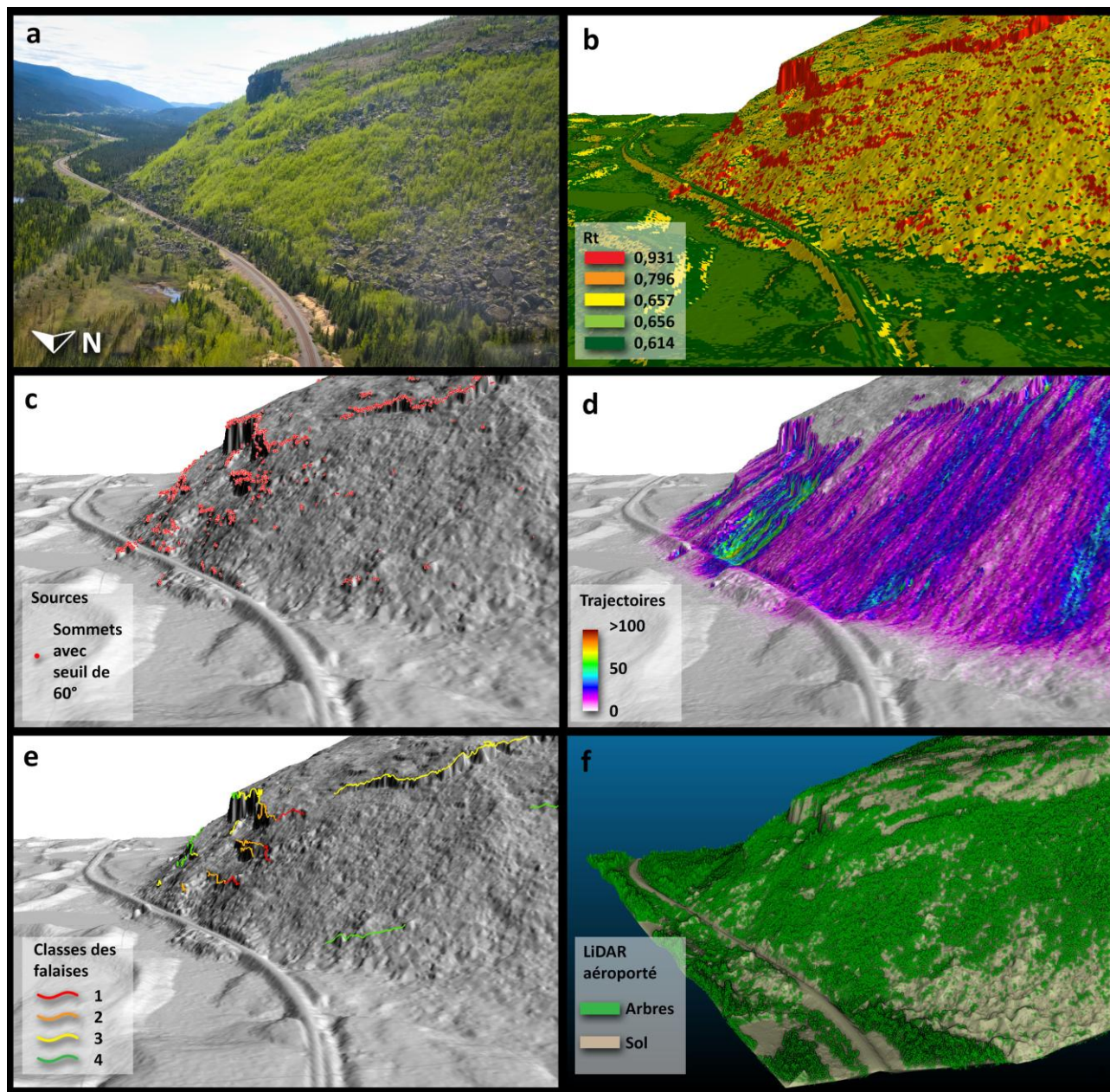


Figure 4. Différents résultats et données pour le secteur du point miliare 50. En a, photographie prise en hélicoptère du site. En b, estimation des coefficients tangentiels qui découlent des différentes rugosités attribuées aux classes de pentes. En c, les sommets de falaises attribués avec un seuil de 60° sont tracés en rouge. En d, les trajectoires simulées avec RockyFor3D à partir des sources fictives sont colorées selon leur densité en chaque pixel. Le potentiel de rupture n'étant pas évalué, les trajectoires partent de toutes les falaises, même s'il n'y a pas nécessairement de blocs instables. En e, les sommets montrant des trajectoires simulées qui peuvent atteindre l'ouvrage sont identifiés. En f, les données LiDAR brutes sont visualisées en 3D dans le logiciel libre CloudCompare.

Ils partent donc avec les vitesses imposées par RF3D de 0,5 m/s à l'horizontale et de -0,5 m/s à la verticale. 10 blocs sont simulés en chaque mètre (à plat) de sommet de falaises.

2.6 Validation de l'automatisation par analyse des photos et LiDAR aéroportés

Afin de valider les scripts d'automatisation, les résultats de chaque algorithme de calcul ont été comparés à ceux obtenus avec différents logiciels. Le relief ombragé, les pentes et leurs orientations ont été comparés à ceux calculés à l'aide des logiciels QGIS et ArcGIS. Les sommets et pieds de falaises ont été validés en les visualisant dans ArcGIS et en s'assurant qu'ils soient au niveau du seuil de pente sélectionné.

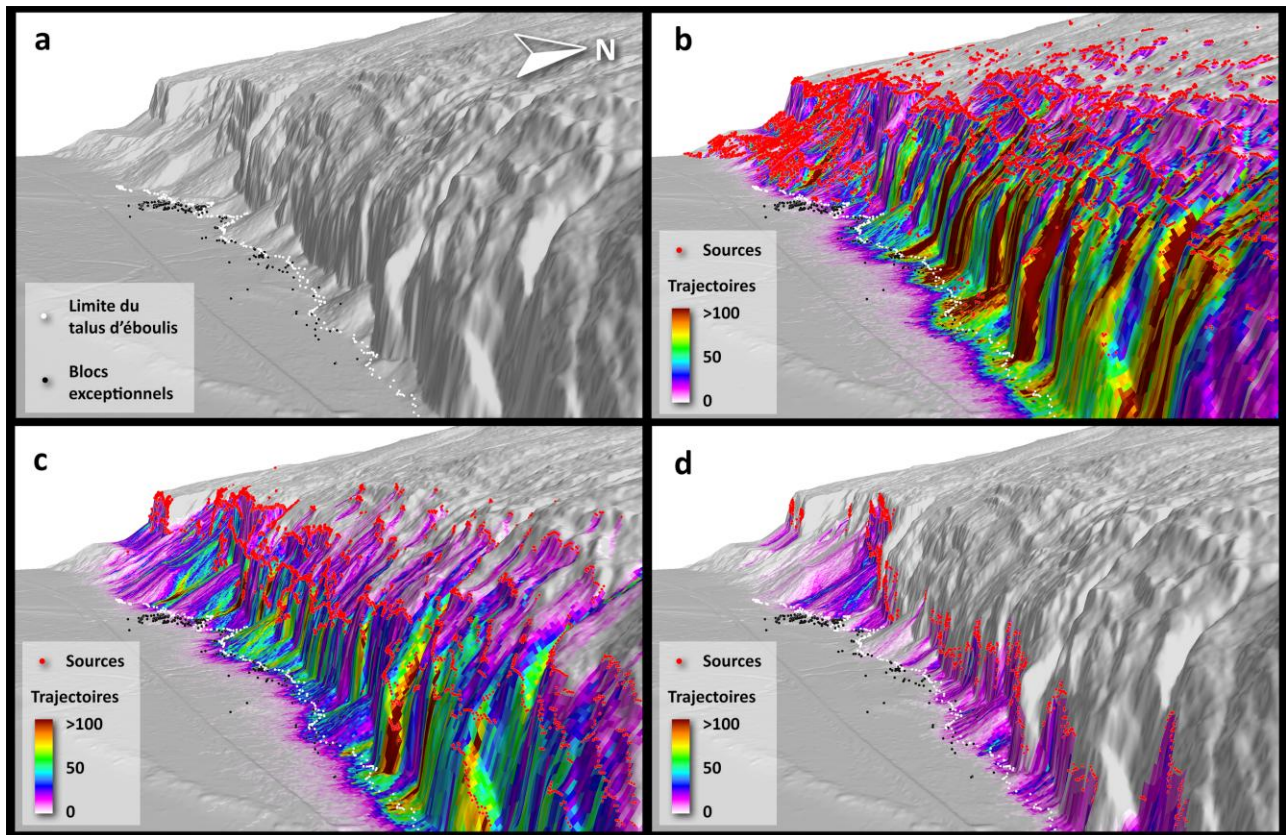


Figure 5. Différents résultats pour le site du Cap-Tourmente. En a, la limite du talus d'éboulis est indiquée par le tracé GPS représenté par des points blancs. La position des blocs exceptionnels a été notée au GPS et est indiquée avec les points noirs. En b, c et d, les sources attribuées aux sommets identifiés avec des seuils respectifs de 40, 60 et 80° sont indiquées en rouge. Les trajectoires simulées avec RockyFor3D à partir des sources fictives sont colorées selon leur densité en chaque pixel.

Ils ont aussi été visualisés en 3D à l'aide du logiciel CloudCompare, dont le rendu 3D est réaliste grâce aux filtres OpenGL intégrés (Girardeau-Montaut, 2006). La correspondance des différentes couches d'informations créées pour RF3D avec les seuils et paramètres sélectionnés a été vérifiée de la même manière. La conversion des résultats en nuages de points 3D a été validée en transformant le nuage de point vers un format matriciel dans le logiciel ArcGIS et en vérifiant que ce dernier soit identique au *raster* d'origine.

L'attribution des paramètres de terrain, l'identification des sommets de falaise et l'attribution des paramètres pour les sources ont ensuite été comparées avec des secteurs visités pendant le projet de Charlevoix. Les résultats ont aussi été comparés à l'analyse géomorphologique réalisée sur le territoire d'étude. Les seuils de pentes présentés ont été choisis afin d'obtenir un découpage se rapprochant des changements d'unités géomorphologiques (dépôts fluviaux, talus d'éboulis, escarpement rocheux, etc.).

Concernant la précision des trajectoires simulées avec RF3D, des simulations simples ont été réalisées à l'aide de différents logiciels et comparées aux résultats 2D obtenus avec Rocfall. Les simulations avec RF3D se rapprochent de celles de Rocfall, tout en étant un peu plus conservatrices.

Les simulations ont été calibrées pour le site du Cap-Tourmente qui a été visité à l'été 2013. Il n'était pas possible d'utiliser les vitesses pour se calibrer contrairement à Valagussa et al. (2015), la position d'arrêt des blocs notée sur le terrain a donc été utilisée. Ainsi selon ces auteurs, la calibration pourrait être relativement imprécise. L'analyse des simulations montre que la majorité des blocs s'arrêtent au-delà des talus d'éboulis et que les trajectoires exceptionnelles couvrent les distances des blocs observés sur le terrain, en plus d'une certaine marge de sécurité pour rester conservateur.

Finalement, les angles de la ligne d'énergie de quelques talus d'éboulis dont la morphologie caractéristique est reconnaissable sur le relief ombragé du secteur d'étude ont été comparés à ceux des simulations.

2.7 Classification manuelle des zones sources par rapport au potentiel d'atteinte

Le but principal de la méthode étant d'éliminer les parois qui ne sont pas problématiques, seules celles montrant des trajectoires qui s'y rendent ont été manuellement tracées au niveau des sommets identifiés. Cette tâche pourtant simple a dû être faite manuellement dans ArcGIS car les résultats des simulations ne permettent pas une

sélection des trajectoires individuelles, comme il est possible avec Rockfall Analyst par exemple. Il a donc fallu identifier visuellement les secteurs où des trajectoires croisent l'ouvrage et tenter de trouver les sources correspondantes. Dans le doute, l'ensemble des sources correspondantes probables a été identifié.

Un second passage a ensuite été réalisé pour chaque sommet de falaise identifié pour tenter de les classer par ordre d'importance par rapport au potentiel qu'ont les blocs partant de ces falaises d'atteindre l'ouvrage. Évaluer ce potentiel est cependant problématique dès qu'il y a superposition de trajectoires puisqu'il devient difficile de suivre celles qui atteignent l'ouvrage. Il n'est donc pas possible d'évaluer précisément le ratio des trajectoires qui s'y rendent. À cause de cela, la densité des trajectoires au niveau de la voie est plutôt utilisée comme critère de classification. S'il y a seulement quelques trajectoires croisant la voie ferrée, la falaise associée est classée comme catégorie 4. S'il y a une faible densité de trajectoires, mais qu'elles sont réparties régulièrement, la paroi est classée comme catégorie 3. Une catégorie 2 est attribuée s'il y a une plus forte densité de trajectoires. Finalement, une catégorie 1 est attribuée s'il y a une forte atteinte (plus de 40-50 trajectoires par mètre de voie). Cette classification est donc fortement subjective puisqu'elle ne se base que sur une interprétation visuelle des résultats avec un choix de classes plutôt arbitraire. De plus, il y a un fort biais lorsque plus d'une falaise est présente pour un même secteur, puisque les trajectoires se superposent et augmentent directement la densité au niveau de l'ouvrage. Cependant, la comparaison entre les différents sites reste valable puisque la méthode est appliquée de façon homogène pour l'ensemble du territoire.

3 RÉSULTATS

Les résultats obtenus au secteur du P.M. 50 sont présentés en guise d'exemple puisqu'il ne serait pas pertinent de présenter l'ensemble des résultats pour le large secteur d'étude. À la figure 4a, on remarque quelques parois en hauteur avec un important talus d'éboulis composé de blocs de tailles impressionnantes (certains font plus de 5 m de côté). La voie ferrée semble reposer sur des dépôts fluviaux et fluviaux glaciaires et tronque légèrement le pied de talus en sa portion la plus proximale du massif rocheux. La végétation est principalement composée de conifères matures à l'exception du talus d'éboulis qui est plutôt recouvert de feuillus dispersés.

Les paramètres de terrain attribués automatiquement en fonction des classes de pentes imposées correspondent bien avec les types de sols identifiés sur les photos et par rapport à la morphologie visible en relief ombragé. La figure 4 b montre les coefficients de restitution tangentiels correspondant aux types de terrain et rugosités attribués. Les valeurs les plus faibles correspondent aux dépôts sablonneux. Celles intermédiaires correspondent aux pentes moyennes des principaux talus d'éboulis. Les valeurs les plus élevées correspondent aux parois escarpées et à quelques faces verticales des plus gros

blocs du talus d'éboulis. Le découpage automatique suit bien le pourtour des falaises.

Les sommets des falaises identifiés avec un seuil de 40° correspondent tel que prévu aux sommets de tous les petits escarpements (figure 5 b). Des talus sont parfois faussement identifiés comme sommets. Ils omettent aussi plusieurs démarcations dans les falaises étagées lorsque les paliers naturels sont trop abrupts pour tomber sous les 40°. Il se produit la même chose lorsqu'une falaise devient graduellement moins abrupte en son sommet. Dans ce cas, le sommet n'est pas nécessairement identifié au niveau de la rupture de pente maximale, mais plutôt au-dessus. Ces problèmes ne semblent pas présents pour les sommets identifiés avec un seuil de 60° (figures 4c et 5c). Dans ce cas, presque toutes les parois sont identifiées. Les différents sommets pour les falaises étagées sont aussi attribués. Les parois de seulement quelques mètres de hauteur sont ignorées. Enfin, les sommets identifiés avec un seuil de 80° ne ciblent que les parois très hautes et escarpées (figure 5d). Ils sont souvent placés quelques mètres sous le sommet réel de la falaise. Cela peut être dû au lissage engendré lors du calcul des pentes. Les simulations utilisant les sommets identifiés avec un seuil à 60° semblent donc les plus appropriées.

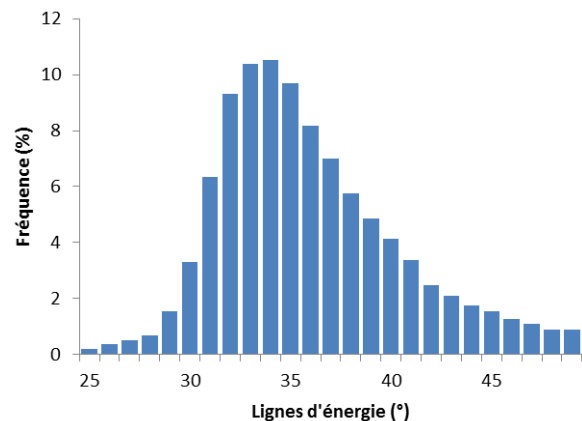


Figure 6. Distribution des lignes d'énergie pour les trajectoires simulées avec RockyFor3D au secteur du point kilométrique 50 à partir des sources identifiées avec un seuil de 60°.

Les angles des lignes d'énergie des trajectoires simulées correspondent avec ceux des talus d'éboulis du terrain. En effet, les trajectoires ont principalement des lignes d'énergie de 33-34° (figure 6), alors que les talus ont des valeurs de 34-35°. Quelques trajectoires exceptionnelles simulées ont des valeurs inférieures à 30°, ce qui donne une marge de sécurité.

Comme les sources sont plus nombreuses avec les seuils de 40°, la densité des trajectoires qui en découle est plus élevée que pour les autres simulations. Cette densité augmente au niveau des secteurs où la morphologie canalise les trajectoires. Elle est aussi importante lorsqu'il y a une plus forte densité de sources. Cela est visible à la figure 4d avec les trajectoires vertes au niveau où plusieurs sommets se superposent. De telles densités plus élevées permettent de noter de façon

préliminaire les secteurs où l'ouvrage a plus de potentiel d'être atteint par une chute de pierre. La superposition des trajectoires provenant de plusieurs parois engendre cependant des problèmes pour la classification individuelle du potentiel d'atteinte qu'on chaque falaise tel qu'il a été abordé dans la méthodologie en 2.7. Cela est visible à la figure 4e où les sommets correspondant à des trajectoires ayant le potentiel d'atteindre l'ouvrage sont identifiés. Ceux de classe 1 et 2 sont situés où un plus grand nombre de sommets de falaise a été identifié. La densité des trajectoires y est donc plus élevée, d'où les catégories 1 et 2. S'ils étaient analysés individuellement cependant, ils seraient peut-être classés au même niveau (3) que la falaise sommitale.

Les talus d'éboulis facilement reconnaissables sur le MNT ont été comparés aux simulations pour s'assurer que la propagation des blocs concorde avec les formes de terrain observées en plus d'une marge de sécurité (figure 5c).

Les données LiDAR aéroportées brutes ont été visualisées pour profiter du niveau de détail supérieur par rapport aux données rastérisées (figure 4f). La possibilité d'observer un site sous de nombreux angles est un atout et a permis d'identifier quelques anciennes chutes de pierres identifiées par le contraste de végétation laissé le long des trajectoires empruntées par les blocs. Les trajectoires simulées en ces secteurs dépassent les distances de parcours réelles ce qui confirme que les simulations sont conservatrices, au moins lorsque les trajectoires exceptionnelles sont considérées.

4 DISCUSSION

Comme toute chose, rien n'est parfait, et la méthode présentée n'en fait pas exception. Les sous-chapitres suivants présentent donc certaines recommandations concernant l'attribution des paramètres de terrain, l'identification des sources et la classification des parois.

4.1 Identification des paramètres de terrain

Le potentiel d'intégration de la végétation serait intéressant à évaluer. Les progrès concernant l'identification automatisée des arbres à partir de données LiDAR rendent la tâche plus simple. RF3D est conçu pour pouvoir en tenir compte. Le réalisme des simulations s'en trouverait amélioré. Il faudrait choisir judicieusement la taille des blocs pour ces simulations, puisque c'est un paramètre clé lorsqu'il y a de la végétation.

4.2 Identification des sources

Il a été noté que les seuils de 40°, 60° et 80° entraînent des résultats bien différents. Avec les seuils à 40°, les trajectoires provenant du sommet des nombreuses petites falaises peuvent ressortir avec une forte densité et diminuer l'importance accordée à celles provenant des grandes parois. On se retrouve donc avec un biais similaire à celui des surfaces 3D et l'utilisation d'un seuil à 40° n'est pas un choix conservateur, particulièrement lorsque la végétation est négligée.

L'idéal serait que le nombre de trajectoires soit proportionnel à la surface occupée par les parois. Dans RF3D, pouvoir choisir le nombre de blocs à simuler indépendamment pour chacune des sources permettrait de contourner ce problème. En attendant, l'utilisation des sommets identifiés avec un seuil de 60° semble la meilleure option.

4.3 Classification manuelle des zones sources par rapport au potentiel d'atteinte

L'identification des sources problématiques à partir des simulations est limitée lorsqu'il y a superposition de trajectoires provenant de sources différentes. Dans ce cas, il est difficile de dire si un secteur est à fort potentiel d'atteinte à cause d'un grand nombre de sources problématiques ou d'une seule zone source très problématique. Pour bien cibler les parois où il faudrait intervenir en priorité, il serait nécessaire de connaître le potentiel d'atteinte de chaque falaise, et non pas un cumulatif de l'ensemble des parois du secteur.

Au niveau de RF3D, il serait fort intéressant de comptabiliser en chaque source le ratio des trajectoires qui atteignent l'ouvrage par rapport à celles simulées en ce point. Il serait utile d'enregistrer, toujours à l'emplacement des sources, les valeurs d'énergie cinétique et hauteurs des blocs lorsqu'ils croisent l'ouvrage.

Inscrire ces informations au niveau des parois faciliterait leur identification objective dans le but de cibler correctement celles où les travaux supplémentaires doivent être priorisés. Avec ces améliorations, la classification des secteurs serait particulièrement rapide à effectuer tout en étant beaucoup plus précise.

5 CONCLUSION

La méthode présentée se montre particulièrement intéressante pour l'identification rapide des parois dont une éventuelle chute de pierre aurait le potentiel d'atteindre l'ouvrage. L'automatisation de la préparation des couches d'entrées couplée à la rapidité de calcul de RF3D permet d'obtenir des résultats efficacement. L'interprétation est facilitée par l'intégration des résultats dans un système à référence géospatiale. De plus, la visualisation des données LiDAR aéroportées brutes en 3D peut faciliter la validation des simulations. Elle permet aussi d'évaluer l'activité des falaises mise en valeur par la végétation immature en pied de pente, la présence de blocs désolidarisés ou de larges fissures subverticales. L'utilisation de la trajectographie 3D préliminaire semble appropriée pour justifier les cibles où réaliser des travaux subséquents. De plus, elle permet de ne pas gaspiller de temps et de ressources sur des parois qui ne sont pas problématiques. Finalement, des visites de terrain pourront être réalisées aux endroits où plus d'information serait nécessaire afin de déterminer, avec un niveau de certitude raisonnable, s'il y a absence d'instabilité pour un site. L'effort accordé lors des visites pourra être ajusté en fonction de l'importance attribuée à ceux-ci.

Remerciements

Cette étude n'aurait été possible sans la participation financière d'ArcelorMittal Infrastructures Canada et du Ministère des Transport du Québec (MTQ). Les auteurs aimeraient remercier Pierre Therrien pour son aide lors du développement des scripts d'analyse cinétique.

RÉFÉRENCES

- Berger, F. (Cemagref), Martin, R. (RTM), Auber, B. (RTM), & Mathy, A. (ADRGT-S). 2011. Etude comparative, en utilisant l'événement du 28 décembre 2008 à Saint Paul de Varces, du zonage de l'aléa chute de pierre avec différents outils de simulation trajectographique et différentes matrices d'aléa. (p. 226). Grenoble.
- Bourrier, F., Lambert, S., Nicot, F., & Drave, F. 2007. Etude expérimentale de l'impact d'un bloc rocheux sur un terrain naturel (p. 30). Grenoble.
- Bourrier, F. (Cemagref), Dorren, L. (Federal O. for the E)., Nicot, F. (Cemagref), Berger, F. (Cemagref), & Darve, Félix (L3S-R, INPG, UJF, C). 2009. Toward objective rockfall trajectory simulation using a stochastic impact model. *Geomorphology*, 110(3-4), 68–79. doi:10.1016/j.geomorph.2009.03.017.
- Burrough, P. A. et McDonnell, R. A. 1998. Principles of Geographical Information Systems. *Oxford University Press*, New York, 190 pp.
- Central Federal Lands Highway Division 2012. *CRSP-3D USER'S MANUAL, Colorado Rockfall Simulation Program*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-CFL/TD-12-007.
- Cloutier, C., Locat, J., Gionet, P., Jacob, C., Dorval, P., Noël, F., Mayers, M., Turmel, D., Bossé, F. 2015. An integrated management tool for rock fall evaluation along transportation corridors: description and objectives of the ParaChute research project. En préparation pour la *Conférence Canadienne de Géotechnique GéoQuébec 2015*.
- Dorren, L. K. A. 2015. Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper (www.ecorisq.org): 32p.
- Fontaine, A., Locat, J., Noël, F., Turmel, D. 2013. Le logiciel Flow-R comme outil d'analyse du danger coulées de débris le long de la façade maritime de Charlevoix, Comptes-rendus de la *Conférence Canadienne de Géotechnique GéoQuébec 2013*.
- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., et Agliardi, F. 2008. Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94(3-4), 419–437. doi:10.1016/j.geomorph.2006.10.037.
- Girardeau-Montaut, D. 2006. *Détection de Changement sur des Données Géométriques 3D*. Manuscrit de thèse, spécialité Traitement du Signal et Images, Telecom Paris.
- Keaton, J. R. 2007. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th Edition. *Environmental and Engineering Geoscience*. doi:10.2113/gsegeosci.13.4.369
- Lambert, S., Bourrier, F., & Toe, D. 2013. Improving three-dimensional rockfall trajectory simulation codes for assessing the efficiency of protective embankments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60(1365), 26–36. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.12.029.
- Lan, H., Martin, C. D., et Lim, C. H. 2007. RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers & Geosciences*, 33(2), 262–279. doi:10.1016/j.cageo.2006.05.013.
- Lan, H., Martin, C. D., Zhou, C., et Lim, C. H. 2010. Rockfall hazard analysis using LiDAR and spatial modeling. *Geomorphology*, 118(1-2), 213–223. doi:10.1016/j.geomorph.2010.01.002.
- Locat, J., Fontaine, A., Turmel, D., Noël, F., Lajeunesse, P., Joyal, G. 2013. Carte morphostructurale et mouvements de terrain le long de la façade maritime de Charlevoix : intégration des levés LiDAR, interférométriques et multifaisceaux, Comptes-rendus de la *Conférence Canadienne de Géotechnique GéoQuébec 2013*.
- Melzner, S., Dorren, L., Kociu, A., & Baek, R. 2012. Regional delineation of potential source areas and runout distances of rockfalls as a planning basis for detailed assessments. In *12th Congress Interpraevent 2012*. Grenoble.
- Ondercin, M., Kromer, R., et Hutchinson, D. J. 2014. A Comparison of Rockfall Models Calibrated Using Rockfall Trajectories inferred from LiDAR Change Detection and Inspection of Gigapixel Photographs. In *Geohazards 6* (p. 7). Kingston.
- Noël, F., Turmel, D., Locat, J. 2013. Application des outils RockyFor3D et Rockfall Analyst à l'analyse préliminaire de chutes de blocs dans Charlevoix, Comptes-rendus de la *Conférence Canadienne de Géotechnique GéoQuébec 2013*.
- Pantelidis, L. 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 315–325. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.06.003.
- Pantelidis, L. 2010. A critical review of highway slope instability risk assessment systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(3), 395–400. doi:10.1007/s10064-010-0328-5.
- Rocscience Inc. 2014. RocFall. (Version 5.010 64 — bit). Toronto, Ontario, Canada.
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press.
- Turner A. K., and Schuster R. L. 2012. *Rockfall: Characterization and Control*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 658 p.
- Valagussa, A., Crosta, G. B., Frattini, P., Zenoni, S., & Massey, C. (2015). Rockfall Runout Simulation Fine-Tuning in Christchurch, New Zealand. *Engineering Geology for Society and Territory — Volume 2*, 2, 1913–1917. doi:10.1007/978-3-319-09057-3.