

# Le logiciel Flow-R comme outil d'analyse du danger coulées de débris le long de la façade maritime de Charlevoix, Québec.

Fontaine, A., Locat, J., Noël, F., Turmel, D.  
*Université Laval, Québec, Québec, Canada*

## ABSTRACT

Charlevoix railway, located on the North Shore of Saint-Lawrence River between Cap Tourmente and La Malbaie, is affected by debris flow threat. This railway runs for about 144 km. The software Flow-R was used in order to detect source areas for debris flow, as well as to estimate the propagation zone of these debris flows. The source area is calculated using the slope, the planar curvature and the contributing area. All these data are derived from the aerial LiDAR dataset. Some field work was also done in order to affine the dataset, and prior to the numerical modeling. Even if some adjustments on the input parameters need to be completed, Flow-R is shown to be a powerful and useful tool for the planning and management of streams and rivers: The final product from Flow-R is a map showing the potential sources as well as the propagation area for potential debris flows.

## RÉSUMÉ

Le chemin de fer de Charlevoix est soumis au danger coulées de débris, comme en témoignent les événements historiques, d'ampleurs plus ou moins grandes. Le secteur d'étude est vaste et le logiciel Flow-R a été utilisé afin d'aider à la localisation des sources privilégiées pour les coulées de débris. Ce logiciel permet à la fois de déterminer les potentielles zones sources de coulées et d'évaluer la propagation de ces dernières. La pente, la courbure planaire, l'aire contributrice ainsi qu'un modèle de base du terrain ont été utilisés pour déterminer les zones sources, ces divers paramètres ont été dérivés du modèle numérique d'élévation obtenu via un levé LiDAR aéroporté. Une analyse du secteur d'étude sur SIG à l'aide de données LiDAR et des travaux de terrain ont ainsi précédé ce travail de modélisation. Des ajustements sont encore à effectuer, notamment concernant l'évaluation de la propagation, mais l'utilisation de Flow-R pourrait s'avérer un outil précieux pour l'aménagement du territoire et la gestion des ruisseaux et rivières puisqu'il en résulte une carte donnant un aperçu des coulées de débris potentielles sur l'ensemble de la façade maritime de Charlevoix.

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

En 2009, le Groupe Le Massif inc. a acheté le Chemin de Fer Charlevoix Inc. afin de développer le tourisme dans la région de Charlevoix. Ainsi, un train touristique circule entre Québec et La Malbaie. Ce type de développement, la vitesse des trains envisagée, à savoir 30 miles/h soit 48.3 km/h et les dangers naturels auxquels est soumis le chemin de fer, principalement entre Cap-Tourmente et la Malbaie, impliquent des dispositions supplémentaires pour assurer une exploitation sécuritaire des installations.

Après les chutes de blocs (Noël et al., 2013), les coulées de débris constituent l'un des dangers le long de la voie ferrée. De nombreux cas historiques viennent appuyer cette affirmation, tels que les coulées de débris de 2005 à Petite-Rivière-Saint-François engendrées par des pluies diluviennes, ou celles de la rivière Mailloux en 1961, près de la Malbaie, et du Petit-Ruisseau-Saint-Joseph en 1966, à Saint-Joseph-de-la-Rive, toutes deux causées par des ruptures de barrages.

### 1.2 Objectif

L'objectif principal de cette étude est de dresser un premier aperçu des secteurs soumis au danger coulées de débris, notamment afin de cibler les zones à inspecter prioritairement le long de la voie ferrée, en cas de pluies intenses par exemple. Les coulées de débris peuvent être divisées en deux types sur la façade maritime de Charlevoix : exceptionnelles, et fréquentes mais de plus petite ampleur. Cependant, l'utilisation du logiciel de modélisation Flow-R sera limitée à l'étude des coulées exceptionnelles.

### 1.3 Site à l'étude

La façade maritime de Charlevoix est marquée par d'importantes épaisseurs de dépôts meubles. Ces derniers datent généralement de la dernière glaciation (Wisconsin Tardif) ou sont postglaciaires. Dans la région, le retrait de l'inlandsis a débuté il y a environ 14000 ans (Dionne, 1977). Il s'en est suivi une phase très courte de transgression de la Mer de Goldthwaith, il y a 12000 ans. Des terrasses étagées jusqu'à une altitude de 200 m par rapport au niveau marin actuel témoignent de la limite maximale atteinte par la Mer de Goldthwaith (Quilliam et

Allard, 1989). Par la suite, la région est entrée dans une phase de régression marine, principalement due au rebond isostatique. Actuellement la région présente encore une sismicité importante due, entre autres, au rebond postglaciaire. Le plus gros séisme connu à l'heure actuelle dans la région aurait eu lieu en 1663. La valeur minimale de sa magnitude serait  $7.2 \pm 0.2$  et la valeur maximale approcherait  $7.8 \pm 0.6$  (Locat, 2011). Ce séisme est notamment à l'origine du glissement de Saint-Joseph-de-la-Rive sur lequel le village a par la suite été construit (Quilliam et Allard, 1989). Ce glissement s'est produit dans des terrasses marines. Les dépôts quaternaires de Charlevoix (till, matériaux fluvioglaciers et marins) sont en effet le lieu de nombreux glissements et coulées de débris dans ce secteur.

Le logiciel Flow-R a été testé sur une zone limitée. Le secteur choisi est celui de Saint-Joseph-de-la-Rive, qui fut notamment le lieu de la coulée de débris du 16 novembre 1966. Cette dernière fit suite à une rupture de digue, entraînant la libération de 8500 mètres cube qui se propagèrent jusque dans le fleuve Saint-Laurent, 2.3 km en aval (Amiguet, 2007). La coulée de débris, d'une durée de 25 minutes environ déposa une couche de vase de 1.5 mètres d'épaisseur sur la partie touchée de Saint-Joseph-de-la-Rive. Trois habitants perdirent la vie et de nombreuses infrastructures furent endommagées, dont la voie de chemin de fer qui fut recouverte et la gare du village détruite. Ce ne sont pas des précipitations intenses ou une rapide fonte des neiges qui sont la cause de la rupture, mais une conception jugée déficiente par l'enquête qui a suivi (Lavallée, 1966). Le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive est le lieu de nombreux glissements de terrain et une grande quantité de matériaux s'accumulent dans les ruisseaux. L'importante masse d'eau libérée lors de la rupture de la digue a ainsi entraînée tous ces débris.

## 2 MÉTHODOLOGIE

La démarche pour aboutir à des cartes présentant les sources potentielles de coulées de débris sur le secteur à l'étude (Saint-Joseph-de-la-Rive) et leur propagation se décompose en trois étapes. Un modèle de base du terrain (MBT) a d'abord été réalisé à l'aide de levés LiDAR aéroporté et de photographies aériennes. Une mission de terrain a ensuite permis d'observer et confirmer la présence de glissements superficiels mis en évidence lors de la réalisation du MBT. Enfin, le logiciel Flow-R a permis de déterminer des sources potentielles de coulées de débris et leur propagation sur la globalité du secteur, entre autres en y insérant le MBT. Le couplage avec les observations de terrain permet aussi de prendre conscience de la cohérence ou l'incohérence des résultats obtenus avec le logiciel.

### 2.1 Modèle de base du terrain

Un modèle de base du terrain (MBT) est constitué de motifs (Cruden et Thomson, 1985). La méthodologie de Cruden et Thomson a été légèrement modifiée, tel que décrit par Locat et al. (2013). Chacun d'entre eux est le reflet de la nature du sol sous-jacent et de sa structure. Le

MBT permet de réaliser une carte morpho-structurale de la région. Chaque motif est caractérisé par un type de réseau de drainage (penné, dendritique, parallèle, etc.), une topographie, une teinte, une végétation et une certaine occupation du sol. Il est composé d'éléments qui ont une expression similaire et continue. Dans le cas du modèle de terrain réalisé ici, les principales caractéristiques utilisées sont le type de réseau de drainage et la topographie. Les teintes sur les photographies aériennes n'ont pu être utilisées étant donné la présence importante de végétation et étant donné que les photographies disponibles étaient en couleur.

Le tracé d'un réseau de drainage précis constitue probablement l'étape la plus importante dans l'établissement du MBT. D'un bon réseau de drainage découle une mise en évidence plus aisée des différents motifs. Le modèle numérique de terrain utilisé permet une très bonne précision. En effet, il a été réalisé à partir d'un levé LiDAR aéroporté dont la résolution est de 1 point par mètre carré en moyenne. Les principaux types de drainage retrouvés dans la zone d'étude sont les drainages: perturbé, dendritique, penné et rectangulaire. La figure 1 représente le réseau de drainage précis dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive avec des exemples des types de drainage.

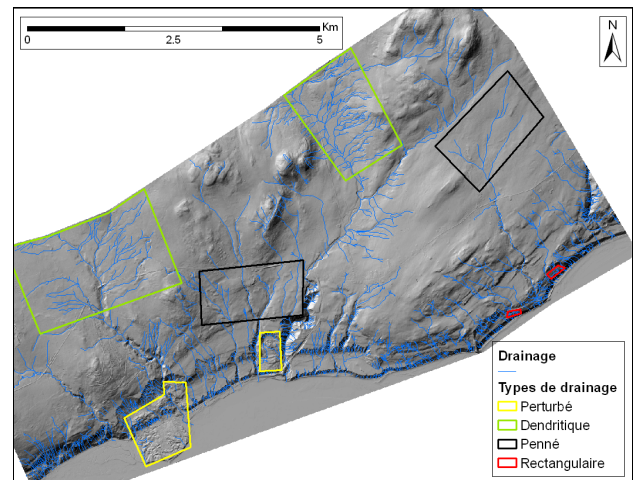


Figure 1. Image présentant le drainage précis(en bleu) dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive. Les principaux types sont les drainages perturbé (en jaune), dendritique (en vert), penné (en noir) et rectangulaire (en rouge).

Le réseau de drainage tracé, la topographie précise apportée par les données LiDAR, les photographies aériennes ont ensuite permis de délimiter les motifs. « Plaine de till », « roc avec plusieurs structures dominantes », « roc avec mince placage de till et structure indifférenciée » sont des exemples de motifs. La figure 2 est un extrait du modèle de base du terrain ainsi obtenu. Il s'agit du secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive, pris pour zone test lors de la modélisation des coulées de débris à l'aide de Flow-R. Le MBT permet d'introduire les terrains privilégiés pour les coulées de débris dans le logiciel de modélisation. Par exemple, les terrasses marines sont

favorables et le roc avec structure indifférenciée non favorable.

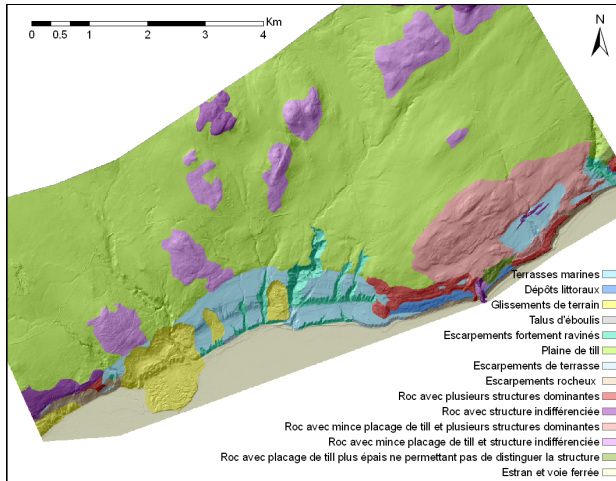


Figure 2. Image du modèle de base du terrain dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive

## 2.2 Investigations de terrain

Une analyse préliminaire de la zone d'étude, notamment grâce au travail sur les motifs, a permis de déterminer les ruisseaux et secteurs à inspecter prioritairement. Il s'agissait principalement des zones présentant des escarpements fortement ravinés (Figure 1).

Le travail de terrain a principalement consisté à parcourir les ruisseaux en notant et caractérisant les zones de glissement sur les berges, l'accumulation des coulées de débris dans le fond des cours d'eau et les matériaux qui constituent les berges. D'autre part, la plupart des coulées de débris s'arrêtent lorsqu'elles quittent le chenal principal et se retrouvent sur une surface caractérisée par des pentes faibles. La présence de telles surfaces est donc à prendre en compte.

Ces observations de terrain permettent, au final, de corroborer les résultats des analyses effectuées numériquement.

## 2.3 Principe de Flow-R et méthodologie dans Flow-R

Flow-R est un logiciel développé par Pascal Horton & al. de l'Université de Lausanne en 2008 (Horton, et al., 2008). Il permet de modéliser les phénomènes gravitationnels à une échelle régionale et notamment les coulées de débris. Dans un premier temps, il permet d'identifier les zones sources et dans un second temps, il évalue la propagation des coulées. Les données d'entrée du logiciel sont des fichiers ASCII. Ces derniers sont obtenus à l'aide d'ArcGIS. Le secteur exemple choisi pour tester le logiciel sur la zone d'étude est le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive. Il fut en effet le lieu de la coulée de débris de 1966. D'autre part, les photographies aériennes et les travaux de terrain ont confirmé que le secteur était fortement soumis aux mouvements de terrain.

### 2.3.1 La détermination des zones sources

Le premier paramètre à entrer dans le logiciel pour déterminer les zones sources est le modèle digital d'élévation. Dans le cas de cette étude, il a été obtenu avec les données des levés LIDAR aéroporté. La taille des cellules de la grille est de 1 m. La résolution est donc très bonne, ce qui s'avère une caractéristique importante pour obtenir des valeurs de pentes et de courbure de qualité. En effet, plus la taille des cellules de la grille sera grande, plus les courbures planaires et longitudinales seront sous-estimées entraînant ainsi une sous-estimation des zones de convergences et de dispersion des écoulements (Kienzle, 2004).

La pente constitue le facteur premier influençant l'instabilité locale. Bien que les coulées débris soient plus fréquemment associées à des pentes de 25° ou plus (Bisson et al. 2005), Takahashi (1981) donne une pente seuil de 15°. Cette valeur est choisie par Baumann et al. (2011) ainsi que par Horton et al. (2008) pour la modélisation des coulées de débris à l'aide du logiciel Flow-R utilisé dans cette étude. La valeur donnée par Takahashi correspond au cas des coulées de débris déclenchées à partir de pluies intenses tandis que la valeur de pente de 25° correspond plus à des glissements qui évoluent en coulées de débris (Iverson et al. 1997). Or les terrasses de ce secteur sont constituées de sédiments silteux, silto-sableux et sableux denses pour la terrasse à 150 m d'altitude et de sédiments silteux et sableux fins très denses, non plastiques et hétérogènes pour la terrasse à 50 m (Amiguet, 2007). Ces matériaux, confirmés lors des travaux de terrain, sont peu cohésifs et font ainsi des terrasses très sensibles à l'érosion pluviale et au ruissellement. La valeur seuil choisie pour la pente est donc celle de Takahashi, soit 15°.

La courbure planaire est le second facteur qui influe sur l'instabilité locale. Les coulées de débris surviennent dans les zones caractérisées par des pentes concaves. En effet, ces dernières concentrent le ruissellement et le drainage de surface favorisant ainsi l'érosion et la saturation du sol (Bisson et al. 2005, Barlow et al. 2006). La courbure planaire est utilisée par Baumann et al. (2011) et Horton et al. (2008) pour la modélisation. Les valeurs seuils utilisées sont différentes pour les deux études : inférieure à 0.01/m<sup>-1</sup> et -2/100 m<sup>-1</sup> respectivement. Cependant ces valeurs ont été prises pour des modèles digitaux d'élévation dont les grilles étaient de 30 m et 10 m. Dans le cas de cette étude, le modèle digital d'élévation a une grille de 1 m. La valeur seuil de courbure planaire considérée sera de -2/100 m<sup>-1</sup>.

Un autre paramètre limitant utilisé dans cette étude est l'aire contributrice. Elle permet de représenter la quantité d'eau qui pourrait s'écouler à travers un point pendant un épisode pluvieux. Il existe une relation entre l'aire contributrice et la valeur de la pente seuil pour l'initiation d'une coulée de débris. La relation utilisée dans l'étude (éq. 1) a été définie par Horton et al. (2008).

$$\left\{ \begin{array}{ll} \tan \beta = 0.31 * A^{-0.45} & \text{si } A < 2.5 \text{ km}^2 \\ \tan \beta = 0.26 & \text{si } A \geq 2.5 \text{ km}^2 \end{array} \right. \quad [1]$$

Cette relation est présentée dans le graphique de la figure 3. Sept intervalles d'aire contributrice ont été définis pour cette étude. Les pentes seuil pour chacun d'entre eux correspondent à celle de la valeur minimale de l'intervalle. Dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive, la valeur maximale de l'aire contributrice est de 0.514001 km<sup>2</sup>.

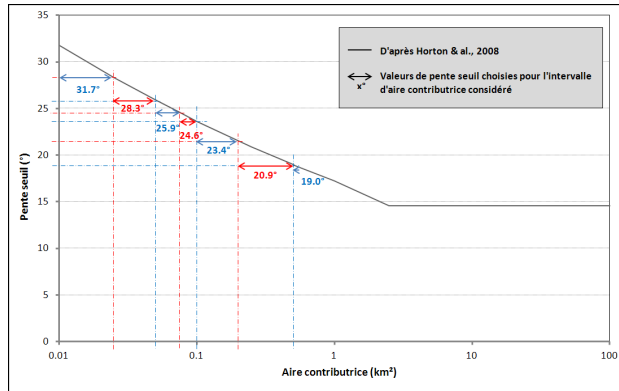


Figure 3. Graphique présentant les pentes seuil, pour déterminer les sources de coulées de débris, en fonction de l'aire contributrice. D'après Horton et al., (2008).

Enfin, le dernier paramètre utilisé pour déterminer les zones sources de coulées de débris découle du modèle de base du terrain (Figure 2). Les motifs considérés comme pouvant potentiellement être le lieu d'initiation sont les terrasses marines, les dépôts littoraux, les glissements de terrain, les talus d'éboulis, les escarpements fortement ravinés, les plaines de till, les escarpements de terrasse, le roc avec un mince placage de till et plusieurs structures dominantes ou structure indifférenciée et enfin le roc avec un placage de till plus épais ne permettant pas de distinguer la structure de la roche.

### 2.3.2 L'évaluation de la propagation

L'évaluation de la propagation s'effectue seulement avec le modèle digital d'élévation. Trois paramètres sont à définir : l'algorithme de direction, l'algorithme d'inertie et la fonction de perte d'énergie.

L'algorithme de direction d'Holmgren (1994) établit plusieurs hypothèses. Tout d'abord, l'eau s'écoule dans la direction la plus pentue. Ensuite, il y a une supposition selon laquelle tout l'écoulement qui atteint une cellule est également distribué au sein de cette dernière. De ce fait, une faible taille de cellule est un atout. Dans le cas de cette étude, les cellules ont une taille de 1 m<sup>2</sup>, ce qui est une très bonne résolution. Enfin, aucune cellule plus haute que la cellule considérée ne peut recevoir d'écoulement. Cet algorithme est multidirectionnel. Contrairement à la distribution unidirectionnelle du flux où tout l'écoulement est transmis à la cellule la plus basse, la distribution multidirectionnelle distribue le flux aux cellules descendantes proportionnellement aux gradients de pente. Elle permet ainsi l'écoulement divergent. Par rapport à la fonction multidirectionnelle définie par Quinn et al. (1991) qui produit une divergence trop importante

(Huggel et al., 2003), Holmgren (1994) ajoute un exposant  $x$ . Plus l'exposant est grand, plus l'écoulement tant vers l'unidirectionnel. Les valeurs optimales pour l'exposant sont situées entre 4 et 6. De plus, Baumann, et al. (2011) ainsi que Horton, et al. (2008) utilisèrent l'exposant 4 dans leurs travaux. Ainsi, l'algorithme d'Holmgren (1994) avec un exposant 4 a été choisi pour cette étude.

L'algorithme d'inertie pondère selon la direction de propagation précédente. Celui qui a été choisi est  $dfwalk$ . C'est l'algorithme le plus conservateur. En effet, pour une même direction, la pondération est de 1.5, pour une direction différente de 45°, 90° ou 135°, elle est de 1. Les deux autres choix d'algorithme d'inertie ont une valeur de pondération dégressive avec l'augmentation du changement de direction, pour atteindre 0 si la direction est plus grande que 135°.

La fonction de perte d'énergie utilisée dépend de deux paramètres : le rapport « masse-à-résistance »  $M/D$  et le coefficient de friction par glissement  $\mu$ . Le premier a une forte influence sur les parties pentues de la trajectoire tandis que le second a une plus grande influence sur la vitesse dans la région d'écoulement (Wichmann et Becht, 2004). L'enjeu ici est de déterminer des valeurs pour ces deux paramètres. Le rapport  $M/D$  dépend beaucoup de la distribution de la granulométrie des matériaux. Zimmermann et al. (1997) définissent trois gammes de  $M/D$  dépendantes des classes de matériaux :

- $20 \leq M/D \leq 60$  : Forte part de matériaux fins, part modeste de graviers et part de sable importante.
- $40 \leq M/D \leq 100$  : Sable et graviers principalement. Fraction fine < 10%.
- $80 \leq M/D \leq 180$  : Partie principale avec du sable et gravier, forte part de matériaux très grossiers et partie fine modérée.

La première classe correspondrait aux terrasses marines du secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive tandis que la troisième classe correspondrait plutôt au till. Il est ainsi difficile de définir une valeur commune pour l'ensemble de la région. Gamma (2000) quant à lui établit une relation entre l'aire contributrice et le coefficient de friction par glissement  $\mu$  :

$$\begin{aligned} \text{Pour l'évènement maximal : } & \mu = 0.13 * A^{-0.25} \\ \text{Pour l'évènement probable : } & \mu = 0.19 * A^{-0.24} \\ \text{Pour l'évènement minimal : } & \mu = 0.25 * A^{-0.21} \end{aligned} \quad [2]$$

Or l'aire contributrice dans la région d'étude s'étend de 0.01 km<sup>2</sup> à 0.51 km<sup>2</sup>. On obtient ainsi une gamme de  $\mu$  allant de 0.16 à 0.66. Cependant, Wichmann et Becht (2004) définissent une valeur maximale de 0.3.

Pour finir, une restriction de vitesse doit être imposée. Rickenmann (1990) définit une vitesse maximale de 30 m/s.

## 3 RÉSULTATS

### 3.1 Sources potentielles

Les sources obtenues résultent de la combinaison des différentes couches expliquées précédemment dans la section 2.3.1, à savoir, le modèle digital d'élévation, les pentes, la courbure planaire, l'aire contributrice et le MBT. Le résultat est sous forme de points. La figure 4 est un extrait du résultat obtenu dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive. Plusieurs d'entre elles correspondent à des zones de glissements superficiels observés sur le terrain.

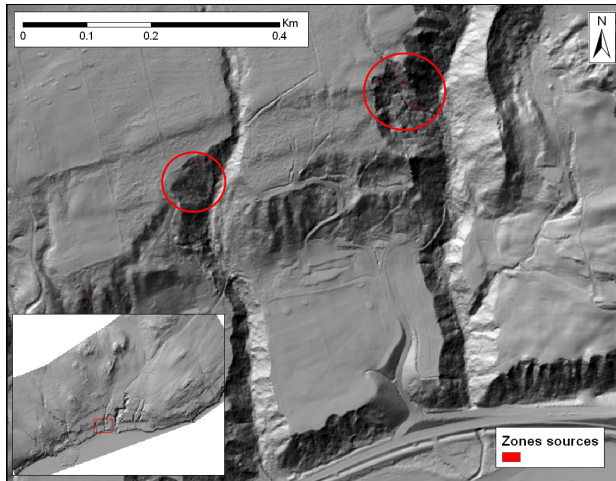


Figure 4. Image des potentielles zones sources de coulées de débris obtenues à partir du logiciel Flow-R dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive. Une majorité des sources obtenues se situe à l'intérieur des cercles rouges.

### 3.2 Écoulements

Dans la section 2.3.2, il a été mentionné que pour les terrasses marines de Saint-Joseph-de-la-Rive, le rapport « masse-à-résistance »  $M/D$  serait compris entre 20 et 60 et pour du till, il serait compris entre 80 et 180. Des valeurs moyennes, respectivement de 40 et 130, ont ainsi été choisies. Des simulations ont été effectuées pour chacun de ces rapports avec trois valeurs de  $\mu$  différentes : 0.16, 0.22 et 0.3 (section 2.3.2). **Le Erreur ! Source du renvoi introuvable.** compare qualitativement les résultats obtenus. Il en ressort que le paramètre qui contrôle la distance de propagation en premier lieu est le coefficient de friction par glissement  $\mu$ . Une faible valeur de  $\mu$  induit une plus grande distance de propagation. À valeurs égales de  $\mu$ , c'est le rapport  $M/D$  qui influence la propagation. Plus il est élevé, plus la distance sera importante.

Compte tenu du fait que la distance de propagation est plus importante avec un coefficient de friction par glissement  $\mu$  faible, les couples  $\mu/(M/D)$  considérés seront 0.16/40 et 0.16/130. Ce choix se place en effet du côté le plus sécuritaire. La figure 5 montre la susceptibilité potentielle pour le secteur dont les sources se situent principalement dans des terrasses marines ou des glissements de terrain au sein de ces terrasses. Le couple

$\mu/(M/D)$  choisi pour ce cas est 0.16/40. On obtient alors huit zones au niveau desquelles la voie ferrée pourrait potentiellement être atteinte. La figure 6 quant à elle présente les résultats de la propagation pour le secteur dont les sources se situent principalement dans du till. Le couple  $\mu/(M/D)$  choisi est alors 0.16/130. Cinq secteurs du chemin de fer seraient susceptibles d'être atteints par une coulée de débris.

Tableau 1: Tableau comparatif des propagations obtenues avec des couples  $\mu/(M/D)$  différents.

|          | 0.16/130 | 0.22/130 | 0.30/130 | 0.16/40 | 0.22/40 | 0.30/40 |
|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 0.16/130 |          | - +      | - +      |         |         |         |
| 0.22/130 | + -      |          | - +      |         |         |         |
| 0.30/130 | + -      | + -      |          |         |         |         |
| 0.16/40  | + -      | - +      | - +      |         | - +     | - +     |
| 0.22/40  | + -      | + -      | - +      | + -     |         | - +     |
| 0.30/40  | + -      | + -      | + -      | + -     | + -     |         |

Ces résultats sont qualitatifs, les probabilités ne doivent pas être considérées de façon quantitative car les algorithmes n'incluent pas de lois de probabilités.

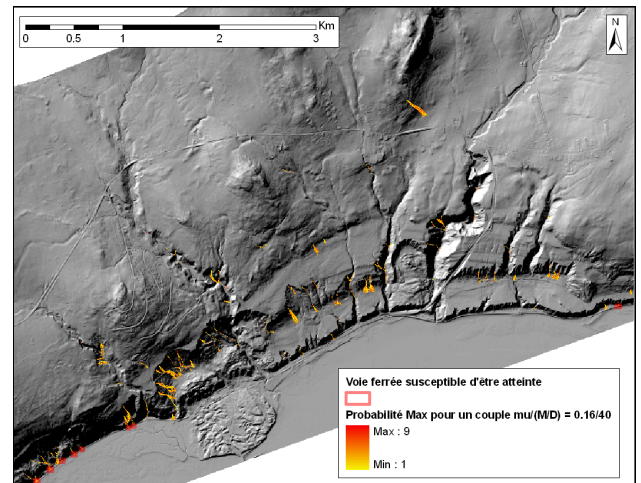


Figure 5. Image présentant les résultats de la simulation de la propagation pour un couple  $\mu/(M/D) = 0.16/40$ .

## 4 DISCUSSION

Certaines sources potentielles de coulées de débris détectées par Flow-R ont été confirmées lors de des visites de terrain qui ont permis d'observer plusieurs glissements superficiels concordant avec les résultats du logiciel. Par contre, les résultats de la modélisation numérique ont montrée des secteurs potentiellement problématiques qui n'avaient même pas été ciblés pour les travaux de terrain. Ces secteurs devront faire l'objet de plus amples travaux de terrain afin de s'assurer de la bonne calibration du modèle. Point de vue sources

potentielles, les résultats du modèle sont toutefois satisfaisants.

En revanche, des événements de coulées de débris dont la source et le lieu d'arrivée sont connus constituent des données manquantes pour cette étude. En effet, le cas historique de 1966 est dû à une rupture de barrage et a probablement emporté les débris qui encombraient le ruisseau. Ce type de coulée n'est pas pris en compte par le logiciel Flow-R. Ainsi, le manque d'événements connus dont la source était un glissement superficiel ou un départ de débris dû à une concentration de l'écoulement ne permet pas une bonne précision sur le calcul de l'énergie, donc la calibration sur les distances de parcours n'a pu être effectuée dans cette phase préliminaire. En effet, pour l'utilisation d'une fonction de perte d'énergie dépendante du coefficient de friction par glissement  $\mu$  et du rapport « masse-à-résistance » M/D, une calibration serait intéressante. Ensuite, les résultats obtenus nécessitent une analyse a posteriori. En effet, si les coulées se propagent dans des zones de végétation importante, leur distance de propagation se verra considérablement diminuée.

Enfin, le modèle ne considère pas la quantité de matériel qui peut être érodé lors de la coulée de débris, hors celui-ci augmente le volume de la coulée et son inertie, augmentant ainsi la distance de propagation. Cependant ce logiciel se veut un moyen de dresser une première évaluation du danger coulée de débris à l'échelle régionale, les paramètres et les données utilisés pour les simulations ne peuvent donc pas être autant raffinés que pour la simulation d'un cas d'étude précis. Il a d'ailleurs permis de mettre en évidence des secteurs potentiellement problématiques qui n'avaient pas été repérés au préalable lors de l'analyse préliminaire et lors des travaux de terrain. Plusieurs coulées de débris potentielles impactent la voie ferrée dans le secteur de Saint Joseph de la Rive.

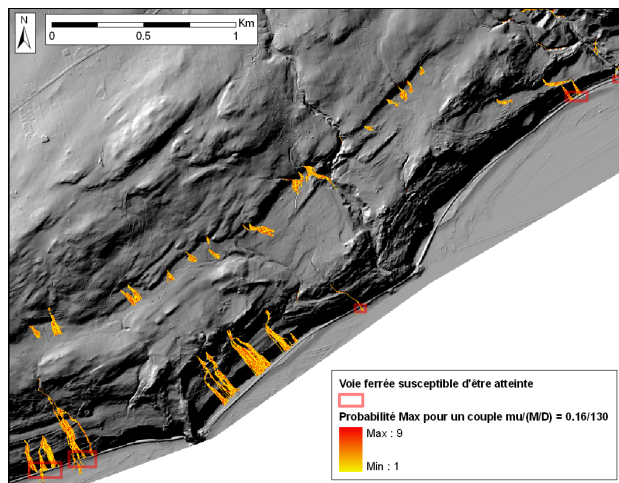


Figure 6. Image présentant les résultats de la simulation de la propagation pour un couple  $\mu/(M/D) = 0.16/130$ .

## 5 CONCLUSION

Le logiciel Flow-R s'est montré très complémentaire aux études de terrain et à l'analyse de photographies aériennes et levés LIDAR. En effet, il a mis en évidence des secteurs potentiellement problématiques qui n'avaient pas été repérés au préalable lors de l'analyse préliminaire et lors des travaux de terrain. Certes les zones révélées par le logiciel nécessitent une étude plus poussée par l'analyse de photographies aériennes et des travaux de terrain, mais la région d'étude ayant une grande superficie, les résultats obtenus après les simulations sont d'un très grand intérêt.

Flow-R a été testé seulement dans le secteur de Saint-Joseph-de-la-Rive, il serait intéressant d'étendre les simulations sur toute la région d'étude. Cependant, une calibration du coefficient de friction par glissement et du rapport « masse-à-résistance » serait un apport essentiel et constituerait une priorité pour des travaux ultérieurs. Il serait aussi intéressant d'inclure la densité de végétation dans les simulations. Enfin des simulations considérant l'érosion engendrée par la coulée pourraient être testées sur un secteur d'étude restreint. Wichmann et Becht (2004), par exemple, prennent en compte le matériel érodé et déposé à chaque itération du modèle.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient le Ministère des Transports du Québec et le Groupe Le Massif qui ont participé à cette étude et ont permis son financement. Ils remercient également toutes les personnes qui ont contribué à cette recherche, et notamment les étudiants et employés du Groupe Le Massif qui ont beaucoup aidé pour les travaux de terrain.

## RÉFÉRENCES

- Amiguet, C. 2007. Documentation de la coulée de débris survenue à Saint-Joseph-de-la-Rive le 16 novembre 1966. LERN, Université Laval, Québec.
- Barlow, J., Franklin, S., & Martin, Y. 2006. High spatial Resolution Satellite Imagery, DEM Derivatives, and Image Segmentation for the Detection of Mass Wasting Processes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72 (6), 687-692.
- Baumann, V., Wick, E., Horton, P., & Jaboyedoff, M. 2011. Debris flow susceptibility mapping at a regional scale along the National Road N7, Argentina. *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*. Toronto.
- Bisson, M., Favelli, M., Fornaciai, A., Mazzarini, F., Isola, I., Zanchetta, G., et al. 2005. A rapid method to assess fire-related debris flow hazard in the Mediterranean region: An example from Sicily (southern Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7, pp. 217-231.
- Cruden, D.M., Thomson, S., 1987, Exercises in Terrain Analysis, The Pica Pica Press, textbook division of The University of Alberta Press, 185pp.
- Dionne, J.-C. 1977. La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31 (1-2), pp. 61-80.

- Gamma, P. 2000. dfwalk - Ein Murgangsimulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Geographisches Institut der Universität Bern.
- Holmgren, P. 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4), pp. 327-334.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., & Bardou, E. 2008. Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. *4th Canadian Conference on Geohazards*, (pp. 399-406). Québec.
- Huggel, C., Käab, A., Haeberli, W., & Krummenacher, B. 2003. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(6), pp. 647-662.
- Iverson, R. M., Reid, M. E., & LaHusen, R. G. 1997. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, pp. 85-138.
- Kienzle, S. 2004. The effect of DEM Raster Resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, 8(1), pp. 83-111.
- Lavallée, R. 1966. Rapport d'inspection, Les Éboulements et Saint-Joseph-de-la-Rive. *Rapport d'inspection*, Ministère des Richesses Naturelles, Québec.
- Locat, J. 2011. La localisation et la magnitude du séisme du 5 février 1663 (Charlevoix) revues à l'aide des mouvements de terrain. *Revue canadienne de géotechnique*, 48, pp. 1266-1286.
- Locat, J., Noël, F., Fontaine, A., Turmel, D., Lajeunesse, P., Joyal, G., Bernatchez, P., 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 GéoMontréal 2013 (ce livre)
- 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 GeoMontréal 2013 (ce livre)
- Quilliam, L., & Allard, M. 1989. Évolution géomorphologique du glissement de terrain et du marais littoral de Saint-Joseph-de-la-Rive, Charlevoix, Québec. *Géographie physique et quaternaire*, 43, pp. 367-376.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrol. Process.* (5), pp. 59-79.
- Rickenmann, D. 1990. Debris flows 1987 in Switzerland: modelling and fluvial sediment transport. *IAHS Publ.* (194), pp. 371-378.
- Takahashi, T. 1981. Debris Flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, pp. 57-77.
- Wichmann, V., & Becht, M. 2004. Modelling of geomorphic processes in an alpine catchment. Dans P. Atkinson, G. Foody, S. Darby, & F. Wu (Éd.), *Conf. Proc. GeoComputation 2003*. Southampton.
- Zimmermann, M., Mani, P., & Gamma, P. 1997. Murganggefahr und Klimaänderung ein GIS basierter Ansatz. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.