







Université du Québec  
à Rimouski

# **CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLEMENT EXPOSÉES AUX CHUTES DE PIERRES À SAINT-FABIEN- SUR-MER, QUEBEC, CANADA**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR

© **MATTEO ARNALDI**

**Janvier 2025**



**Composition du jury :**

**David Didier, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Francis Gauthier, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**François Noël, examinateur externe, Geological Survey of Norway**

Dépôt initial le 6 mai 2024

Dépôt final le 29 janvier 2025



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

## **REMERCIEMENTS**

Merci à mon directeur de recherche, Francis Gauthier, pour ta patience, ton écoute et ta passion.

Merci à toute l'équipe du Laboratoire de géomorphologie et de gestion des risques en montagne (LGGRM), surtout Tom Birien, Francis Meloche, Jacob Laliberté, Chloé Chouinard, Yan Boulet, Claudia Perreault et Nathalie Thériault. Merci à Geneviève Banville, Émilien Cliche, Alexi Morin, Médrick Heppell et Olivier Langlois-Paradis pour votre aide sur le terrain et au bureau lors de l'été 2021.

Merci à ma famille et mes amis pour les encouragements : ma copine Andréanne, mes parents Roberto et Josée, mon frère Thomas et mes grand-mères Marisa et Gisèle.

Je ne peux oublier Julien Robitaille et Evan Rivest-Girard.

## RÉSUMÉ

Une falaise imposante, de 80 mètres de haut, située sur la face nord du Pic Champlain, est perchée au-dessus d'un secteur du village de Saint-Fabien-sur-Mer. Deux évènements de chutes de pierres majeures se sont produits; en 1967 ( $>500 \text{ m}^3$ ) et 2017 ( $\sim 27 \text{ m}^3$ ). Quelques maisons sont situées dans la ligne de tir des blocs potentiellement instables et la municipalité régionale de comté (MRC) se doit d'identifier les zones de son territoire exposées aux chutes de pierres dans son schéma d'aménagement. Afin de cartographier les zones potentiellement exposées, le logiciel Rockyfor3D a été utilisé pour simuler des trajectoires de chutes de pierres sur un modèle numérique d'élévation. Premièrement, les parois et le talus à l'étude ont été caractérisés à l'aide de méthodes de télédétection appuyées et validées par des visites sur le terrain. Ces données ont servi d'intrants à la simulation des trajectoires. Ensuite, une analyse de sensibilité a été effectuée en faisant varier le volume des blocs, les valeurs de rugosité et la présence ou l'absence d'arbres sur le talus. Les résultats de simulation ont été validés en comparant les cartes d'angles de parcours à des mesures d'angles de parcours de blocs de taille semblable retrouvés sur le terrain. Les données de probabilité d'atteinte ont été utilisées pour identifier les différents degrés de susceptibilité aux chutes de blocs et pour proposer une limite probable des trajectoires.

Mots clés : chutes de pierres, cartographie, simulation, Rockyfor3D, probabilité d'atteinte

## **ABSTRACT**

An imposing cliff, up to 80 meters high, on the north side of Pic Champlain, hangs above a portion of the Saint-Fabien-sur-Mer village. Two major rockfall events have occurred there in 1967 ( $>500 \text{ m}^3$ ) and 2017 ( $\sim 27 \text{ m}^3$ ). Several houses are located within the cliff's fall line, and it is recommended that the municipal regional county (MRC) include areas exposed to rockfall into their land-use planning. The Rockyfor3D software was used to simulate rockfall trajectories on a digital elevation model of the study site. First, the rock faces and talus slopes were characterized using remote sensing data, supported and validated by field visits. This data was used as the inputs to the simulation of rockfall trajectories. Then, a sensitivity analysis was performed by varying the rock block volume, the slope surface roughness and the presence of trees throughout multiple simulations. The simulation results were validated with the energy angle output and the reach angle of similarly sized boulders found on the field. The reach probability output data was used to identify varying levels of susceptibility to rockfalls and to propose a probable limit line.

*Keywords:* rockfall, mapping, simulation, Rockyfor3D, reach probability



## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                                                |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| REMERCIEMENTS .....                                                                                                            | vi   |
| RÉSUMÉ .....                                                                                                                   | vii  |
| ABSTRACT.....                                                                                                                  | viii |
| TABLE DES MATIÈRES.....                                                                                                        | x    |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                                                                       | xii  |
| LISTE DES FIGURES .....                                                                                                        | xiii |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE .....                                                                                                    | 1    |
| 1.1 PROBLEMATIQUE .....                                                                                                        | 1    |
| 1.2 OBJECTIFS .....                                                                                                            | 4    |
| 1.3 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....                                                                                                | 5    |
| 1.3.1 Géomorphologie et dynamique des versants rocheux.....                                                                    | 5    |
| 1.3.2 Trajectographie et cartographie des zones d'épandage.....                                                                | 15   |
| CHAPITRE 2 Description et caractérisation détaillée du site d'étude .....                                                      | 31   |
| 2.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE .....                                                                            | 31   |
| 2.2 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES BLOCS POTENTIELLEMENT<br>INSTABLES .....                                             | 33   |
| 2.2.1 Méthodes d'identification et de caractérisation.....                                                                     | 33   |
| 2.2.2 Identification et caractérisation des blocs .....                                                                        | 35   |
| CHAPITRE 3 Using Rockyfor3D to map the zones potentially exposed to rockfalls in<br>Saint-Fabien-sur-Mer, Quebec (CANADA)..... | 51   |
| 3.1 INTRODUCTION .....                                                                                                         | 51   |
| 3.2 STUDY SITE.....                                                                                                            | 52   |
| 3.3 METHODOLOGY .....                                                                                                          | 55   |

|                                   |                                                                                             |     |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.1                             | Production of input raster maps .....                                                       | 55  |
| 3.3.2                             | Simulation, sensitivity analysis and validation.....                                        | 66  |
| 3.3.3                             | Mapping the propagation zones using Rockyfor3D simulation<br>results .....                  | 68  |
| 3.4                               | RESULTS.....                                                                                | 71  |
| 3.4.1                             | Comparison of rockfall simulation results .....                                             | 71  |
| 3.4.2                             | Validation and scenario selection .....                                                     | 76  |
| 3.4.3                             | Mapping zones exposed to rockfall .....                                                     | 81  |
| 3.5                               | DISCUSSION.....                                                                             | 87  |
| 3.5.1                             | Reliability of input raster maps.....                                                       | 87  |
| 3.5.2                             | Effects of model parameters on simulated rockfall propagation .....                         | 90  |
| 3.5.3                             | Using 3D rockfall simulation software to support rockfall<br>propagation zone mapping ..... | 93  |
| 3.6                               | CONCLUSION .....                                                                            | 97  |
| CONCLUSION GÉNÉRALE.....          |                                                                                             | 99  |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... |                                                                                             | 102 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1. Mesures des caractéristiques des blocs 1 à 19 .....                                                                                                                                                                                               | 39 |
| Tableau 2. Mesures des caractéristiques des blocs 20 à 26 .....                                                                                                                                                                                              | 44 |
| Table 3. Predetermined soil types for Rockyfor3D characterization of the talus slope.<br>The Rn values correspond to the normal coefficient of restitution (Dorren,<br>2016).....                                                                            | 62 |
| Table 4. Reach probability mean and standard deviation (SD) values extracted for<br>each road section, building and cadastral lot polygon. The boxes highlighted<br>in yellow indicate the relationships that were graphed as box plots in Figure<br>62..... | 85 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Les habitations et infrastructures construites au bas du talus de la paroi des Murailles (MTQ, 2018). .....                                                                                                                                                                                                                                           | 2  |
| Figure 2. Glissement rocheux de 1967 (Dionne, 1969).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3  |
| Figure 3. Bloc qui s’est rendu au Chemin de la Mer en 2017 (TVA Nouvelles, 2017). .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 3  |
| Figure 4. Développement d'un versant de Richter à partir d'un escarpement (Wood, 1942).....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 5  |
| Figure 5. Les quatre unités fondamentales du versant rocheux : le segment sommital convexe, la paroi, le segment rectiligne et le segment basal concave (Wood, 1942).....                                                                                                                                                                                       | 6  |
| Figure 6. Caractéristiques des discontinuités (Wyllie et Mah, 2004). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 9  |
| Figure 7. Représentation stéréographique pour trois modes de ruptures communs : glissement planaire, glissement en dièdre et basculement (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011). .....                                                                                                                                                                           | 10 |
| Figure 8. Identification des conditions propices aux glissement et basculement d’un bloc sur un plan incliné : a) Croquis de la géométrie d’un bloc sur un plan incliné ; b) Conditions qui déterminent le glissement ou le basculement du bloc sur un plan incliné (Wyllie et Mah, 2004). .....                                                                | 10 |
| Figure 9. Identification des variables d’espacement ( $s_1$ , $s_2$ et $s_3$ ) et d’angle d’intersection entre les jeux de discontinuité ( $y_1$ , $y_2$ et $y_3$ ) (Kim <i>et al.</i> , 2007). ....                                                                                                                                                            | 11 |
| Figure 10. Tri granulométrique des fragments de roche dans un talus d’éboulis expérimentale. Les lignes pointillées représentent le diamètre des grains déposés en millimètres (Kirkby et Statham, 1975). .....                                                                                                                                                 | 14 |
| Figure 11. a) Valeurs de référence pour l'angle de parcours et l’angle d’ombrage (Jaboyedoff et Labiouse, 2003) ; b) Paramètres de pente dans l’étude de le Keylock & Domaas (1999), et, c) la représentation graphique de l’angle de parcours et l’angle d’ombrage sous la forme respective de cônes de dispersion jaune et orange (tiré de Noël, 2016). ..... | 17 |
| Figure 12. Paramètres physiques impliqués dans le rebond d'une chute de pierre : angle d’impact ( $\alpha$ ) défini par la trajectoire du bloc, angle de pente ( $\phi$ ), la                                                                                                                                                                                   |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| variation de la pente ( $\theta$ ), vitesse normale à la pente ( $V_n$ ), vitesse tangentielle à la pente ( $V_t$ ), coefficient de restitution tangentielle à la pente ( $R_t$ ) et le coefficient de restitution normal à la pente ( $R_n$ ) (Pfeiffer et Higgins, 1990).....                                              | 19 |
| Figure 13. Exemple d’une simulation de trajectoire de chutes de pierre en 2D avec le modèle RocFall : a) le pointillé jaune représente le profil topographique de la paroi; b) le profil topographique numérique et un histogramme des positions d’arrêt et c) la trajectoire des blocs simulés (Cloutier et al., 2017)..... | 22 |
| Figure 14. Illustration du calcul de traînée dû à la forêt dans RAMMS ::Rockfall (Vo, 2015).....                                                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Figure 15. Organigramme des étapes de la simulation des trajectoires de chutes de pierres dans Rockyfor3D (Dorren, 2016). ....                                                                                                                                                                                               | 25 |
| Figure 16. Description du MOH (hauteur moyenne d'obstacle) qui représente 70%, 20% et 10% de la surface d'un polygone homogène sur le terrain (Dorren, 2016).....                                                                                                                                                            | 26 |
| Figure 17. Représentation graphique du calcul de déviation latérale de la trajectoire de chute de pierre après un rebond en fonction de la direction de pente.....                                                                                                                                                           | 28 |
| Figure 18. Deux types de représentations numériques du terrain (MNT) : en haut, un nuage de points produit avec des données de télédétection (LiDAR, photogrammétrie) et, en bas, le même nuage de points converti en matrice avec une résolution de 2 m adapté à la simulation dans Rockyfor3D (Noël et al., 2021). ....    | 29 |
| Figure 19. Perte de cellules sources dans le MNT pour les pentes plus raides (Noël et al., 2021).....                                                                                                                                                                                                                        | 29 |
| Figure 20. Localisation de la paroi des Murailles à Saint-Fabien-sur-Mer. ....                                                                                                                                                                                                                                               | 32 |
| Figure 21. Carte des unités géographiques et géomorphologiques.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 32 |
| Figure 22. Définition des axes des blocs de roche lors de la mesure des dimensions pour le Tableau 1.....                                                                                                                                                                                                                    | 34 |
| Figure 23. Secteurs est et ouest de la paroi des Murailles (Neumeier, UQAR). ....                                                                                                                                                                                                                                            | 35 |
| Figure 24. Vue d'ensemble de la paroi secteur est, de la cicatrice de l'évènement de 1967 (en vert) et identification des blocs potentiellement instables de 1 à 19 (en rouge).....                                                                                                                                          | 38 |
| Figure 25. Blocs 1, 2 et 3 dans le secteur est de la paroi. ....                                                                                                                                                                                                                                                             | 39 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 26. Blocs 2 et 3 vu du Chemin de la Mer (Crédit photo MTQ, 2019). .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 40 |
| Figure 27. Blocs 4, 5, 6 et 7 dans le secteur est de la paroi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 40 |
| Figure 28. Bloc 8 dans le secteur est de la paroi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 41 |
| Figure 29. Blocs 9, 10 et 11 dans le secteur est de la paroi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 41 |
| Figure 30. Blocs 12, 13 à 14 dans le secteur est de la paroi .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 42 |
| Figure 31. Blocs 15, 16 et 17 dans le secteur est de la paroi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 42 |
| Figure 32. Blocs 18 et 19 dans le secteur est de la paroi.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 43 |
| Figure 33. Vue d'ensemble de la paroi secteur ouest et identification des blocs<br>potentiellement instables # 20 à 26 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 45 |
| Figure 34. Blocs 20, 21 et 22 du secteur ouest de la paroi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 46 |
| Figure 35. La colonne détachée du bloc 20 du secteur ouest de la paroi. La photo a<br>été prise à partir du bloc 23.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 47 |
| Figure 36. Blocs 23, 24, 25 et 26 du secteur ouest de la paroi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 48 |
| Figure 37. Visualisation des piliers détachés de la paroi potentiellement instables (en<br>mauve) et du bloc 20. La carte de fond à gauche est l'orthophoto produite à<br>partir du relevé hélicoptère d'octobre 2019, et la carte de fond à droite est le<br>relief ombré à partir de la mosaïque 3D. Le X jaune représente le lieu de<br>départ de l'évènement de 2017, tandis que le polygone jaune est la cicatrice<br>laissée par sa trajectoire. .... | 49 |
| Figure 38. Identification des piliers détachés (en mauve) et du bloc 20 (en rouge) vu<br>de la plage. Le X jaune représente la position de départ du bloc qui s'est<br>détaché lors de l'évènement de 2017. On peut aussi voir le corridor dénudé<br>d'arbres par le passage du bloc de 2017. (MTQ, 2018) .....                                                                                                                                             | 50 |
| Figure 39. Deposit left behind by the 1967 rockfall event (Dionne, 1969).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 53 |
| Figure 40. A block, with a volume of 27 m <sup>3</sup> , landed on the Chemin de la Mer in<br>Saint-Fabien-sur-Mer, after the 2017 rockfall event (unknown source, TVA<br>Nouvelles, 2017). ....                                                                                                                                                                                                                                                            | 54 |
| Figure 41. Map of the Murailles rock escarpement in Saint-Fabien-sur-Mer. The<br>green polygon represents the starting position of the 1967 rockfall event and<br>the yellow X: the 2017 event. ....                                                                                                                                                                                                                                                        | 54 |
| Figure 42. a) The result of the merging of the three LiDAR surveys used to produce<br>the two DEMs (b and c). The dark green point cloud at the bottom is from                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| the 2013 survey, the red point cloud on the cliff is from the 2018 drone survey and the light green point cloud is a mesh of the 2019 survey. b) Hillshade of the 0.25 m DEM, and c) Hillshade of the 2 m DEM, used in the Rockyfor3D simulations. ....                                               | 57 |
| Figure 43. a) Field validation points (red dots) and their position within the roughness polygons (red lines). b) In Rockyfor3D, surface roughness is defined by the mean obstacle height (MOH) and a 70%, 20% and 10% probability height was calculated for each polygon (Dorren, 2016). ....        | 60 |
| Figure 44. Map of the polygons that delimit the zones of similar surface roughness and soil type, according to the data used in Bédard, 2019, on the 0.25 m resolution hillshade.....                                                                                                                 | 61 |
| Figure 45. Soil type polygons used in this study and the validation points that were visited on the field. ....                                                                                                                                                                                       | 63 |
| Figure 46. Tree file and coniferous tree percentage map. ....                                                                                                                                                                                                                                         | 65 |
| Figure 47. Zoom of the 2019 aerial photo mosaic that was used to draw limit lines (green) between areas of similar forest types. ....                                                                                                                                                                 | 65 |
| Figure 48. Position of road section polygons. ....                                                                                                                                                                                                                                                    | 69 |
| Figure 49. Position of building polygons. ....                                                                                                                                                                                                                                                        | 70 |
| Figure 50. Cadastral plan of the study site values extracted for each lot polygon.....                                                                                                                                                                                                                | 70 |
| Figure 51. Reach probability results comparing Scenarios A and B for block volumes of 1 m <sup>3</sup> , 27 m <sup>3</sup> and 729 m <sup>3</sup> . ....                                                                                                                                              | 72 |
| Figure 52. Reach probability results comparing Scenarios B and C for block volumes of 1 m <sup>3</sup> , 27 m <sup>3</sup> and 729 m <sup>3</sup> . ....                                                                                                                                              | 73 |
| Figure 53. Furthest simulated block deposited for different slope characteristics and block sizes.....                                                                                                                                                                                                | 75 |
| Figure 54. Map and violin plot of the simulated minimum energy line angle (or reach angle) used to extract the 90 <sup>th</sup> and 95 <sup>th</sup> percentile (P90 and P95) in each of the three zones, for Scenario A, and blocks of 27 m <sup>3</sup> (above) and 729 m <sup>3</sup> (below)..... | 77 |
| Figure 55. Map and violin plot of the simulated minimum energy line angle (or reach angle) used to extract the 90 <sup>th</sup> and 95 <sup>th</sup> percentile (P90 and P95) in each of the three zones, for Scenario B, and blocks of 27 m <sup>3</sup> (above) and 729 m <sup>3</sup> (below)..... | 78 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 56. Map and violin plot of the simulated minimum energy line angle (or reach angle) used to extract the 90 <sup>th</sup> and 95 <sup>th</sup> percentile (P90 and P95) in each of the three zones, for Scenario C, and blocks of 27 m <sup>3</sup> (above) and 729 m <sup>3</sup> (below)..... | 79 |
| Figure 57. Box plot diagrams of the reach angle measured on the DEM: a) for blocks of 2 to 4 m in diameter, and b) for blocks of 7 to 15 m diameter (adapted from Gauthier <i>et al.</i> , 2023). ....                                                                                                | 80 |
| Figure 58. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 27 m <sup>3</sup> for Scenario B.....                                                                                                                                                              | 82 |
| Figure 59. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 729 m <sup>3</sup> for Scenario B.....                                                                                                                                                             | 83 |
| Figure 60. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 27 m <sup>3</sup> for Scenario C.....                                                                                                                                                              | 83 |
| Figure 61. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 729 m <sup>3</sup> for Scenario C.....                                                                                                                                                             | 84 |
| Figure 62. Box plots comparing the extracted reach probabilities, for Scenarios B and C, for buildings 1, 2 and 3, road sections 17 and 19 and lots 1 and 3; for blocks of 27 m <sup>3</sup> and 729 m <sup>3</sup> .....                                                                             | 86 |
| Figure 63. Three-dimensional mesh representation of the study site based on the 0.25 m resolution point cloud. ....                                                                                                                                                                                   | 88 |



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1.1 PROBLÉMATIQUE

Une partie du village de Saint-Fabien-sur-Mer est construite entre un escarpement rocheux nommé Les Murailles et les berges de l'estuaire du Saint-Laurent. La mise en place d'un talus d'éboulis sous l'escarpement témoigne de l'activité géomorphologique qui peut potentiellement constituer un aléa pour les personnes résidentes et les infrastructures. Certaines habitations se trouvent parmi les blocs rocheux déposés au pied du talus (Figure 1).

Deux évènements de chutes de pierres majeurs ont été recensés à Saint-Fabien-sur-Mer. Un premier évènement est survenu en août de 1967 (Figure 2). Le glissement rocheux a transporté des blocs de 4 mètres de diamètre au pied du talus, dont un qui se serait rendu jusqu'à la plage (Dionne, 1969). D'après la cicatrice de rupture, une masse d'environ 2800 mètres cubes se serait détachée de la paroi (Gauthier *et al.*, 2023). Un second évènement s'est produit en novembre 2017, après une période de fortes pluies et de vents violents, suivie de plusieurs journées avec des températures oscillant autour de 0 °C (Gauthier *et al.*, 2023). La rupture d'un éperon rocheux a libéré une masse de roche de 90 m<sup>3</sup>. Un bloc de 27 m<sup>3</sup> a dévalé le talus pour terminer sa course sur le Chemin de la Mer (Figure 3).



Figure 1. Les habitations et infrastructures construites au bas du talus de la paroi des Murailles (MTQ, 2018).

Afin d'assurer la sécurité des résidents de Saint-Fabien-sur-Mer et des usagers du Chemin de la Mer, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) et le Ministère de la Sécurité Publique (MSP) s'intéressent à l'identification des masses de roche potentiellement instable sur la paroi rocheuse et les zones de propagation potentielle des chutes de pierres. De plus, la Loi sur l'aménagement et l'urbanisme oblige les municipalités régionales de comté (MRC) à inclure les zones potentiellement soumises à des contraintes naturelles dans leurs plans d'aménagement (Chapitre A-19.1 ; Article 5.4). Les zones habitées potentiellement exposées aux chutes de pierres sont rares au Québec. Par conséquent, aucun cadre normatif et méthode d'identification des zones exposées aux chutes de pierre n'est disponible pour appuyer les municipalités dans le processus d'intégration de ces zones dans leurs schémas et plans d'aménagement. Ce travail contribuera à estimer des distances et limites probables d'épandages des chutes de pierres à Saint-Fabien-sur-Mer.



Figure 2. Glissement rocheux de 1967 (Dionne, 1969).



Figure 3. Bloc qui s'est rendu au Chemin de la Mer en 2017 (TVA Nouvelles, 2017).

## 1.2 OBJECTIFS

L'objectif principal est de proposer une cartographie des zones potentiellement exposées aux chutes de pierres à Saint-Fabien-sur-Mer. Plusieurs étapes, guidées par des sous-objectifs, sont nécessaires pour y parvenir. Premièrement, la caractérisation des blocs potentiellement instables est une étape importante afin d'identifier les zones d'où les chutes de pierres peuvent provenir et jusqu'où ils peuvent se rendre. La caractérisation de la paroi aide à déterminer les dimensions et les formes de chutes de pierres possibles, tandis que la caractérisation du talus inclut la description de la topographie, de la rugosité de surface, du type de sol et de la forêt. Deuxièmement, les simulations de trajectoires de chutes de pierres sont lancées dans Rockyfor3D et les résultats permettent d'identifier les zones et limites de propagation. Troisièmement, une analyse de sensibilité aide à mieux comprendre l'influence de certaines variables sur les distances parcourues par les blocs de pierre avec le logiciel de simulation. Cette analyse permet de choisir les intrants et paramètres de simulation appropriés pour obtenir les résultats qui représentent le mieux la réalité sur le terrain ; dans le but de proposer des cartes des zones potentiellement exposées aux chutes de pierres à Saint-Fabien-sur-Mer.

### 1.3 ÉTAT DES CONNAISSANCES

#### 1.3.1 Géomorphologie et dynamique des versants rocheux

L'origine et l'évolution géomorphologique des escarpements rocheux ont largement été débattues et plusieurs théories ont été proposées (Davis, 1899 ; Penck, 1924 ; King, 1957, Wood, 1942 ; Rapp, 1960a ; Selby, 1993). Mais, pour le cas d'un escarpement de faille ou d'une paroi glaciaire récemment exposée (Figure 4A), la météorisation et le recul de la paroi mènent généralement à son remplacement par un talus d'éboulis composé de fragments de roche provenant de la paroi (Figures 4B et 4C) (King, 1957 ; Wood, 1942). Le phénomène de remplacement de la paroi par un talus détritique mène au développement d'un versant de Richter (Figure 4D) (Selby, 1993, King, 1957 ; Wood, 1942).

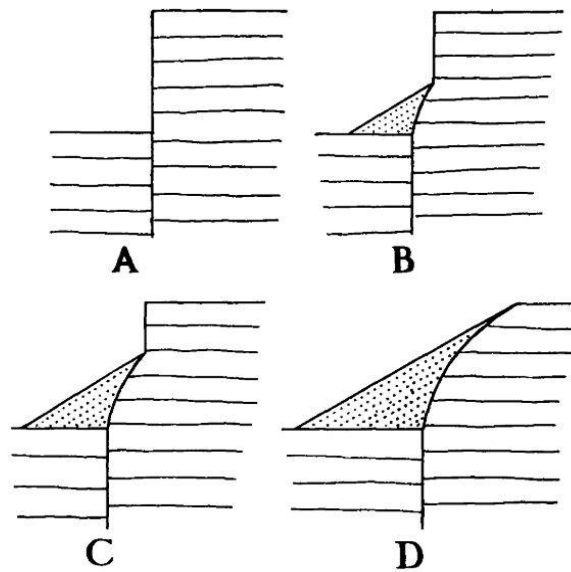


Figure 4. Développement d'un versant de Richter à partir d'un escarpement (Wood, 1942).

Le système classique de versant rocheux est composé de quatre unités fondamentales (Figure 5). La première se situe au-dessus de la paroi rocheuse et se nomme le segment sommital convexe. Le fluage qui se produit ici peut causer des fissures de tension au sommet et des fractures dans la paroi. La seconde unité est la paroi rocheuse, ou la zone de départ des chutes de pierres. La troisième unité est le segment rectiligne, ou le talus d'éboulis, formé par la déposition de chutes de pierres. La quatrième unité est le segment basal concave, où se produit la remobilisation des sédiments par le ruissellement de l'eau et les coulées de débris. Les chutes de blocs de grandes dimensions, qui parcourent de longues distances, tendent également à se déposer le long de ce segment.

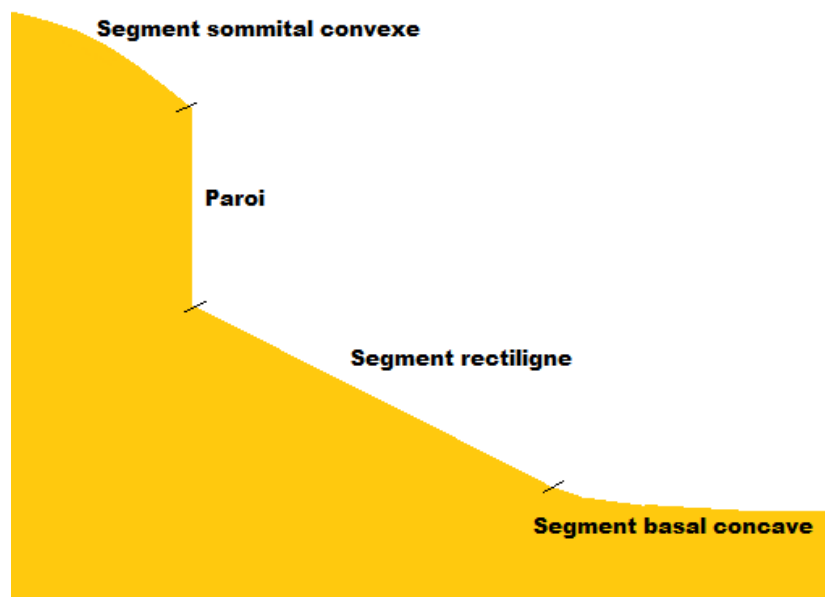


Figure 5. Les quatre unités fondamentales du versant rocheux : le segment sommital convexe, la paroi, le segment rectiligne et le segment basal concave (Wood, 1942).

### ***Paroi rocheuse***

La paroi rocheuse est présentée comme une entité qui compose le versant. On la considère souvent comme étant une masse homogène de roche lorsqu'en réalité c'est un assemblage de blocs découpé par les jeux de discontinuités. Les massifs rocheux sont divisés par des discontinuités qui délimitent les blocs de roc intact qui pourraient potentiellement se détacher de la paroi (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011).

La stabilité d'une paroi est contrôlée par son contexte géologique et géomorphologique, mais aussi par les facteurs environnementaux qui l'affectent (Luckman, 1976 ; Wiczeorek et Jäger, 1996). Le contexte géologique et géomorphologique du versant fait partie des facteurs de prédisposition, tandis que ; les facteurs environnementaux sont divisés en deux catégories : des facteurs qui réduisent la stabilité à long terme (facteurs aggravants) ou des facteurs qui causent la rupture (facteurs déclencheurs).

### ***Facteurs de prédisposition***

Certaines caractéristiques internes du massif rocheux, associées à son contexte géologique et géomorphologique, peuvent être considérées comme étant des facteurs de prédisposition (Pellicani *et al.*, 2016 ; Phillips *et al.*, 2017). Ces facteurs intrinsèques vont favoriser le développement et l'occurrence de chutes de pierres. La structure et les caractéristiques des discontinuités, en plus de la résistance mécanique du roc intact, sont les facteurs de prédisposition utiles à l'identification des zones propices aux développements de chutes de pierres (Dorren *et al.*, 2007 ; Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011 ; Gunzburger *et al.*, 2005 ; Hantz *et al.*, 2003 ; Stead et Wolter, 2015).

Les propriétés du roc intact sont déterminées par les conditions géologiques et tectoniques de sa genèse et par les processus qui l'ont affecté au fil du temps (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011). Ces propriétés incluent la composition minéralogique, la masse volumique, la structure, la fabrique, la porosité, le contenu en eau, la perméabilité, la

résistance mécanique et l'altérabilité (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011). Des essais en laboratoire existent afin de quantifier ou qualifier la majorité des propriétés du roc intact. Le comportement mécanique du roc intact dépend de sa résistance à la déformation. La rupture du roc intact se produit lorsque la contrainte appliquée dépasse la résistance maximale du roc et une discontinuité est créée (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011). Cette contrainte peut agir en compression ou en tension pour favoriser l'ouverture des discontinuités. Par exemple, les roches à la base d'une grande paroi subissent beaucoup de pression verticale et des fissures en compression peuvent se développer. En tension, l'ouverture des fissures peut être causée par la décompression postglaciaire ou l'érosion différentielle des masses de roche en porte-à-faux.

Les discontinuités sont des plans de faiblesses dans le massif rocheux (Wyllie et Mah, 2004). Plusieurs types de discontinuités existent dont les failles, les plans de litage, les joints, la foliation, la schistosité les fractures et les fissures (Brady et Brown, 2004 ; Hoek, 2007 ; Priest, 1993). La résistance au cisaillement le long d'une discontinuité est très faible comparée à la résistance du roc intact. Pour cette raison, la stabilité de la paroi est souvent gouvernée par la structure des discontinuités qui découpent les massifs rocheux en blocs de roc intact (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011 ; Hudson et Harrison, 1997). Les discontinuités et leur structure peuvent être acquises sur le terrain ou en télédétection (Abellán *et al.*, 2014 ; Wyllie et Mah, 2004). Les discontinuités sont très importantes dans l'analyse du massif rocheux et plusieurs caractéristiques permettent de décrire le comportement mécanique des discontinuités. Ces caractéristiques sont identifiées dans la Figure 6 (Wyllie et Mah, 2004).

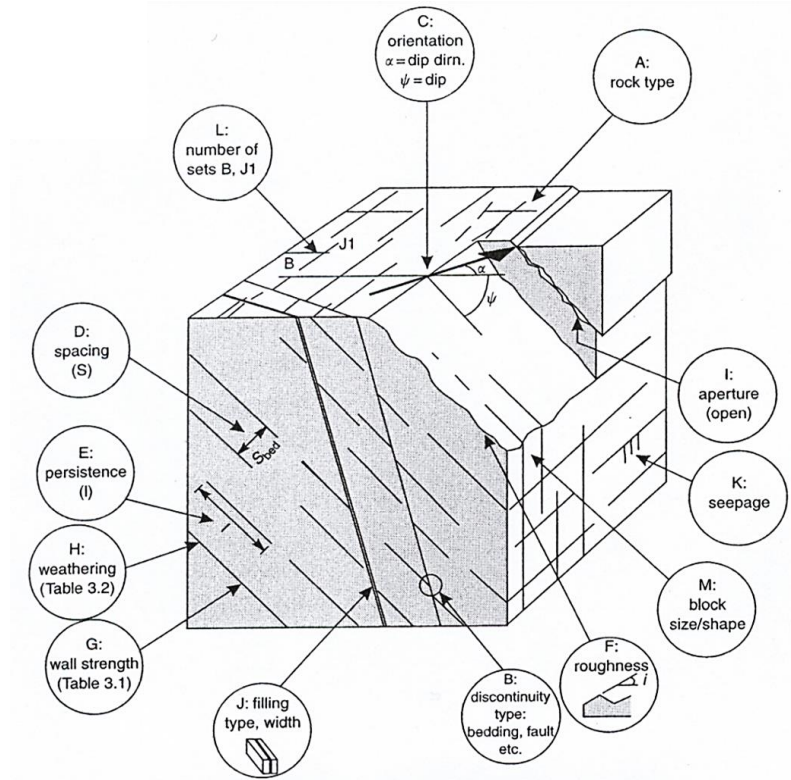


Figure 6. Caractéristiques des discontinuités (Wyllie et Mah, 2004).

Les caractéristiques qui contribuent le plus au développement de chutes de pierres sont la rugosité, l'orientation, le pendage, l'espacement et la persistance des discontinuités. L'orientation et le pendage des discontinuités décrivent comment le bloc va se détacher de la paroi (mode de rupture) et l'espacement et la persistance des discontinuités peuvent aider à définir la forme et la taille des blocs qui peuvent se détacher (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011 ; Matsuoka et Sakai, 1999). En traçant les angles de pendages et de directions de pendage d'un bloc en question sur une projection stéréographique ; et en les comparant avec l'angle de la paroi, on peut identifier le mode de rupture potentiel (Wyllie et Mah, 2004) (Figure 7). Les conditions qui déterminent si un bloc va glisser ou basculer d'un plan incliné sont l'angle du plan incliné et le rapport entre la largeur du bloc et la hauteur du bloc (Wyllie et Mah, 2004) (Figure 8).

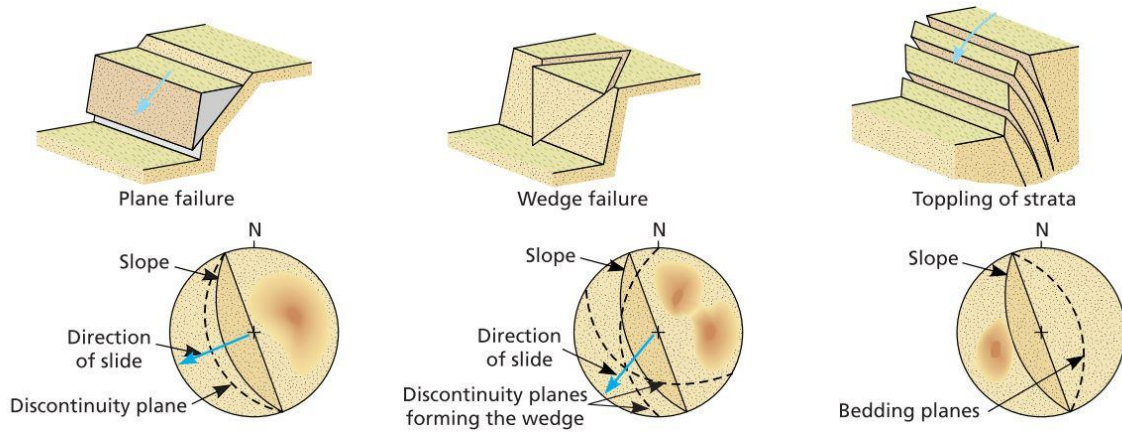


Figure 7. Représentation stéréographique pour trois modes de ruptures communs : glissement planaire, glissement en dièdre et basculement (Gonzalez de Vallejo et Ferrer, 2011).

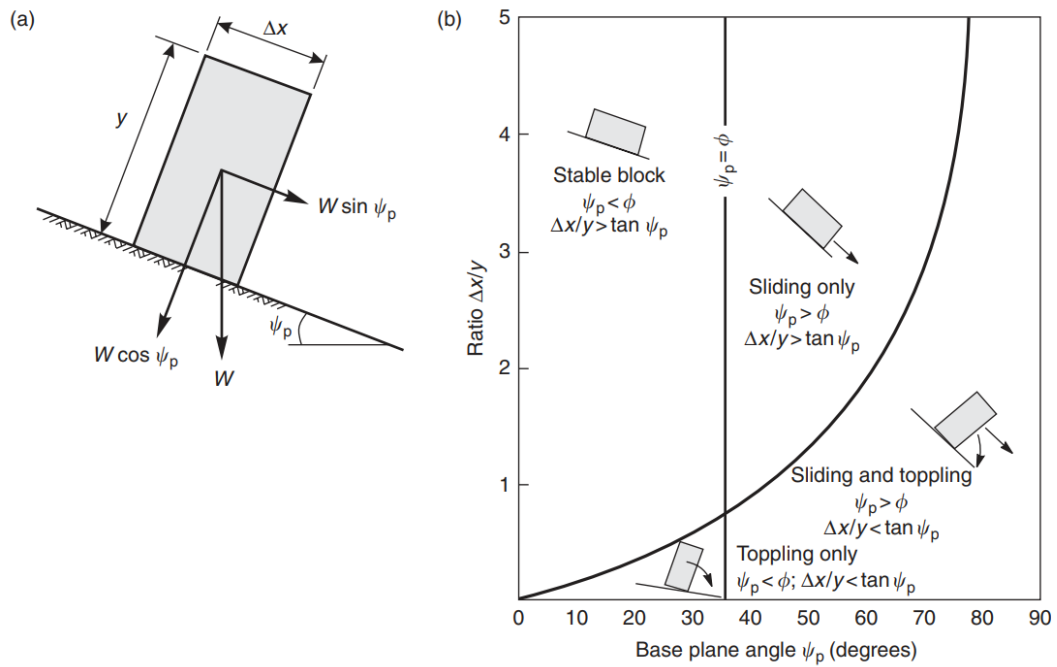


Figure 8. Identification des conditions propices au glissement et au basculement d'un bloc sur un plan incliné : a) Croquis de la géométrie d'un bloc sur un plan incliné ; b) Conditions qui déterminent le glissement ou le basculement du bloc sur un plan incliné (Wyllie et Mah, 2004).

La taille des blocs potentiellement instables peut être estimée grâce à l'équation du Block Size Index ( $I_b$ ); où  $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$  sont les valeurs d'espacement moyen pour chaque jeu de discontinuités dans la zone d'étude (Figure 9) (ISRM, 1978) :

$$I_b = \frac{s_1 + s_2 + s_3}{3}$$

Le volume moyen des blocs potentiellement instables ( $V_b$ ) peut être calculé à partir des mêmes valeurs d'espacement et de l'angle d'intersection entre les différents jeux de discontinuités :  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  et  $\gamma_3$  (Figure 9) (ISRM, 1978) :

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3}$$

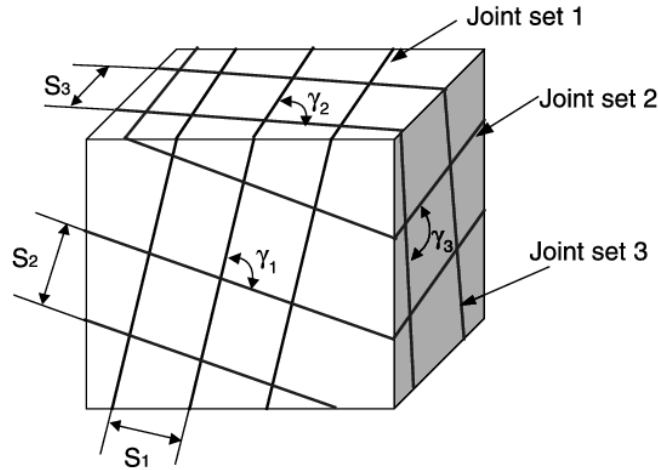


Figure 9. Identification des variables d'espacement ( $s_1$ ,  $s_2$  et  $s_3$ ) et d'angle d'intersection entre les jeux de discontinuité ( $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  et  $\gamma_3$ ) (Kim *et al.*, 2007).

### ***Facteurs aggravants et déclencheurs***

Dans le cas des chutes de pierres, les facteurs environnementaux qui peuvent réduire la stabilité d'un massif rocheux à travers le temps se nomment les facteurs aggravants, tandis que ceux pouvant provoquer directement la rupture d'une masse de roche se nomment les facteurs déclencheurs. Les principaux facteurs aggravants et déclencheurs causent de la météorisation physique et chimique, et ils incluent : les cycles thermiques, la pression hydrostatique et les séismes. Contrairement aux facteurs de prédispositions, qui évoluent peu au fil du temps, l'intensité des facteurs aggravants et déclencheurs peut changer à court terme en fonction des conditions météorologiques ou tectoniques.

Les cycles thermiques, qui incluent les cycles de gel-dégel sporadiques et le gel saisonnier, ont une influence importante sur le développement d'instabilités rocheuses et le déclenchement d'évènements de chutes de pierres (Birien et Gauthier, 2023b ; Birien et Gauthier, 2023a ; Eppes et Keanini, 2017 ; Frayssines et Hantz, 2006 ; Gunzburger *et al.*, 2005 ; Hantz *et al.*, 2003 ; Matsuoka, 2008 ; Matsuoka et Sakai, 1999). Les cycles de gel-dégel peuvent provoquer la rupture du roc par expansion volumétrique, lorsque l'eau dans les pores gèle; et par la croissance de glace dans les discontinuités (Birien et Gauthier, 2023b ; Birien et Gauthier, 2023a ; D'Amato *et al.*, 2016 ; Matsuoka, 1994). La fréquence et la magnitude des évènements de chutes de pierres augmentent lors des périodes de dégel et de fortes pluies, autant lors des cycles de gel-dégel journaliers que pour les cycles de gel-dégel annuels (D'Amato *et al.*, 2016 ; Matsuoka, 1994 ; Matsuoka et Sakai, 1999). Le phénomène du bloc cliquet; qui s'enfonce toujours plus profondément dans une fracture due aux cycles de dilatation thermique peut contribuer au développement d'instabilités rocheuses (Jaboyedoff, 2003). Finalement, la dégradation du pergélisol par la variation de la température dans les environnements glaciaires peut aussi causer des chutes de pierres (Draebing *et al.*, 2017 ; Noetzli *et al.*, 2003 ; Phillips *et al.*, 2017).

L'augmentation de la pression hydrostatique dans le massif rocheux, due à des évènements de fortes précipitations, la fonte des neiges au printemps et la fonte de la glace dans les discontinuités, peut causer la diminution de la résistance au cisaillement (Birien et

Gauthier, 2023b ; D'Amato *et al.*, 2016 ; Mateos *et al.*, 2012 ; Matsuoka et Sakai, 1999 ; Wieczorek, 1996 ; Wieczorek et Snyder, 1999). L'écoulement d'eau dans des milieux calcaires, par la pluie ou la fonte de la neige, peut dissoudre les carbonates dans le massif rocheux et accélérer l'érosion de la paroi par les discontinuités (Dixon et Thorn, 2005 ; Frayssines et Hantz, 2006 ; Krautblatter *et al.*, 2012 ; Krautblatter et Dikau, 2007). Le processus d'échange de cations qui se produit lors de la dissolution du calcaire accélère la désintégration du roc et l'occurrence des chutes de pierres (Bogaard *et al.*, 2000 ; Krautblatter *et al.*, 2012).

L'influence de la foudre dans le développement et le déclenchement des chutes de pierres en montagne est incertaine. Cependant, des expériences en laboratoire ont démontré que la foudre peut fracturer certaines roches à faible résistance mécanique (Wakasa *et al.*, 2012). Le quartz, en particulier, est susceptible à la déformation par la foudre (Karfunkel *et al.*, 2001).

Les mouvements terrestres causés par les séismes sont aussi reconnus comme étant l'un des principaux facteurs du développement et du déclenchement des instabilités rocheuses de grande magnitude (Eberhart-Phillips *et al.*, 2003 ; Harp et Jibson, 1995 ; Kobayashi *et al.*, 1990).

### ***Talus d'éboulis***

La chute de pierre est un processus géomorphologique qui se produit lorsqu'un, ou plusieurs blocs se détachent d'une paroi rocheuse (Pfeiffer et Higgins, 1990). Cette rupture est suivie d'un mouvement rapide de la masse rocheuse qui dévale le versant (Cruden et Varnes, 1996). Le talus d'éboulis est le résultat de la déposition de matériel rocheux qui s'accumule à la base d'une paroi de roc météorisée (Price *et al.*, 2013). Lorsqu'un mur de roc raide est en érosion, le remaniement constant du matériel rocheux à la surface due aux chutes de pierres actives maintient la pente moyenne du talus d'éboulis entre 35° et 40° (Bones, 1973). Avec le temps, les débris rocheux qui proviennent de la paroi s'accumulent, la hauteur

de la paroi diminue et la pente du talus augmente (Pérez, 1989 ; Roering et Hales, 2013 ; Selby, 1982 ; Statham, 1976). La finalité du phénomène de remplacement de pente est atteinte lorsque le talus réussit à couvrir l'entièreté de la paroi (Wood, 1942).

La distribution granulométrique des blocs sur le talus est en fonction du volume des blocs et de la hauteur initiale de chute. Les gros blocs sont susceptibles de parcourir de plus grandes distances sur le talus du fait de la grande énergie qui a pour résultat une déposition préférentielle vers le bas du talus (Pérez, 1989). Un petit bloc de roc qui se déplace sur un talus d'éboulis subit plus de résistance frictionnelle qu'un gros bloc et a plus de chance de se coincer dans une dépression du talus. Aussi, il souligne la présence d'une concavité basale dans le profil du talus d'éboulis, qui est causée par le transport des sédiments du haut de talus vers le bas (Figure 10). Cette concavité basale apparaît au début du développement du talus et semble disparaître avec le temps (Kirkby et Statham, 1975 ; Rapp, 1960 ; Statham, 1976).

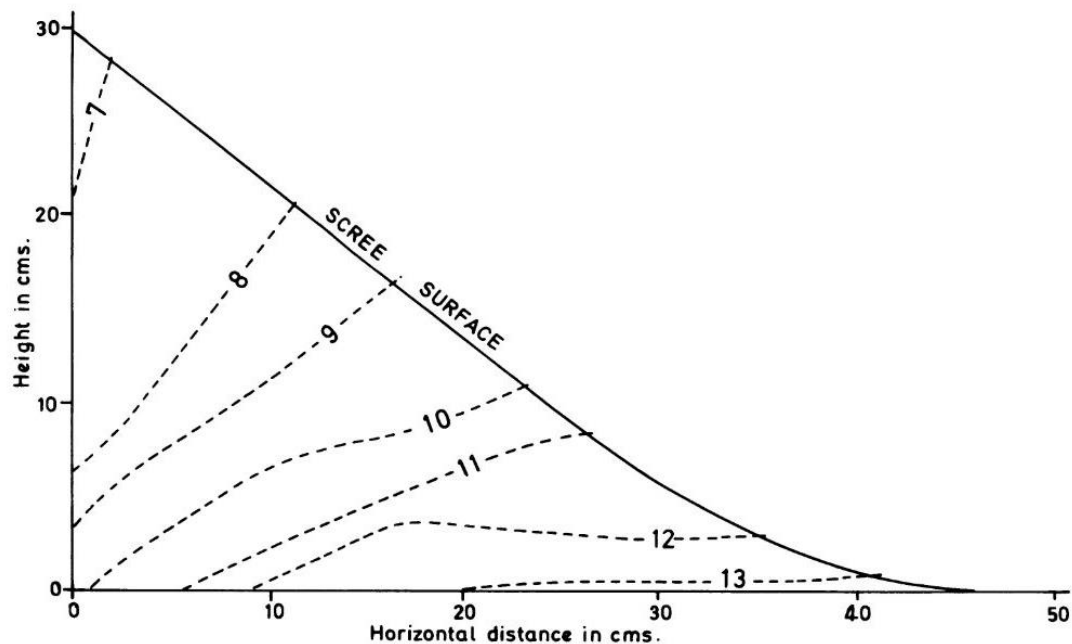


Figure 10. Tri granulométrique des fragments de roche dans un talus d'éboulis expérimentale. Les lignes pointillées représentent le diamètre des grains déposés en millimètres (Kirkby et Statham, 1975).

### 1.3.2 Trajectographie et cartographie des zones d'épandage

L'imprévisibilité des chutes de pierres pose un risque important pour les humains et leurs infrastructures. En région montagneuse, plusieurs bâtiments, routes et lignes de distribution électriques et voies ferrées sont exposés aux chutes de pierres. Des pertes économiques, des interruptions de services, des dommages à l'équipement et à l'infrastructure ; et même parfois des blessures mortelles peuvent résulter du phénomène de chute de pierre (Wyllie, 2014a). Depuis longtemps, les habitants de ces régions montagneuses essayent de déterminer les endroits sécuritaires où construire ; à l'abri de l'aléa de chute de pierre. Initialement, on utilisait des indicateurs géomorphologiques pour développer des modèles empiriques permettant de calculer la distance de propagation des chutes de pierres. Avec le développement de la modélisation informatique au cours des 40 dernières années, des logiciels ont été créés pour simuler la propagation des chutes de blocs.

Dans les prochaines sous-sections, nous allons suivre l'évolution des méthodes de cartographie des zones exposées aux chutes de pierres ; du *Fahrböschung* proposé par Heim (1932) aux modèles de simulation numérique comme Rockyfor3D (Dorren, 2016).

#### ***Indicateurs géomorphologiques et angle d'atteinte***

Les habitants des régions montagneuses ont longtemps utilisé des indicateurs géomorphologiques pour identifier les zones à l'abri des chutes de pierres (Pauly et Payany, 2002). La position de gros blocs au pied du talus d'éboulis pouvait être utilisée par les aménagistes comme limite de la zone de propagation des chutes de pierres et limite de la zone habitable. L'étude statistique de la distance des blocs marginaux a permis à Heim, en 1932, d'établir le *Fahrböschung* ; une relation empirique basée sur la hauteur de la paroi et la distance parcourue (Figure 11a et 11b). En complément, l'angle d'ombrage est l'angle formé entre le haut du talus (ou bas de la paroi) et la ligne des blocs marginaux (Figure 11a) (Evans et Hungr, 1993 ; Noël et al., 2023b ; Wieczorek et al., 1998). L'angle d'ombrage suppose que l'énergie cinétique acquise lors de la chute libre initiale est perdue lors des

premiers impacts en haut de talus (Jaboyedoff et Labiouse, 2003). Dans les deux cas, l'angle utilisé pour la cartographie des limites d'épandage doit être déterminé avec la position des blocs marginaux qui ont parcouru les plus grandes distances depuis la paroi. Plusieurs ont tenté d'établir des valeurs universelles d'angle de parcours ou d'angle d'ombrage pour faciliter l'identification des limites d'atteinte des chutes de blocs (Figure 11a). Les travaux de Keylock & Domaas (1999) permettent de montrer que la distance parcourue par le bloc ( $L_1$ ) suit une relation de puissance avec la hauteur de la paroi ( $H_{2+3}$ ) (Figure 11b) :

$$\log L_1 = 0,77 \log H_{2+3}$$

Les chutes de pierres suivent rarement une trajectoire parfaitement linéaire et peuvent dévier lors des impacts avec des arbres ou des blocs de roc sur le talus. À partir d'une même zone source, la somme des trajectoires peut prendre une forme conique. Certains logiciels, comme CONEFALL, servent à tracer la limite de propagation d'après l'angle d'atteinte, tout en considérant la forme conique de la déviation latérale possible (Figure 11c) (Quanterra, 2003). L'angle de  $27.5^\circ$  a été utilisé pour tracer des cônes de dispersion dans la Figure 11c parce que c'est la moyenne des « shadow angle » mesurée par Evans et Hungr (1993) et utilisée par Jaboyedoff et Labiouse (2011).

Le principal avantage de ces méthodes empiriques découle de leur facilité et de leur rapidité à définir des zones d'impact des chutes de blocs sur de vastes territoires. (Dorren *et al.*, 2003). Ces outils de cartographie, basées sur la topographie du versant sont encore utilisées pour valider les résultats de simulation numérique ou même pour étendre la cartographie des zones exposées dans un contexte géologique et géomorphologique similaire, sans le travail de recensement de gros blocs (Gauthier *et al.*, 2023).

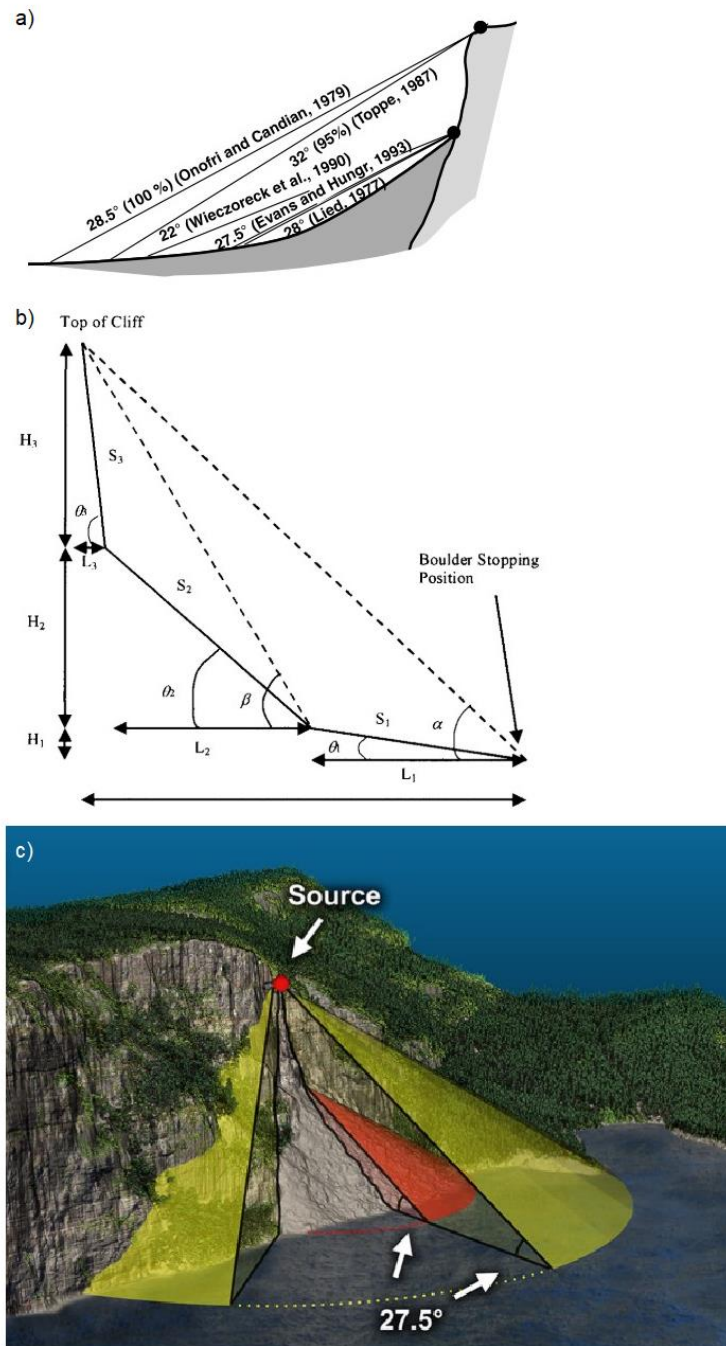


Figure 11. a) Valeurs de référence pour l'angle de parcours et l'angle d'ombrage (Jaboyedoff et Labiouse, 2003) ; b) Paramètres de pente dans l'étude de Keylock & Domaas (1999), et, c) la représentation graphique de l'angle de parcours et l'angle d'ombrage sous la forme respective de cônes de dispersion jaune et orange (tiré de Noël, 2016).

### ***Modèles de simulation en deux dimensions (2D)***

Le développement des ordinateurs a initialement permis de développer des modèles de simulation en 2D. Le profil longitudinal d'un versant  $y$  est représenté dans un plan cartésien où les chutes de pierres peuvent être simulées. Les équations de mécanique newtonienne derrière ces modèles supposent qu'un bloc qui se détache d'une paroi possède une énergie potentielle relative à la masse du bloc et à sa hauteur. Dans la phase initiale de chute libre du bloc, l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique. À chaque fois que le bloc rebondit sur la surface de la pente, l'impact ralentit le bloc et diminue l'énergie cinétique (Wyllie, 2014).

Il existe deux méthodes pour représenter les blocs lors d'une simulation de chute de pierre : en *lumped mass* ou en corps rigide (*rigid body*) (Noël, 2016). La méthode du *lumped mass* considère que le bloc se comporte comme un seul point, sans forme, concentré au centre de la masse. De l'autre côté, la méthode du corps rigide assume que le bloc a une forme géométrique connue, comme une sphère, un cube, un cylindre ou un ellipsoïde, qui interagit avec la surface d'impact (Lambert et Nicot, 2013).

Les interactions entre le bloc et la surface sont contrôlées par trois variables importantes : le coefficient de restitution tangentiel, le coefficient de restitution normal et le coefficient de friction (Li et Lan, 2015). La diminution de l'énergie après qu'un bloc rebondit sur la pente serait causée par trois phénomènes distincts : la déformation plastique du bloc et du sol, le transfert d'énergie au sol sous forme d'ondes élastiques et la transformation de l'énergie de rotation en énergie de translation (Falcetta, 1985). Les coefficients de restitution déterminent le rapport de vitesse relative du bloc, avant et après chaque rebond, et servent à quantifier la perte d'énergie à chaque rebond (Figure 12) (Lambert et Nicot, 2013) :

$$\text{Coefficient de restitution (e)} = \frac{\text{Vitesse relative après collision}}{\text{Vitesse relative avant collision}}$$

Les coefficients de restitution sont divisés en deux : normale et tangentielle pour représenter les directions d'impact possible (perpendiculaire et parallèle à la surface de la pente) et calculer l'énergie du bloc après le rebond. Le coefficient de friction, également appelé coefficient de frottement, correspond au rapport entre la force de glissement et la force de maintien produites au contact de deux surfaces. Il dépend de la taille et de la forme du bloc, ainsi que de l'angle de pente et la taille des obstacles (Volkwein *et al.*, 2011). Le coefficient de friction atténue l'énergie du bloc lorsqu'il se déplace en glissement ou en roulement sur la surface de la pente (Wyllie, 2014). Il existe deux méthodes afin de déterminer ces trois paramètres : la rétroanalyse d'essais expérimentaux sur le terrain (Crosta et Agliardi, 2003) ou en les calculant à partir d'essais en laboratoire (Chau *et al.*, 2003 ; Kim *et al.*, 2015).

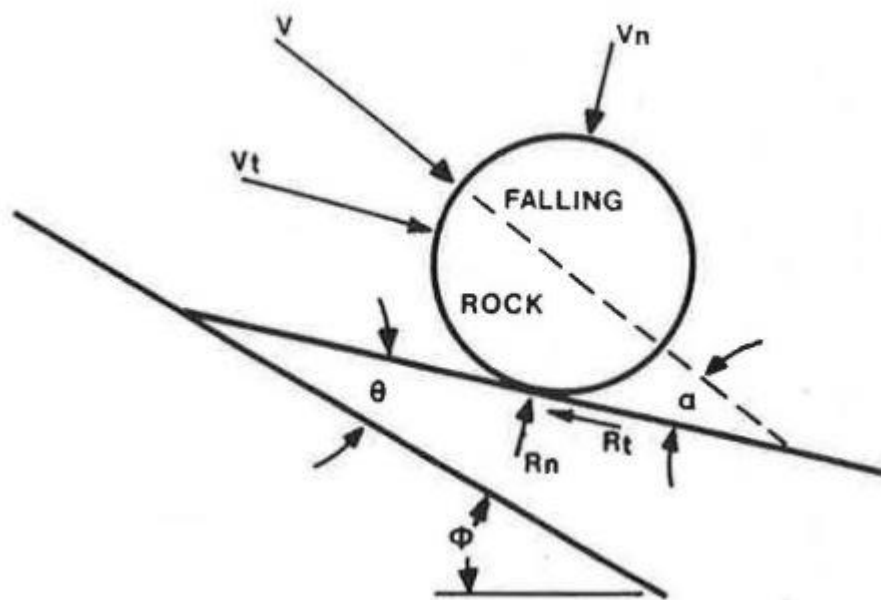


Figure 12. Paramètres physiques impliqués dans le rebond d'une chute de pierre : angle d'impact ( $\alpha$ ) défini par la trajectoire du bloc, angle de pente ( $\phi$ ), la variation de la pente ( $\theta$ ), vitesse normale à la pente ( $V_n$ ), vitesse tangentielle à la pente ( $V_t$ ), coefficient de restitution tangentielle à la pente ( $R_t$ ) et le coefficient de restitution normal à la pente ( $R_n$ ) (Pfeiffer et Higgins, 1990).

Le modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux de Falcetta (1985) est reconnu comme étant un des premiers modèles développés pour les trajectoires de chutes de pierres. Ce modèle suppose que le bloc est un corps rigide de masse solide, qui ne peut être fragmenté. Les données d'entrée requises sont la masse et la densité du bloc, ainsi que le profil de la pente composé de plusieurs segments droits connectés les uns aux autres. Une autre avancée notable développée par Falcetta (1985), qui a influencé de nombreux modèles ultérieurs, est la caractérisation des blocs rocheux comme un corps rigide (*rigid body*) et de forme ellipsoïdale de masse, plutôt qu'une masse concentrée en un seul point (*lumped mass*). Cela donne beaucoup plus d'importance à la forme du bloc et ajoute une variabilité de rebond réelle au modèle (Azzoni *et al.*, 1995).

Le modèle SASS (Bozzolo et Pamini, 1986) est un logiciel de simulation de chutes de blocs rocheux développé pour analyser le mouvement d'un seul bloc sur un plan incliné. Il calcule les effets des quatre phases de mouvement : le glissement, le roulement, le rebond et le vol libre. Pour tenir compte de son mouvement de rotation, le bloc est aussi mathématiquement défini comme un ellipsoïde de corps rigide. L'un des grands avantages du modèle SASS est que Bozzolo et Pamini (1986) ont réalisé leurs propres expériences de chutes de blocs en utilisant des séquences vidéo pour définir les équations physiques des quatre phases de mouvement.

Le Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP) (Pfeiffer et Higgins, 1990) a été développé pour estimer les hauteurs et les vitesses de rebond pour les chutes de pierres sur des pentes naturelles et artificielles. Ce modèle ressemble aux deux programmes de simulation précédemment mentionnés. Cependant, il est nettement plus avancé parce qu'il caractérise chaque segment de pente avec une estimation de la rugosité de la surface. Les coefficients de restitution utilisés dans ce modèle de simulation ont été déterminés à partir d'observations terrain et d'estimations de divers paramètres extraits de la littérature.

Le modèle mathématique CADMA (Azzoni *et al.*, 1995) simule le parcours des chutes de pierres sur un versant en 2D et est basé sur le modèle SASS de Bozzolo & Pamini (1987). Tout comme leurs prédécesseurs, Azzoni *et al.* (1995) ont utilisé des enregistrements vidéo

d'évènements de chutes de pierres sur le terrain pour mesurer les hauteurs de rebond, les vitesses de déplacement et les vitesses de rotation. Le modèle CADMA est peut-être considéré comme une amélioration du modèle SASS grâce à la plus fine calibration des coefficients de restitution et de friction à l'aide d'enregistrements vidéo de chutes de pierres de haute qualité. Les équations ont été calibrées pour différentes formes et tailles de blocs.

Finalement, RocFall (Stevens, 1998) est un modèle de simulation, en deux dimensions, qui se démarque pour la possibilité d'inclure des mesures de protection aux simulations pour calculer leur efficacité à réduire la propagation de chutes de pierre (Figure 13). RocFall fait partie de la suite d'outils géotechniques Rocscience et est encore beaucoup utilisé dans l'industrie minière, où les parois de roc sont coupées en forme simple et l'ajout de mesures de protection dans la simulation est simple (Stevens, 1998). Par exemple, la figure 13 présente comment un modèle en 2D, comme RocFall, peut servir à identifier et cartographier les zones exposées aux chutes de pierres. On peut cartographier la probabilité d'atteinte à chaque distance à l'aide de l'histogramme de fréquence de blocs arrêtés. La dernière version du logiciel, RocFall3, permet maintenant la simulation de trajectoires de chutes de pierre sur un MNT en 3D.

La plus grande lacune des modèles 2D est qu'ils ne tiennent pas compte de la possibilité que le bloc se déplace latéralement, en fonction de la topographie du versant (Crosta et Agliardi, 2004). Le progrès des outils informatiques, au tournant des années 2000, a permis le développement des modèles 3D, qui prennent en compte la dispersion latérale des trajectoires.

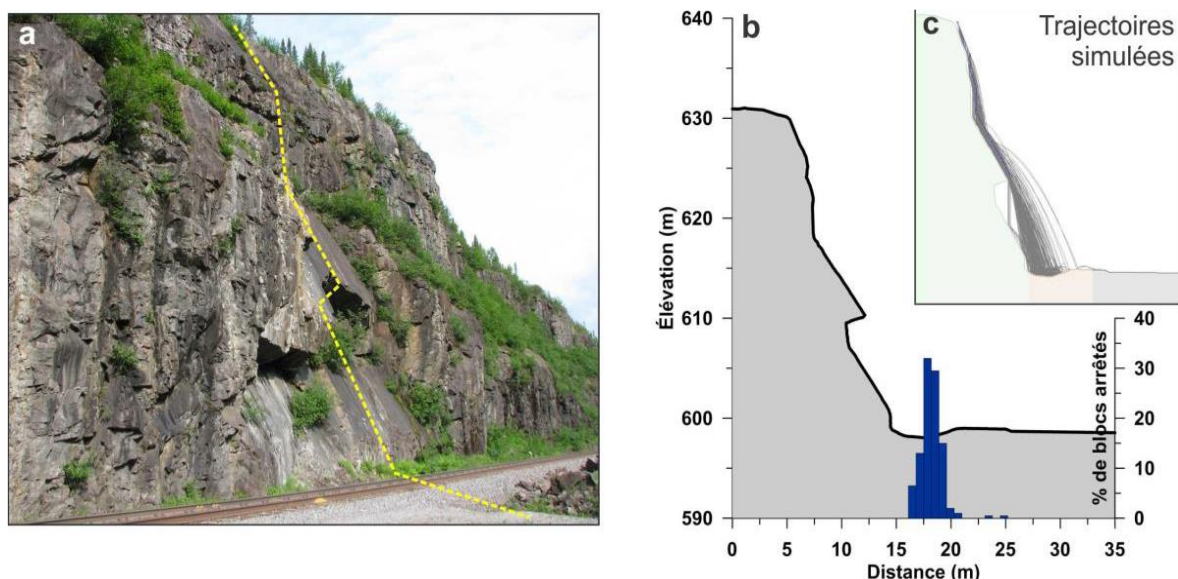


Figure 13. Exemple d'une simulation de trajectoire de chutes de pierre en 2D avec le modèle RocFall : a) le pointillé jaune représente le profil topographique de la paroi; b) le profil topographique numérique et un histogramme des positions d'arrêt et c) la trajectoire des blocs simulés (Cloutier et al., 2017).

### ***Simulations sur modèle numérique de terrain 3D***

Depuis le développement du premier modèle de simulation numérique en trois dimensions (3D) de Descoeudres et Zimmermann (1987), de nombreux modèles de simulation 3D différents ont été développés. Ces types de modélisations simulent les chutes de pierre sur des modèles numériques de terrain (matrice ou nuage de point) générée par un système informatique géographique (SIG). Les données d'entrée requises pour utiliser ces modèles peuvent être divisées en deux catégories : caractéristiques géométriques de la pente (topographie, zones de départ des chutes de pierres, position des obstacles, taille et forme des blocs) et les paramètres mécaniques qui sont associés à ses caractéristiques (coefficients de restitution et coefficient de friction) (Gigli *et al.*, 2014).

Au tournant des années 2000, Guzzetti et al. (2002) ont développé un programme informatique nommé STONE pour simuler la propagation de chutes de pierres. Il requiert un

modèle numérique de terrain (MNT) et de nombreuses autres couches matricielles utilisées pour décrire la position des cellules de départ des chutes de pierres et les types de sols correspondant à des coefficients de restitution et de friction prédéterminés. Afin de réduire l'incertitude des résultats et le temps de calcul, le bloc simulé dans STONE agit comme un *lumped mass* sans forme ni dimension. Lors de la propagation vers l'aval, les mouvements de chute libre, de roulement et de rebondissement du bloc de roc sont pris en compte. Il est important de noter que la direction de décrochement, les coefficients de restitution et les coefficients de friction sont tirés au hasard à partir de plages prédéfinies; ce qui permet d'introduire de la variabilité pour des approches Monte-Carlo. Cependant, un inconvénient est que le modèle ne prend pas en compte les arbres dans le talus (Guzzetti et al., 2002). Une version mise à jour de ce programme, nommée Hy-STONE, a été développée et permet aux utilisateurs de simuler les effets de dissipation de l'énergie cinétique causée par les impacts avec les arbres et les effets de la fragmentation sur la propagation des blocs en utilisant une approche probabiliste (Crosta *et al.*, 2006 ; Li et Lan, 2015).

Rockfall Analyst (Lan *et al.*, 2007) est un modèle de simulation des trajectoires de chutes de pierre en 3D intégré en tant qu'extension dans ArcGIS. Comme dans le modèle STONE, les blocs simulés sont également décrits comme des *lumped mass*, sans forme ni dimensions. Sept types de surfaces prédéfinies sont utilisées pour attribuer des valeurs aux paramètres mécaniques, dont les coefficients de restitution normaux et tangentiels, ainsi que le coefficient de friction, qui vont déterminer le comportement du bloc. Un avantage de ce modèle est la possibilité d'analyser statistiquement les résultats de simulations et de produire des cartes de fréquence spatiale des chutes de pierres directement dans ArcGIS. Un inconvénient de ce modèle de simulation est son incapacité à considérer l'effet de déviation de trajectoire d'un bloc après un impact avec un arbre.

RAMMS (Rapid Mass Movement System) est un logiciel qui peut simuler trois types d'aléas : les avalanches de neige, les coulées de débris et les chutes de pierres (Christen et al., 2012). Les simulations de chutes de pierres s'effectuent avec un modèle numérique de terrain (MNT). Le modèle représente la roche tombante comme un corps rigide en 3D qui

peut chuter, rouler, glisser et rebondir, mais ne peut pas être fragmentée. Les formes de blocs qui peuvent être simulées sont des cuboïdes, des polyèdres, des sphères et des roches réelles qui peuvent être numérisées en 3D par scanneur laser. De plus, les trajectoires individuelles peuvent être visualisées et exportées en 3D. Des cartes qui représentent statistiquement le nombre de roches passées par cellule, le nombre de roches déposées par cellule et leur potentiel de portée peuvent également être exportées (Christen et al., 2014). L'eau, les forêts et les marécages dans la zone de propagation sont représentés par des polygones qui ont une élévation distincte (m) et une valeur de traînée (kg/s) propre au type d'obstacle (Vo, 2015). Trois catégories de densités de forêt (faible, moyen et dense) ont été prédéfinies pour attribuer un coefficient de traînée représentatif à la dissipation d'énergie de chaque zone de forêt. La figure 14 montre comment la force de traînée ( $F_{df}$ ), qui est le produit du coefficient de traînée, agit contre la vitesse du bloc ( $V_S$ ) dans la couche de végétation ( $Z_h$ ) (Vo, 2015).

Rockyfor3D est un logiciel de simulation des trajectoires de chutes de pierres probabilistes de type Monte-Carlo (Dorren, 2016). Rockyfor3D simule la trajectoire de chutes de pierres sous forme de données vectorielles 3D en calculant des séquences de chute libre, de roulement et de rebond, ainsi que des impacts contre des arbres (Figure 15). Le bloc est considéré comme un *rigid body* lors de la simulation et le modèle utilise un mélange d'approches déterministes et probabilistes pour obtenir les résultats les plus représentatifs possibles. L'approche déterministe est utilisée pour les variables connues comme la topographie, les types de sols et la position des arbres. Cependant il utilise une approche stochastique pour les déviations latérales, la taille des obstacles rencontrés et le calcul des coefficients de restitution (Dorren, 2016).

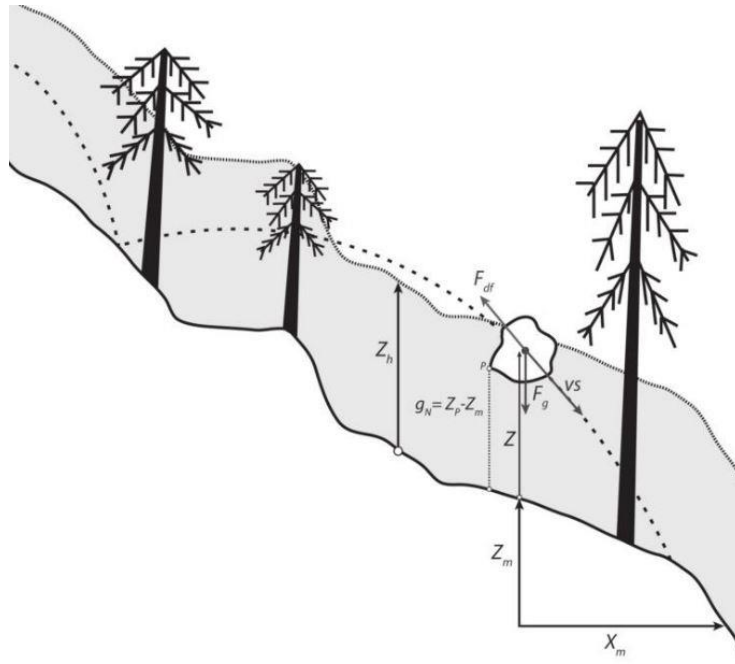


Figure 14. Illustration du calcul de traînée dû à la forêt dans RAMMS ::Rockfall (Vo, 2015).

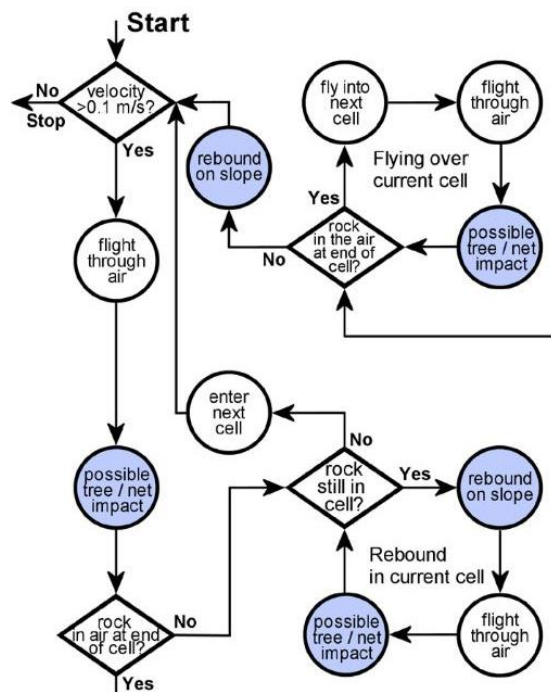


Figure 15. Organigramme des étapes de la simulation des trajectoires de chutes de pierres dans Rockyfor3D (Dorren, 2016).

Lors du décrochement du bloc, c'est la hauteur de la chute, la forme, la taille et la densité du bloc qui vont influencer sa vitesse initiale. Son comportement après le rebond sera dirigé par la topographie de la pente et les caractéristiques du sol. Rockyfor3D utilise les mêmes équations physiques que Pfeiffer et Bowen (CRSP 4), aussi utilisées par RocFall. Une différence importante entre ces modèles de simulation est que Rockyfor3D utilise quatre cartes pour décrire les caractéristiques mécaniques du terrain: les trois premières donnant les hauteurs moyennes d'obstacles (MOH) pour 70%, 20% et 10% de chaque cellule, et la quatrième qui renvoie de l'information le type de sol dans la cellule (Figure 16). Pour chaque cellule rencontrée par le bloc en mouvement, une hauteur moyenne d'obstacle est choisie au hasard, parmi les pourcentages déterminés par l'utilisateur, et est utilisée lors du calcul du coefficient tangentiel de restitution ( $R_t$ ). Sept types de sols différents existent dans Rockyfor3D et permettent au modèle d'attribuer un coefficient normal de restitution ( $R_n$ ) à chaque cellule.

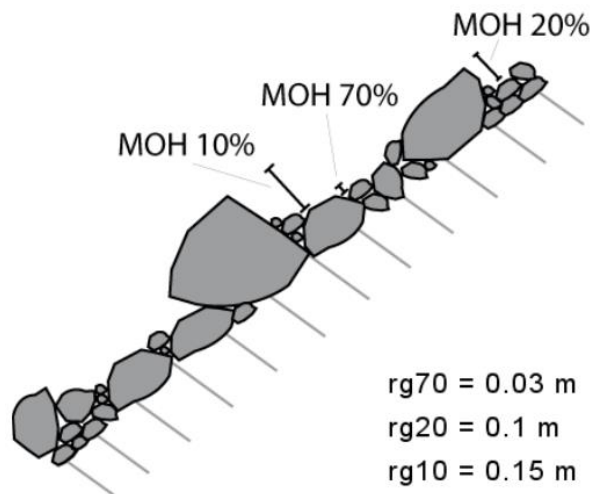


Figure 16. Description du MOH (hauteur moyenne d'obstacle) qui représente 70%, 20% et 10% de la surface d'un polygone homogène sur le terrain (Dorren, 2016).

À chaque impact avec le sol, le modèle Rockyfor3D permet au bloc de dévier latéralement de sa trajectoire initiale. Cette direction est calculée en fonction de la pente la plus abrupte autour de la cellule. L'ampleur de la déviation est déterminée à l'aide d'un angle aléatoire et de la vitesse de chute du bloc (Dorren, 2016). L'angle aléatoire est choisi parmi une probabilité décroissante de déviation varie entre  $0^\circ$  et  $55^\circ$  pour un rebond au sol (Figure 17). La vitesse du bloc et les probabilités prédéterminées, pour les 11 classes d'angle de déviation entre  $0^\circ$  et  $55^\circ$  ( $0-5^\circ$ ,  $5-10^\circ$ ,  $10-15^\circ$ , etc.), vont contrôler la déviation simulée.

Lorsqu'une pierre se propage vers le bas d'une pente, la présence d'arbres sur la trajectoire de la chute peut faire dévier son parcours (entre  $0^\circ$  et  $76^\circ$ ) et réduire la distance parcourue par la pierre en absorbant une partie de son énergie cinétique (Dorren et Seijmonsbergen, 2003). La capacité d'un arbre à atténuer l'énergie cinétique d'un bloc en mouvement dépend de son essence et de son diamètre (Dorren, 2016). L'outil Find INdividual Trees (FINT) permet de localiser la position des arbres individuels sur le talus, à partir de relevés de télédétection, pour les inclure dans Rockyfor3D lors des simulations de trajectoires de chutes de pierres (Dorren, 2012).

Un inconvénient de Rockyfor3D est l'absence du glissement comme mouvement possible. Le glissement se produit généralement au début ou à la fin d'une chute de bloc, mais reste important dans la modélisation de sa trajectoire (Dorren, 2016). Aussi, il n'est pas recommandé d'utiliser des MNT avec une résolution plus petite que  $2\text{m} \times 2\text{m}$  ce qui limite la perception des rugosités de terrain, bermes et fossés: ces éléments lissés agissent plutôt comme des tremplins dans les simulations (Lambert et al. 2013).

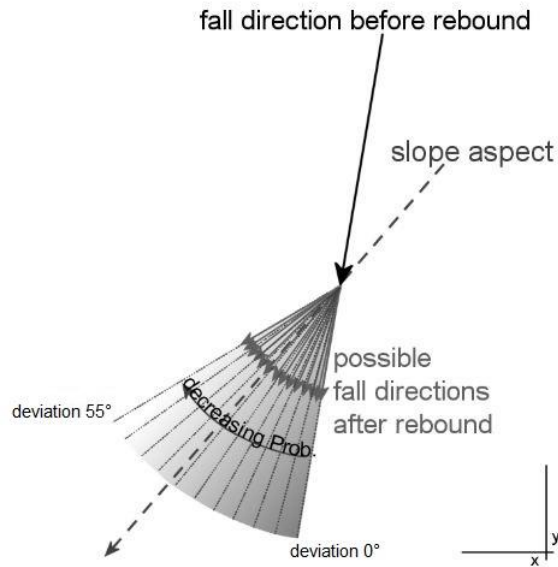


Figure 17. Représentation graphique du calcul de déviation latérale de la trajectoire de chute de pierre après un rebond en fonction de la direction de pente.

Récemment un nouveau modèle de simulation basé sur des nuages de points a été développé par Noël et al. (2021). *stnParabel* a été développé pour contourner la perte d'information topographique causée par le processus de transformation de l'information topographique en matrice (Figure 18) (Noël *et al.*, 2021). L'information perdue réduit généralement la rugosité naturelle du terrain qui est l'un des principaux obstacles à la propagation des blocs (Figure 18) et le nombre potentiel de cellules sources (paroi rocheuse) (Figure 19). Cette récente avancée permet d'améliorer la représentativité des simulations et limite les importants biais liés aux cellules sources. Mais, cette amélioration vient aussi avec un prolongement conséquent du temps de calcul et une réduction obligée de l'étendue spatiale des simulations (Noël *et al.*, 2021). *stnParabel* incorpore aussi plusieurs des modèles précédemment abordés; facilitant la comparaison des résultats de plusieurs approches différentes.

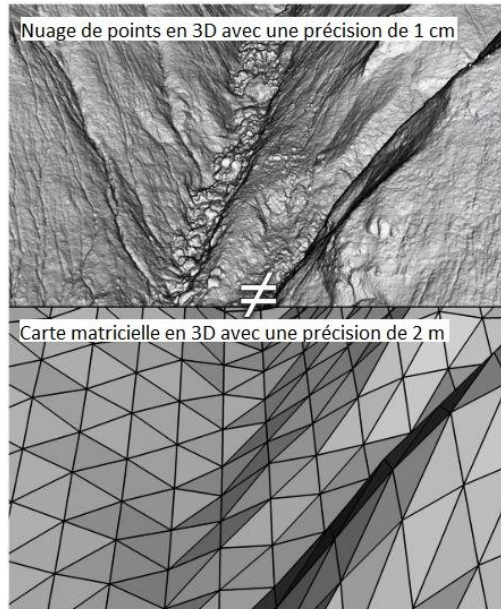


Figure 18. Deux types de représentations numériques du terrain (MNT) : en haut, un nuage de points produit avec des données de télédétection (LiDAR, photogrammétrie) et, en bas, le même nuage de points converti en matrice avec une résolution de 2 m adaptés à la simulation dans Rockyfor3D (Noël et al., 2021).

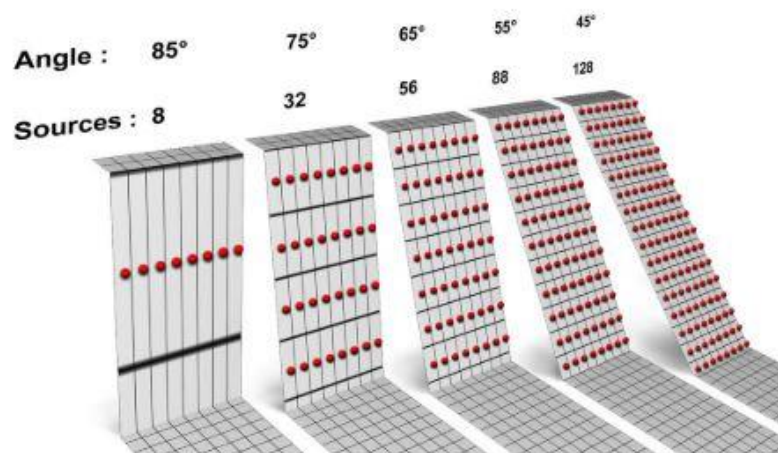


Figure 19. Perte de cellules sources dans le MNT pour les pentes plus raides (Noël *et al.*, 2021).

Les modèles de simulation 3D récents permettent d'aller plus loin dans l'analyse statistique des trajectoires et propagation des chutes de pierres. Les différentes cartes résultantes (p. ex. : probabilité de propagation, probabilité d'atteinte, nombres de blocs déposés, vitesse et énergie cinétique par cellule, hauteur de passage) permettent de cartographier les zones potentiellement exposées et le degré de danger de l'aléa, et d'évaluer l'efficacité des ouvrages de protection (Dorren, 2016). Le calcul de la probabilité d'atteinte ou de propagation, jumelé à de l'information sur la probabilité de rupture permet également de cartographier la probabilité d'occurrence (aléa) de chutes de pierres et éventuellement le degré de danger de chutes de pierres (Baillifard *et al.*, 2001 ; OFEV, 2016 ; Pasquier *et al.*, 2003 ; Pellicani *et al.*, 2016 ; Rouiller *et al.*, 1998). Le maintien d'un inventaire des événements de chutes de pierres peut aider à définir la probabilité d'occurrence. Toutefois, la calibration des modèles de simulation jouera toujours un rôle majeur sur la justesse des résultats et les indicateurs morphologiques demeurent et demeureront essentiels pour évaluer la représentativité des simulations (Copons et Vilaplana, 2008).

## **CHAPITRE 2**

### **DESCRIPTION ET CARACTERISATION DETAILLEE DU SITE D'ETUDE**

#### **2.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE**

Le site d'étude se trouve dans l'est du Québec, au Bas-Saint-Laurent, à l'extrémité ouest du Parc National du Bic (Figure 20). Le pic Champlain est le sommet d'un anticlinal dissymétrique et faillé, dont la face nord forme un escarpement rocheux qui s'étend sur trois kilomètres de long et les portions verticales s'élèvent jusqu'à 80 mètres de haut. La partie supérieure de la paroi est composée d'un conglomérat calcaire à grès quartzique qui agit comme une protection à l'érosion de la couche inférieure (Dionne, 1969 ; Gauthier *et al.*, 2023). Cette couche inférieure est composée d'un shale métamorphosé et riche en argile, qui ne semble pas propice au développement d'instabilités de grande magnitude (Gauthier *et al.*, 2023).

Des blocs rocheux de très grande taille (10 – 15 mètres de diamètre) se situent au pied du talus et nous indiquent que des événements de chutes de pierres de grande magnitude se sont produits dans le passé. Cependant, un talus fortement végétalisé se trouve au pied de la paroi et indique que les instabilités rocheuses de grande magnitude comme celles de 1967 ou 2017 se produisent peu fréquemment. Un tri granulométrique est observable du haut vers le bas du talus et nous a permis de diviser le talus en trois zones de rugosité du talus : grossier, modérément grossier et fin (Figure 21). Des habitations sur le Chemin de la Mer se trouvent au bas du talus d'éboulis qui s'est formé sous la paroi des Murailles (Figure 20).

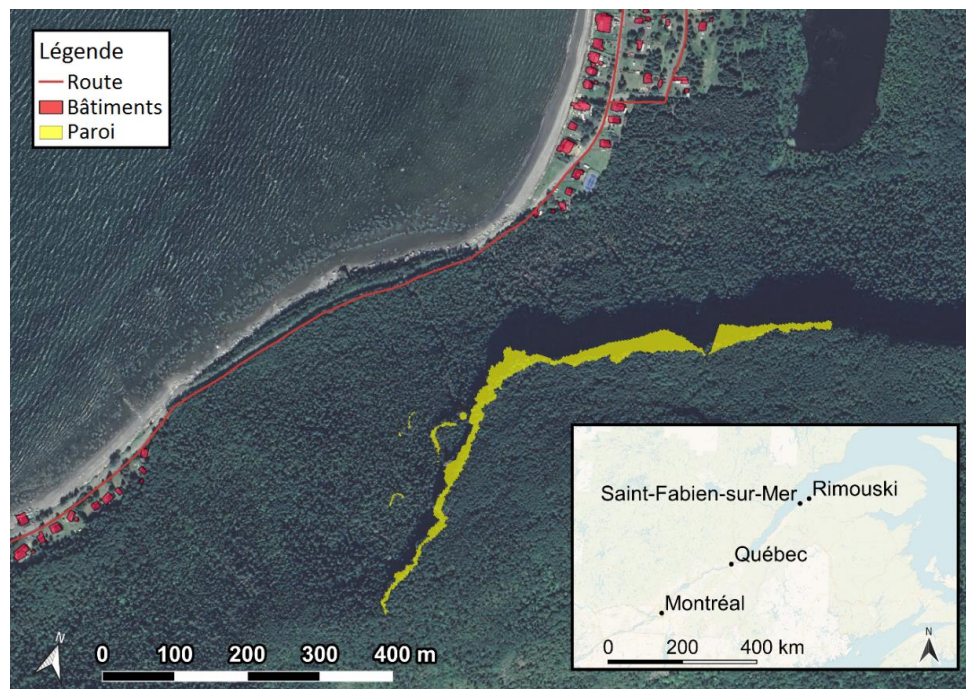


Figure 20. Localisation de la paroi des Murailles à Saint-Fabien-sur-Mer.

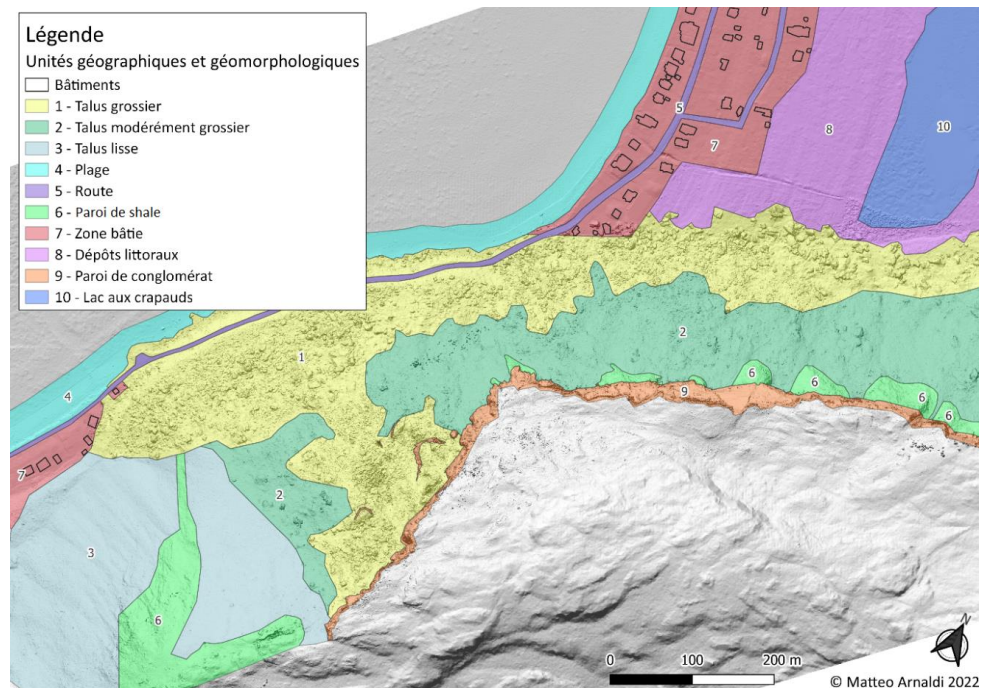


Figure 21. Carte des unités géographiques et géomorphologiques.

## 2.2 IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES BLOCS POTENTIELLEMENT INSTABLES

Afin de procéder à la simulation de trajectoires de chutes de pierres avec un logiciel tel Rockyfor3D, des données sur les zones sources doivent être recueillies. L'identification et la caractérisation des blocs potentiellement instables aident à comprendre la taille des blocs qui pourraient se détacher de la paroi.

### 2.2.1 Méthodes d'identification et de caractérisation

Dans un premier temps, l'identification des blocs potentiellement instables sur la paroi des Murailles à Saint-Fabien-sur-Mer a été effectuée en laboratoire, à l'aide d'outils de télédétection. Des photographies aériennes ont été capturées en hélicoptère en 2019 afin de produire une orthophotographie du talus (résolution 7,5 cm) qui a permis de caractériser le talus pour la simulation des trajectoires. En 2018, un vol de drone a permis d'acquérir un nuage de point LiDAR utilisé afin d'identifier et de caractériser les blocs potentiellement instables.

Les blocs potentiellement instables ont été sélectionnés en fonction de leur prédisposition géométrique et de l'ouverture, la persistance, l'espacement, l'orientation et le pendage des discontinuités qui les circonscrivent. Ces caractéristiques ont été déterminées dans le logiciel CloudCompare, qui facilite la visualisation et la manipulation des nuages de points. L'outil *Point Picker*, dans CloudCompare, a permis de mesurer l'espacement et la persistance entre les discontinuités lors de l'estimation de la taille des blocs potentiellement instables. L'outil *Facet/Fracture Detection* offre deux algorithmes ; *kd-tree* ou *Fast-Marching method*, et plusieurs possibilités de réglages afin d'extraire les structures planaires des nuages de points (Dewez *et al.*, 2016). L'algorithme *kd-tree* a été utilisé pour définir l'orientation et le pendage des structures planaires et le mode de rupture probable.

Au total, environ une dizaine de jours ont été passés sur la paroi à valider et caractériser les blocs potentiellement instables. Avec un ruban à mesurer, nous avons manuellement

validé certaines dimensions des blocs identifiées en laboratoire (Figure 22). L'orientation et le pendage de certains plans de rupture probables ont été vérifiés avec une boussole Brunton.

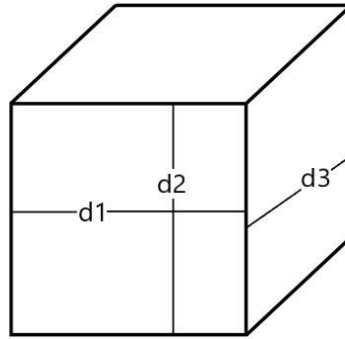


Figure 22. Définition des axes des blocs de roche lors de la mesure des dimensions pour le Tableau 1.

### 2.2.2 Identification et caractérisation des blocs

Cette sous-section décrit les blocs de la paroi des Murailles qui ont été identifiés comme étant potentiellement instables. Ces blocs se démarquent par leur prédisposition à la rupture ou leur volume important. La paroi a été divisée en deux secteurs ; un à l'est et l'autre à l'ouest (Figure 23). Les photographies aériennes du relevé de 2018 sont utilisées pour créer une mosaïque de chacun des deux secteurs de la paroi.



Figure 23. Secteurs est et ouest de la paroi des Murailles (Neumeier, UQAR).

#### ***Secteur est***

Au total, 19 blocs ont été identifiés comme instables dans le secteur est de l'escarpement rocheux. Le bloc 1 se situe à l'extrême est de la zone d'étude prioritaire (Figure 23). Il a une forme cuboïde, comme la majorité des blocs sur la paroi (Figure 24). Le volume du bloc a été estimé à environ  $243 \text{ m}^3$  et nous avons identifié le mode de rupture potentielle comme étant un glissement (Tableau 1). Une fracture partiellement ouverte, du côté est du bloc 1, est caractérisée par un écoulement d'eau qui pourrait accélérer le développement graduel de l'instabilité (Figure 24). Les blocs 2 et 3 forment ensemble un des surplombs les plus imposants de toute la paroi des Murailles (Figure 25). Au plus long, la partie horizontale du surplomb atteint environ 10 mètres de profondeur. Le volume combiné des blocs 2 et 3

est estimé à environ 2900 m<sup>3</sup> (Tableau 1). Une fissure de tension est aussi présente au-dessus de la masse. Cette prédisposition structurelle pourrait causer une chute de grande magnitude si la rupture a lieu. Les blocs 4 et 5 forment ensemble une masse volumineuse (~1300 m<sup>3</sup>) qui pourrait glisser de la paroi (Figure 26). Le bloc 5 est plus fracturé que la majorité des autres blocs de cette section et des traces d'écoulement d'eau sont évidentes (Tableau 1). Le bloc 4 a une forme cuboïde et sa masse repose au-dessus du bloc 5. Le bloc 7 a un volume similaire que le bloc 6 (~145 m<sup>3</sup>), mais est coincé dans un dièdre (Figure 26). Le mode de rupture potentiel pour les blocs 6 et 7 est le glissement.

Les blocs 8, 9, 10 et 11 se retrouvent au milieu du secteur est et circonscrivent la cicatrice de 1967 (Figure 25). L'espace vide entre ces masses constitue la cicatrice de l'évènement de 1967, qui est estimé à 2800 m<sup>3</sup> (Gauthier *et al.*, 2023). Le plan de glissement laissé par cet évènement permet d'identifier le mode de rupture potentiel des blocs 8 à 11. La rupture du bloc 11 déstabiliserait certainement les blocs 9 et 10, et pourrait entraîner la rupture d'une masse avec un volume total de plus de 3000 m<sup>3</sup> (Tableau 1 et Figure 30). Le bloc 8 a un volume estimé à 3200 m<sup>3</sup> et pourrait, lui aussi, être divisé en trois blocs comme les blocs 9, 10 et 11 (Figure 29) (Tableau 1). Cependant, les fissures dans le bloc 8 sont moins ouvertes, moins persistantes et semblent moins affectées par les déformations. Le talus sous ces blocs a été dénudé d'arbres après l'évènement de 1967 et sa longue trace linéaire est toujours visible dans le couvert forestier.

Les blocs 12 à 19 sont situés directement au-dessus des habitations et infrastructures de Saint-Fabien-sur-Mer. Le bloc 12 a une forme quasi cubique et a un volume estimé à 18 m<sup>3</sup> (Tableau 1 et Figure 30). Un système racinaire se développe dans la fissure entre le bloc et la paroi ; ce qui représente un potentiel facteur de développement de l'instabilité. Le bloc 13 semble être assis sur le bloc 14 pour former une masse de 340 m<sup>3</sup> qui se prépare à une rupture en glissement de pied de colonne (Tableau 1 et Figure 30). Le bloc 14 se démarque par son haut niveau de fracturation et la présence de traces d'écoulement d'eau et de dépôts calcaires. Le bloc 15 est une écaille de roche avec un volume de 38 m<sup>3</sup> (Tableau 1 et Figure 31). Cette écaille est coincée dans une large fissure remplie de terre et de végétation. Les

blocs 16 et 17 ont une forme tabulaire et font partie de la strate supérieure de la paroi (Figure 31). Le volume du bloc 16 est de  $8 \text{ m}^3$ , et de  $430 \text{ m}^3$  pour le bloc 17 (Tableau 1). La masse 17 se distingue par sa forme d'arche, d'environ 3m de profondeur, au-dessus du vide. L'ouverture et la persistance des fissures observées sur le terrain laissent croire que le décrochement de la masse rocheuse 17 entraînerait une fragmentation certaine de celle-ci, ce qui réduirait le volume individuel des blocs. Le bloc 18 est partiellement détaché de la paroi et en forme de colonne triangulaire (Figure 32). Son basculement pourrait être causé par une rupture de pied de colonne (Tableau 1). La superficie du bloc 19 est impressionnante ( $140 \text{ m}^2$ ), mais son épaisseur ne dépasse pas 1,5 mètre (Figure 32 et Tableau 1). Aucune fissure ouverte n'a été observée sur le terrain autour du bloc 19.

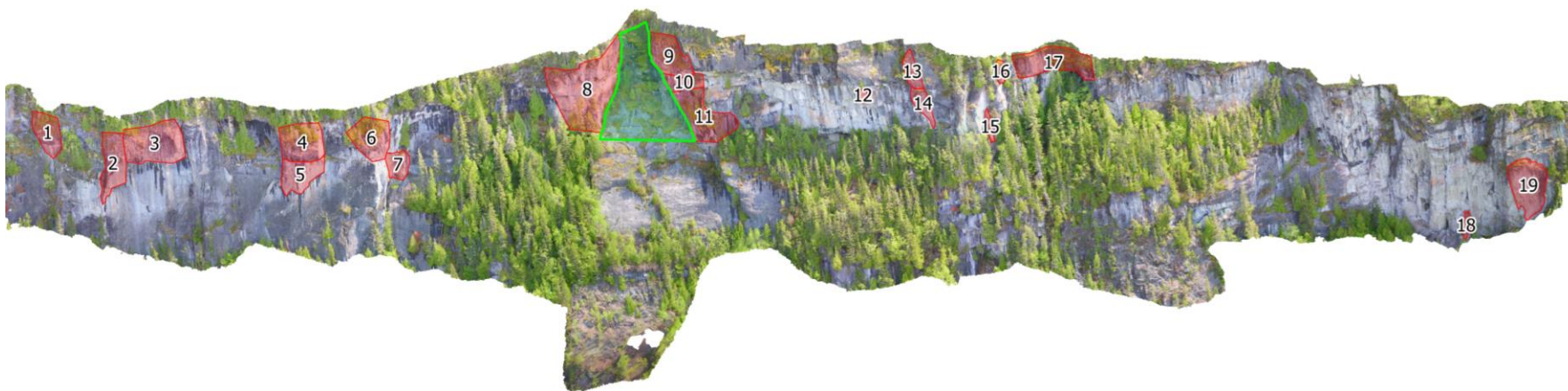


Figure 24. Vue d'ensemble de la paroi secteur est, de la cicatrice de l'évènement de 1967 (en vert) et identification des blocs potentiellement instables de 1 à 19 (en rouge).

Tableau 1. Mesures des caractéristiques des blocs 1 à 19

| # du bloc | d1 (m) | d2 (m) | d3 (m) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Orientation/Pendage (°) |               | Orientation/Pendage (°) | Mode de rupture potentiel |
|-----------|--------|--------|--------|--------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------------------|
|           |        |        |        |                          | Glissement              | Basculement   |                         |                           |
| 1         | 6      | 9      | 4.5    | 243                      | 325-335/55-65           | —             | —                       | Glissement                |
| 2         | 21.5   | 3      | 5      | 323                      | —                       | —             | 275-335/75-85           | Chute                     |
| 3         | 15     | 19     | 9      | 2565                     | —                       | —             | 335/65-85               | Chute                     |
| 4         | 10     | 8.5    | 6      | 510                      | —                       | —             | 335-345/65-85           | Chute                     |
| 5         | 11     | 12     | 6      | 792                      | —                       | —             | 335-345/65-85           | Chute                     |
| 6         | 8.5    | 8.5    | 2      | 145                      | 315-345/65-85           | —             | —                       | Glissement                |
| 7         | 5.5    | 9      | 3      | 149                      | 315-345/65-75           | —             | —                       | Glissement                |
| 8         | 20     | 20     | 8      | 3200                     | 325-345/55-75           | —             | —                       | Glissement                |
| 9         | 12     | 11     | 9      | 1188                     | 325-345/55-76           | —             | —                       | Glissement                |
| 10        | 5      | 5.5    | 9      | 594                      | 325-345/55-77           | —             | —                       | Glissement                |
| 11        | 15     | 17     | 5      | 1275                     | 325-345/55-78           | —             | —                       | Glissement                |
| 12        | 1.5    | 4      | 3      | 18                       | —                       | —             | 155-175/75-85           | Chute                     |
| 13        | 3.5    | 11     | 3.5    | 135                      | 315-335/65-85           | —             | —                       | Glissement                |
| 14        | 6.5    | 9      | 3.5    | 205                      | 315-335/65-86           | —             | —                       | Glissement                |
| 15        | 2.5    | 10     | 1.5    | 38                       | 325-345/65-87           | —             | —                       | Glissement                |
| 16        | 1      | 5.5    | 1.5    | 8                        | —                       | —             | 275-305/85              | Chute                     |
| 17        | 21.5   | 8      | 2.5    | 430                      | —                       | —             | 95-125/85               | Chute                     |
| 18        | 2      | 8      | 1.5    | 24                       | 335/35-65               | 165/85        | —                       | Basculement               |
| 19        | 10     | 14     | 1.5    | 210                      | 335/45-75               | 135-175/75-85 | —                       | Basculement               |

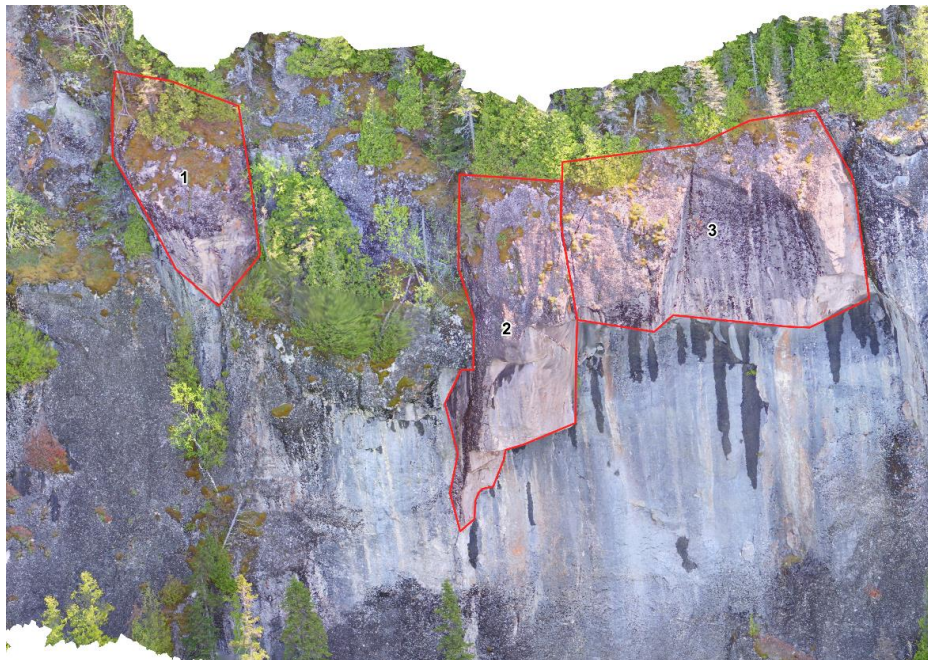


Figure 25. Blocs 1, 2 et 3 dans le secteur est de la paroi.



Figure 26. Blocs 2 et 3 vus du Chemin de la Mer (Crédit photo MTQ, 2019).



Figure 27. Blocs 4, 5, 6 et 7 dans le secteur est de la paroi.



Figure 28. Bloc 8 dans le secteur est de la paroi.



Figure 29. Blocs 9, 10 et 11 dans le secteur est de la paroi.

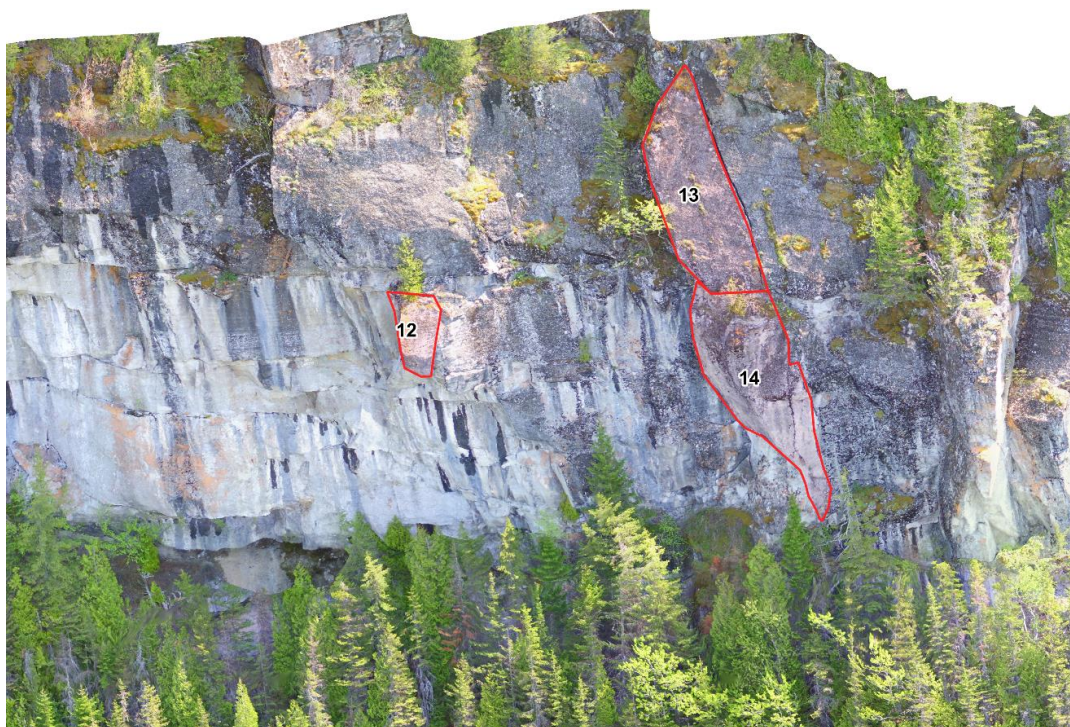


Figure 30. Blocs 12, 13 à 14 dans le secteur est de la paroi



Figure 31. Blocs 15, 16 et 17 dans le secteur est de la paroi.



Figure 32. Blocs 18 et 19 dans le secteur est de la paroi.

### ***Secteur ouest***

Le secteur ouest de la paroi contient moins de blocs jugés « potentiellement instables » que le secteur est (7 contre 19). En revanche, l'entièreté de ce secteur se trouve au-dessus du Chemin de la Mer. Le talus du secteur ouest de la paroi comprend plusieurs piliers complètement détachés de la paroi, comme le bloc 20, qui semblent penchés vers le bas du talus et où on peut apercevoir des masses en surplomb (Figures 34, 35 et 36). Nos mesures, acquises à l'aide du nuage de points et ensuite validées sur la paroi, estiment le volume du bloc 20 comme étant supérieur à  $3300 \text{ m}^3$  (Tableau 2). Cependant, des discontinuités évidentes sur ce bloc laissent présager que s'il se décrochait, il se diviserait en un minimum de trois masses (Figures 34 et 35). Les blocs 21 et 22 sont des écailles en forme de disque qui ne dépasse pas  $0,5 \text{ m}$  d'épaisseur. L'ouverture des discontinuités entre ces écailles et la paroi dépasse  $5 \text{ cm}$  (Tableau 2 et Figure 34). Ces deux blocs risquent de basculer si le haut du bloc continue à s'éloigner de la paroi. Le bloc 23 est une colonne détachée de l'escarpement, qui se démarque par sa hauteur imposante ( $\sim 17 \text{ m}$ ) (Tableau 2). Un bloc cliquet (bloc 24), relativement petit ( $\sim 1 \text{ m}^3$ ), est coincé entre la colonne du bloc 23 et la paroi

(Figure 36). Le bloc 25 a une forme tabulaire, un volume d'environ  $50 \text{ m}^3$  et se démarque par l'ouverture très large ( $> 5 \text{ cm}$ ) des fractures qui le délimite et pour la force des ponts de roche qui l'empêchent de chuter de la paroi quasi verticale (Figure 36 et Tableau 2) (Wyllie et Mah, 2004). Finalement, le bloc 26 a une forme quasi cubique, un volume de  $2 \text{ m}^3$  et repose sur une pente inclinée à  $\sim 35^\circ$  vers le talus (glissement potentiellement) (Figure 36 et Tableau 2).

L'évènement de chute de pierre de 2017, qui a déposé un bloc de  $27 \text{ m}^3$  sur le Chemin de Mer Est, a été causé par le détachement d'un bloc d'un des piliers détachés de la paroi (Figure 37 et 38). Certains de ceux-ci ont été cartographiés et visités lors des sorties terrain. En raison de la forte végétation dans cette section, les mesures de volume et de pendage et d'orientation n'ont pas été mesurées à partir du nuage de points, cependant ils seront considérés comme des zones sources dans les simulations.

L'identification et la caractérisation des blocs potentiellement instables sur la paroi démontrent qu'on retrouve plus de gros blocs ( $> 500 \text{ m}^3$ ) dans le secteur est que ouest. Le volume moyen des blocs du secteur est (1 à 19) s'élève à  $634 \text{ m}^3$ . D'après les pendages mesurés, la majorité de ces blocs se prépare à glisser de l'escarpement. Dans le secteur ouest de la paroi, quatre blocs sur sept ont un volume inférieur à  $5 \text{ m}^3$ . Cependant, le volume moyen des blocs du secteur ouest (20 à 26) est de  $539 \text{ m}^3$  à cause de la taille massive du bloc 20 ( $3300 \text{ m}^3$ ). Contrairement au secteur est, les modes de rupture potentiels sont surtout la chute et le basculement.

Grâce aux informations recueillies en laboratoire et validées sur le terrain, au sujet de la forme des blocs sur la paroi, on peut constater que la majorité de ceux-ci est cuboïde. Leur forme est le résultat des angles droits à l'intersection des jeux de discontinuités et de l'espacement de ces discontinuités. La taille des blocs est estimée d'après la persistance des discontinuités. L'identification et la caractérisation des blocs aperçus sur la paroi nous ont aidés à justifier la forme et la taille choisie pour les simulations dans le prochain chapitre.



Figure 33. Vue d'ensemble de la paroi secteur ouest et identification des blocs potentiellement instables # 20 à 26

Tableau 2. Mesures des caractéristiques des blocs 20 à 26

| # du bloc | d1 (m) | d2 (m) | d3 (m) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Orientation/Pendage (°)<br>Glissement | Orientation/Pendage (°)<br>Basculement | Orientation/Pendage (°)<br>Chute | Mode de rupture<br>potentiel |
|-----------|--------|--------|--------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 20        | 22     | 30     | 5      | 3300                     | —                                     | 95-115/75-85                           | —                                | Basculement                  |
| 21        | 2      | 4      | 0.5    | 4                        | —                                     | —                                      | 285-295/75-85                    | Chute                        |
| 22        | 2      | 5      | 0.5    | 5                        | —                                     | —                                      | 285-295/75-85                    | Chute                        |
| 23        | 6      | 17     | 4      | 408                      | —                                     | 305/85                                 | —                                | Basculement                  |
| 24        | 1      | 1      | 1      | 1                        | —                                     | —                                      | 355-005/75-85                    | Chute                        |
| 25        | 4      | 5      | 2.5    | 50                       | —                                     | —                                      | 355-005/75-85                    | Chute                        |
| 26        | 2      | 1      | 1      | 2                        | 335/35                                | —                                      | —                                | Glissement                   |



Figure 34. Blocs 20, 21 et 22 du secteur ouest de la paroi.

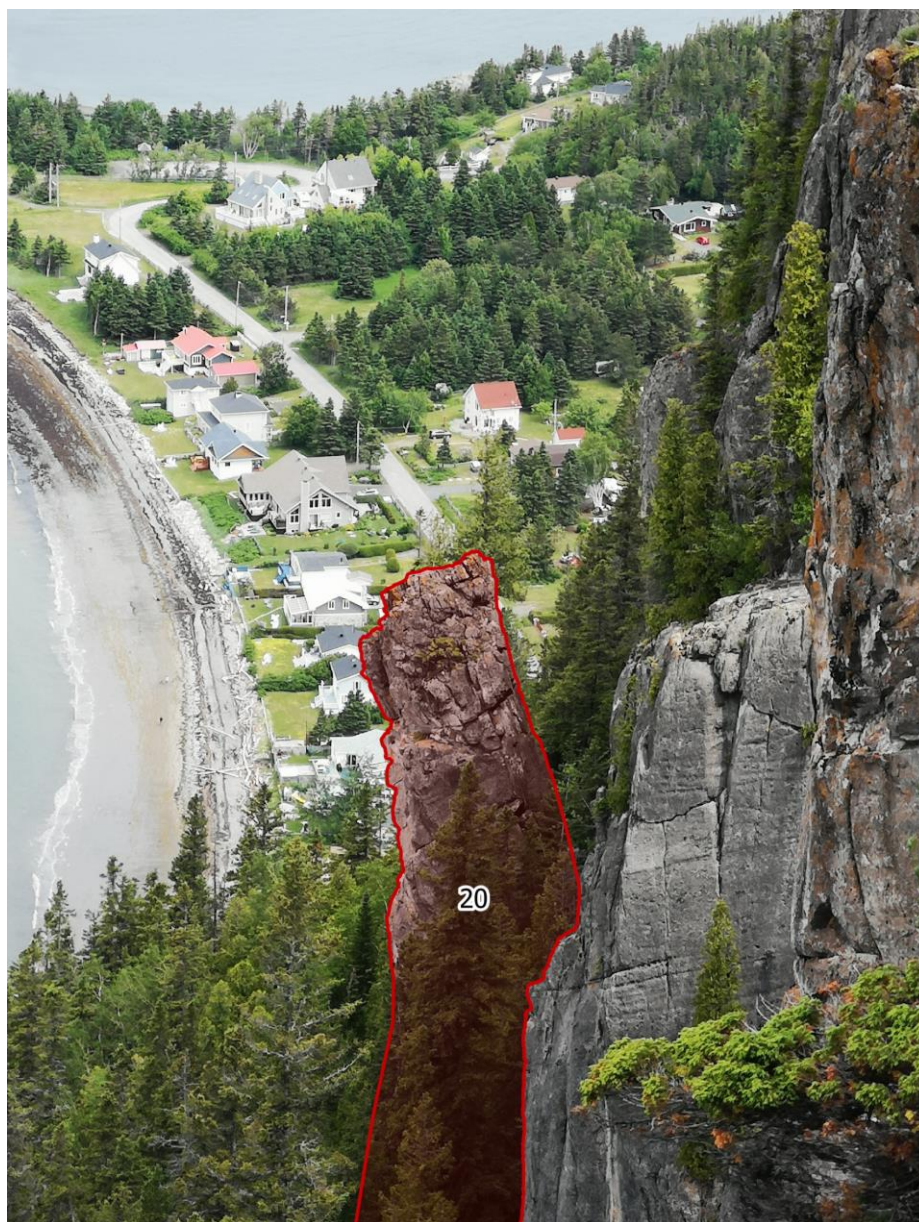


Figure 35. La colonne détachée du bloc 20 du secteur ouest de la paroi. La photo a été prise à partir du bloc 23.



Figure 36. Blocs 23, 24, 25 et 26 du secteur ouest de la paroi.

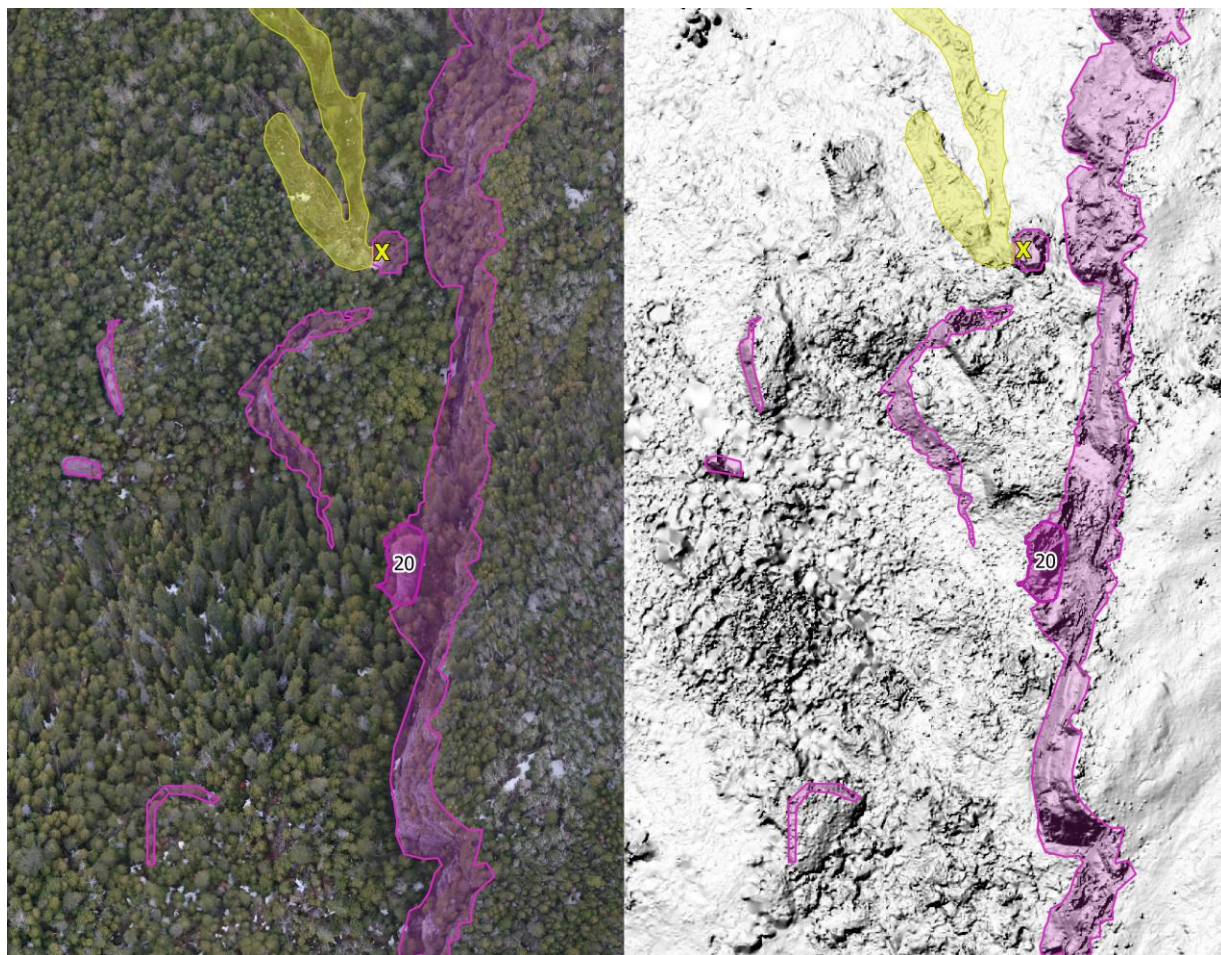


Figure 37. Visualisation des piliers détachés de la paroi potentiellement instable (en mauve) et du bloc 20. La carte de fond à gauche est l'orthophoto produite à partir du relevé héliporté d'octobre 2019, et la carte de fond à droite est le relief ombré à partir de la mosaïque 3D. Le X jaune représente le lieu de départ de l'évènement de 2017, tandis que le polygone jaune est la cicatrice laissée par sa trajectoire.

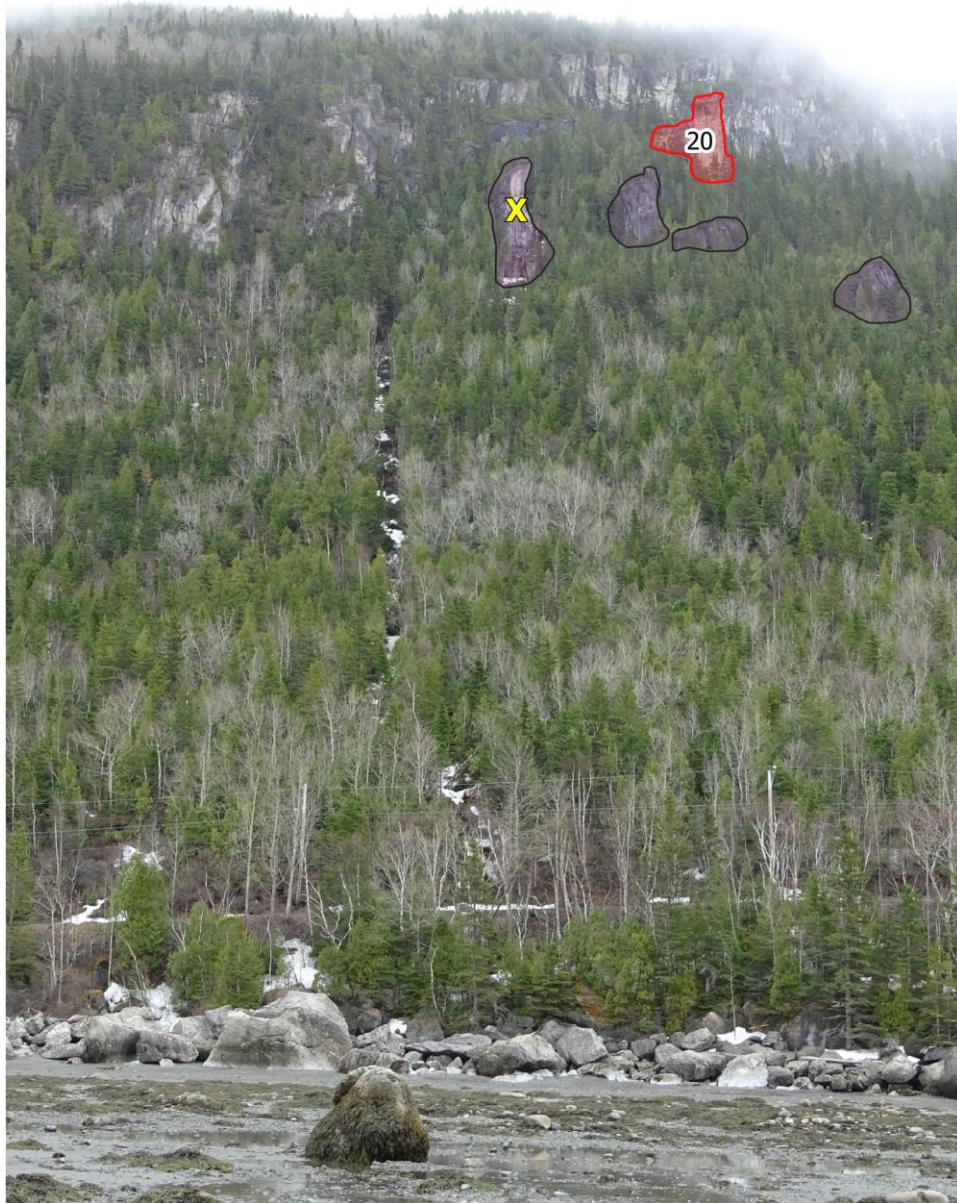


Figure 38. Identification des piliers détachés (en mauve) et du bloc 20 (en rouge) vu de la plage. Le X jaune représente la position de départ du bloc qui s'est détaché lors de l'évènement de 2017. On peut aussi voir le corridor dénudé d'arbres par le passage du bloc de 2017. (MTQ, 2018)

## CHAPITRE 3

### USING ROCKYFOR3D TO MAP THE ZONES POTENTIALLY EXPOSED TO ROCKFALLS IN SAINT-FABIEN-SUR-MER, QUEBEC (CANADA)

#### 3.1 INTRODUCTION

Rockfall is a major natural hazard that occurs in mountainous regions all over the world. Rockfall events are known to cause damage to public roadways, power lines and personal property (Evans et Hungr, 1993 ; Volkwein *et al.*, 2011). Despite the low probability of being directly hit by rockfall, these events can even cause death (Badoux *et al.*, 2016 ; Bunce *et al.*, 1997 ; Chau *et al.*, 2003). Imposing cliffs on the north face of the Pic Champlain escarpment, also known as Les Murailles, in Bic National Park overlook the eastern portion of the village. Two significant rockfall events have been reported in Saint-Fabien-sur-Mer. The first, in August of 1967, saw the detachment and sliding of a very large rock mass ( $\sim 2800 \text{ m}^3$ ) that left debris covering the talus slope below (Figure 39) (Gauthier *et al.*, 2023). The causes of that rock failure are still unknown and one of the rock blocks, measuring over 4 meters in diameter, apparently travelled all the way to the beach (Dionne, 1969). The second rockfall event happened in November of 2017, after several days of intense wind and rain with temperatures around  $0^\circ\text{C}$ . The rock mass, estimated at  $90 \text{ m}^3$ , separated from a larger rock pillar and sent a  $27 \text{ m}^3$  block to land on the Chemin de la Mer down below (Figure 40). Numerous properties, and the road that leads to them, are potentially exposed to falling rocks from the cliffs of the Pic Champlain. Some mapping is necessary in order to update the land use plans, recommend zoning bylaws and manage construction permits.

Traditional rockfall hazard mapping requires knowledge of geomorphological parameters such as the runout distance, reach angle (or energy line angle) and the propagation zone (scree slope and outlying boulder zones) (Heim, 1932 ; Hungr et al., 1999 ; Keylock et Domaas, 1999 ; Stock et al., 2014). With the development of computer modelling in the last 25 years, new software has been developed to simulate rockfall propagation. Some of the most sophisticated simulation programs, like Rockyfor3D and RAMMS:Rockfall, work in GIS-based 3D environments to predict zones with a potential exposure to rockfalls (Caviezel et al., 2019 ; Dorren, 2016 ; Noël et al., 2021). Such simulation programs need proper and representative input data. The inaccurate setting of the rockfall simulation models' parameters can lead to the over or under estimation of the

rockfall propagation distances, which can have consequences on the proposed rockfall hazard map. It is therefore important to calibrate the input maps with an abundance of field visits and by validating the simulation results.

The purpose of this study is to use Rockyfor3D to propose a zone potentially exposed to rockfalls in Saint-Fabien-sur-Mer. The results generated by a Rockyfor3D simulation are raster maps that describe the value of different variables in each cell. In fact, 23 raster maps are produced to describe variables ranging from the minimum trajectory time to the minimum energy angle for each cell. Some, such as kinetic energy values and passing heights in each cell, can be used to plan rockfall mitigation structures. The probability of reaching a cell and the number of blocks deposited per cell are recommended to “delineate realistic rockfall runout zones” (Dorren, 2016). Rockyfor3D reach probability results have been used most frequently to map rockfall hazard zones (AGS, 2007 ; Dorren *et al.*, retracted preprint ; Mazengarb *et al.*, 2015 ; Nordang, 2017 ; Walberg, 2013). Bédard’s 2019 study used the number of passages per cell and the number of blocks deposited to propose rockfall limit lines in Saint-Fabien-sur-Mer. It is noteworthy to mention that the talus surface roughness values were underestimated, and that the effect of trees was not considered in her simulations; potentially leading to an overestimation of rockfall distances.

The propagation limit lines are mapped using results from the Rockyfor3 trajectory simulation results. As a means to test the sensitivity of the model, the effects of different surface roughness values and soil types are analyzed for different block volumes. The effect of trees on simulated trajectories for different block volumes are also compared. Finally, evaluating the simulation results helps choose the most representative output to draw the propagation limit lines of the zone potentially exposed to rockfall.

### **3.2 STUDY SITE**

The study site is in Eastern Canada, approximately 15 kilometers west of Rimouski, along the shores of the Saint-Lawrence River (Figure 41). The Murailles escarpment is an asymmetrical and faulted anticline composed of clay-rich metamorphosed sedimentary rock at the bottom and a limestone-rich conglomerate on top (Dionne, 1969). The fault escarpment reaches up to 80 meters in height, 3 kilometers in length and is located on the northern face of the Pic Champlain. The talus slope below the cliff is steep and heavily forested. Large boulders, up to 10 meters in diameter,

have been deposited at the base of the talus slope by previous major rockfall events, such as the one that occurred in 1967 (Figure 39).

Several homes, part of the town of Saint-Fabien-sur-Mer, are located just below the talus slope in the large boulder deposition zone. The road connecting this neighborhood to the rest of Saint-Fabien-sur-Mer traverses the talus slope, under the western portion of the cliff, for over 500 meters. The 2017 rockfall event (Figure 40), which brought a boulder to block the road, supports the idea that the road is dangerously exposed. In addition to the private property and public road that can be impacted by rockfalls; power lines are potentially at risk of being damaged by falling rocks.

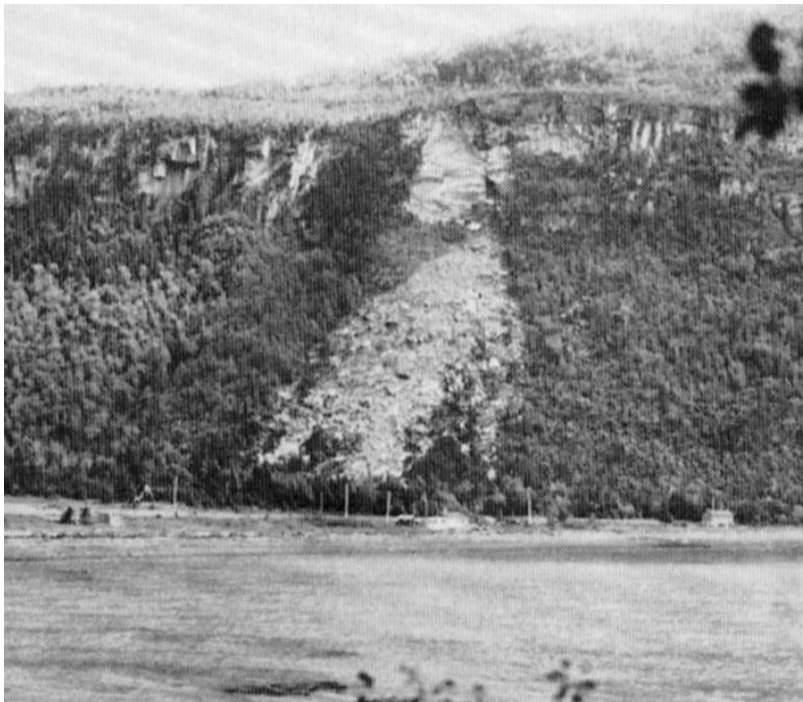


Figure 39. Deposit left behind by the 1967 rockfall event (Dionne, 1969).



Figure 40. A block, with a volume of  $27 \text{ m}^3$ , landed on the Chemin de la Mer in Saint-Fabien-sur-Mer, after the 2017 rockfall event (unknown source, TVA Nouvelles, 2017).

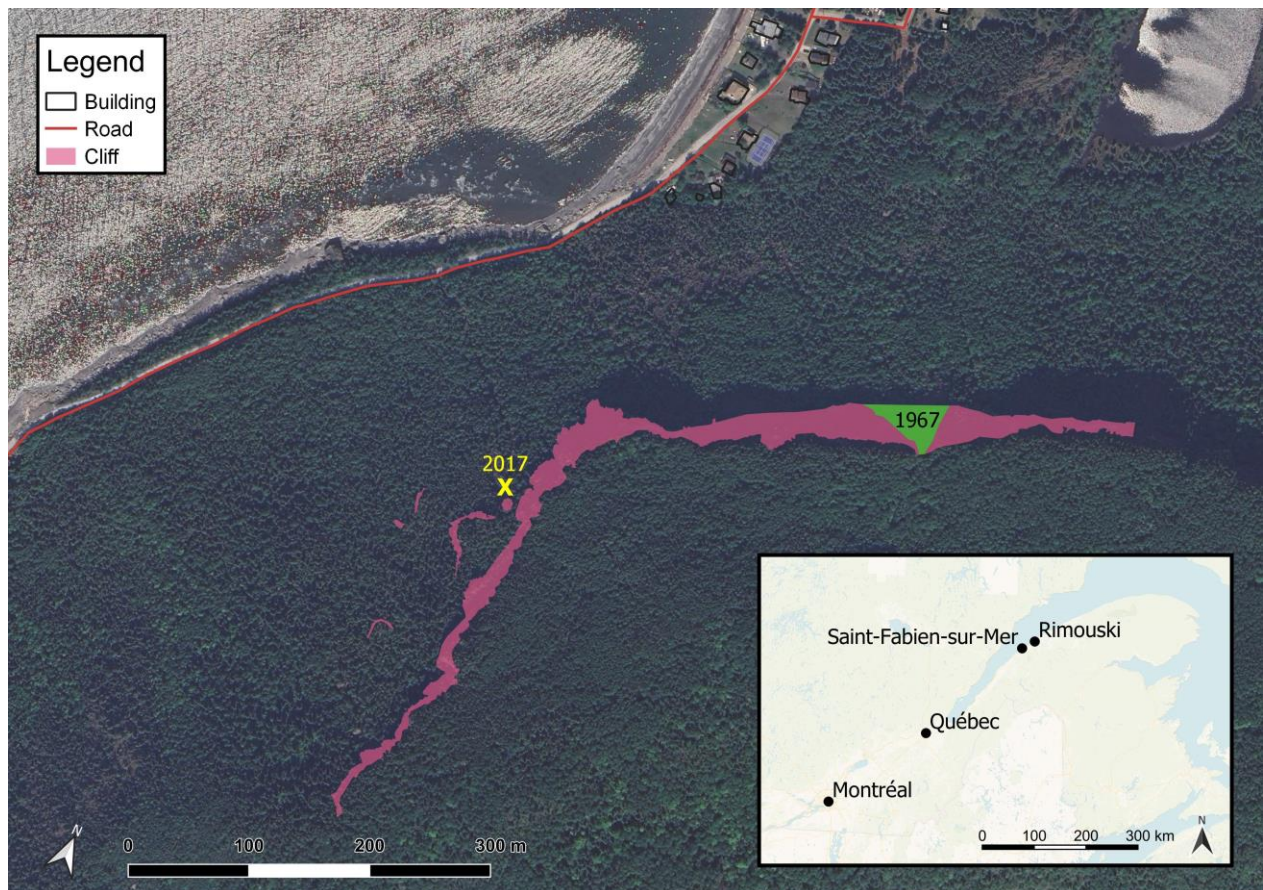


Figure 41. Map of the Murailles rock escarpment in Saint-Fabien-sur-Mer. The green polygon represents the starting position of the 1967 rockfall event and the yellow X: the 2017 event.

### 3.3 METHODOLOGY

The Monte-Carlo-based rockfall simulation model used in this study is Rockyfor3D (Dorren, 2016), which is a probabilistic, process-based rockfall model simulating trajectories of individual blocks in a three-dimensional GIS space. It uses numerous raster maps to describe the topography, obstacles (slope roughness and trees) and mechanical properties (ground's elasticity) of the slope. The simulation results will be used to map propagation limit lines and to propose a zone potentially exposed to rockfalls. Other popular alternatives do exist, such as RocFall and RAMMSS::ROCKFALL and stnParabel. Rockyfor3D was chosen here because it was estimated to be more precise than RocFall, cheaper than RAMMSS::ROCKFALL and faster to compute than stnParabel. It has been calibrated and validated on different types of slopes in many different countries (Dorren *et al.*, retracted preprint ; Marija *et al.*, 2022 ; Mazengarb *et al.*, 2015 ; Noël *et al.*, 2023a ; Nordang, 2017 ; Vo, 2015 ; Walberg, 2013).

#### 3.3.1 Production of input raster maps

The general strategy for producing the input raster maps was to do as much as possible in the computer lab, using high-quality remote sensing data, before going out on the field and validating the data. The following subchapters describe the steps which led to the production and validation of the required raster maps. These include the digital elevation model, the slope surface roughness, the soil types, the position of the rockfall source zones and the characteristics of the forest on the slope. However, no raster maps were created to describe the simulated rock blocks' densities, dimensions and shapes because they were entered manually in the software's interface.

##### 3.3.1.1 Digital elevation model

To describe the landscape on which the rockfall is simulated, a digital elevation model (DEM) is used as the foundation for the simulation slope. To create the most precise DEM possible, three sets of lidar data were acquired, cleaned and merged together. These lidar datasets (point cloud) were obtained on three different occasions; first in 2013 by airplane (1 m resolution), and then during the summer of 2018 by drone (0.2 m resolution). Finally, a third LiDAR survey was

performed during the fall of 2019 by helicopter (0.15 m resolution). The 2013 and 2019 lidar surveys focused on scanning the cliff and talus slope from above. Some parts of the cliff, such as overhangs, are not visible when scanning from above. For that reason, the 2018 survey aims at the cliff horizontally and diagonally. Before being merged to create one final point cloud (Figure 42a), the three datasets were cleaned with the “filter by value” tool in CloudCompare, which separates the ground points from the non-ground points (vegetation and noise). Some manual cleaning was also performed in order to conserve a maximum of information on the topography. The final point cloud was then converted to two raster maps in ArcGIS. The first is a DEM with a resolution of 0.25 m, which was used to identify the obstacle heights and cliff limit lines (Figure 42b). The second is also a DEM, but with a 2 m raster cell resolution (Figure 42c), as recommended to run simulations in Rockyfor3D (2016). An orthomosaic of aerial photos (resolution 0,075 m) was captured during the 2019 helicopter LiDAR survey and used to help identify the position of the source zones, the geomorphological units, the types of soil, the buildings and trees.

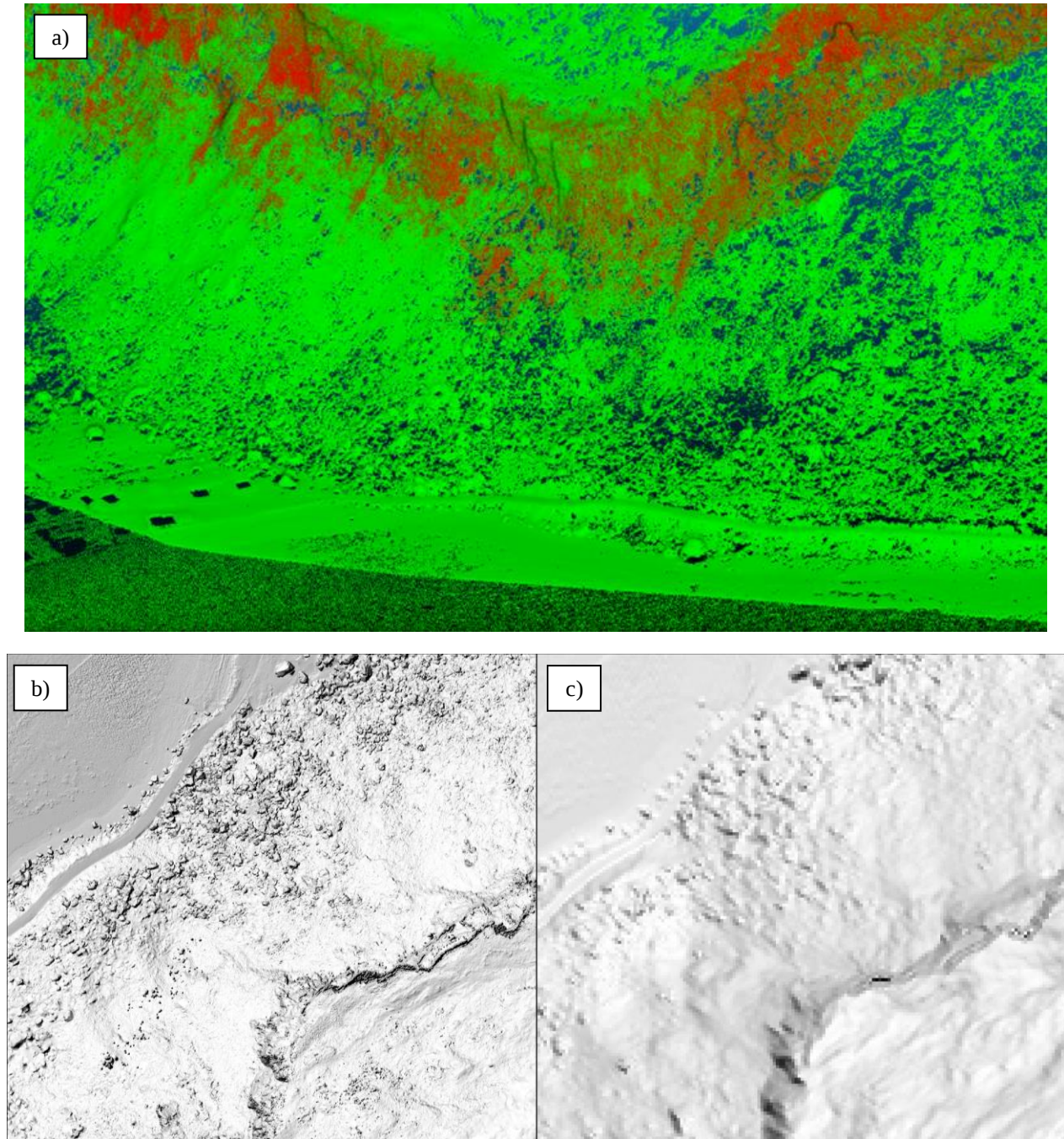


Figure 42. a) The result of the merging of the three LiDAR surveys used to produce the two DEMs (b and c). The dark green point cloud at the bottom is from the 2013 survey, the red point cloud on the cliff is from the 2018 drone survey and the light green point cloud is a mesh of the 2019 survey. b) Hillshade of the 0.25 m DEM, and c) Hillshade of the 2 m DEM, used in the Rockyfor3D simulations.

### 3.3.1.2 Surface roughness

The slope surface roughness raster maps are used to describe the heights of the obstacles that can be found on the talus slope. Previously deposited rocks can act as obstacles which can affect the trajectory of a falling block and Rockyfor3D is very sensitive to this parameter (Dorren, 2016). The obstacle heights do not affect the model's topography. In fact, surface roughness is linked to the tangential coefficient of restitution and is “just a parameter determining energy loss during a rebound on the surface” (Dorren, 2016). Three separate maps are created to describe the mean obstacle heights (MOH), looking in the downward direction of the slope, for 70%, 20% and 10% of the rebound cases per cell. These three raster maps are respectively named *rg70*, *rg20* and *rg10*.

The division of the talus slope into polygons of similar roughness characteristics was performed in QGIS (Figure 43a). By visualizing a hillshade from the 0.25 m resolution DEM and the mosaic of 2019 aerial photos; obstacles on the talus slope were identified on the map. Their heights were obtained by calculating the difference of DEM elevation from the top of the obstacle to the ground upslope (Figure 43b). A total of 545 obstacle heights were recorded, in every polygon of the study site. The 70%, 20% and 10% mean obstacles heights were calculated with a weighted average of these recorded elevation differences.

A detailed field data sheet is included in the Rockyfor3D manual to help collect and verify the talus slope characteristics. With a focus on obtaining the most precise simulations results, a field validation strategy was implemented. The boundaries of the similar surface roughness polygons characteristics, and the obstacle heights for each polygon were verified using a validation point method. To do so, the deposition zone was first divided into four validation quadrants (north, south, east and west). A systematic sampling strategy was used by randomly choosing two polygons, from those of similar roughness characteristics, in each quadrant (for a total of eight polygons). In each of these polygons, a specific validation point was saved as a GPS waypoint in each corner of the selected polygon (Figure 43a). Approximately 6 obstacle heights were measured in a 5-meter radius around the GPS waypoints. In addition to the waypoints in the systematically chosen polygons, random waypoints were surveyed to reinforce the validation. These additional waypoints were in polygons that had not been systematically selected in the previous step.

In each validation quadrant, the systematically selected polygons were chosen to have a variety of obstacle heights with the aim of having a more representative simulation terrain. Some of the additional validation waypoints, outside of the systematically selected polygons, were chosen for their position in zones of very low or very high surface roughness. The field validation data was then compared to the data initially calculated on QGIS and necessary adjustments were made to the *rg70*, *rg20* and *rg10* raster maps.

A previous study used Rockyfor3D simulations to determine zones potentially exposed to rockfalls in Saint-Fabien-sur-Mer. Figure 44 shows the boundary lines and corresponding values for the surface roughness and soil type polygons inspired by those used in Audrey Bédard's study (Bédard, 2019). The obstacle heights in this map are lower because Bédard only had access to the lower resolution 2013 LiDAR survey and because she had little time for an extensive field validation campaign. The 2013 airplane-based LiDAR survey was cleaned by a very aggressive algorithm that eliminated the roughness created by big blocks and had a smoothing effect on the talus slope.

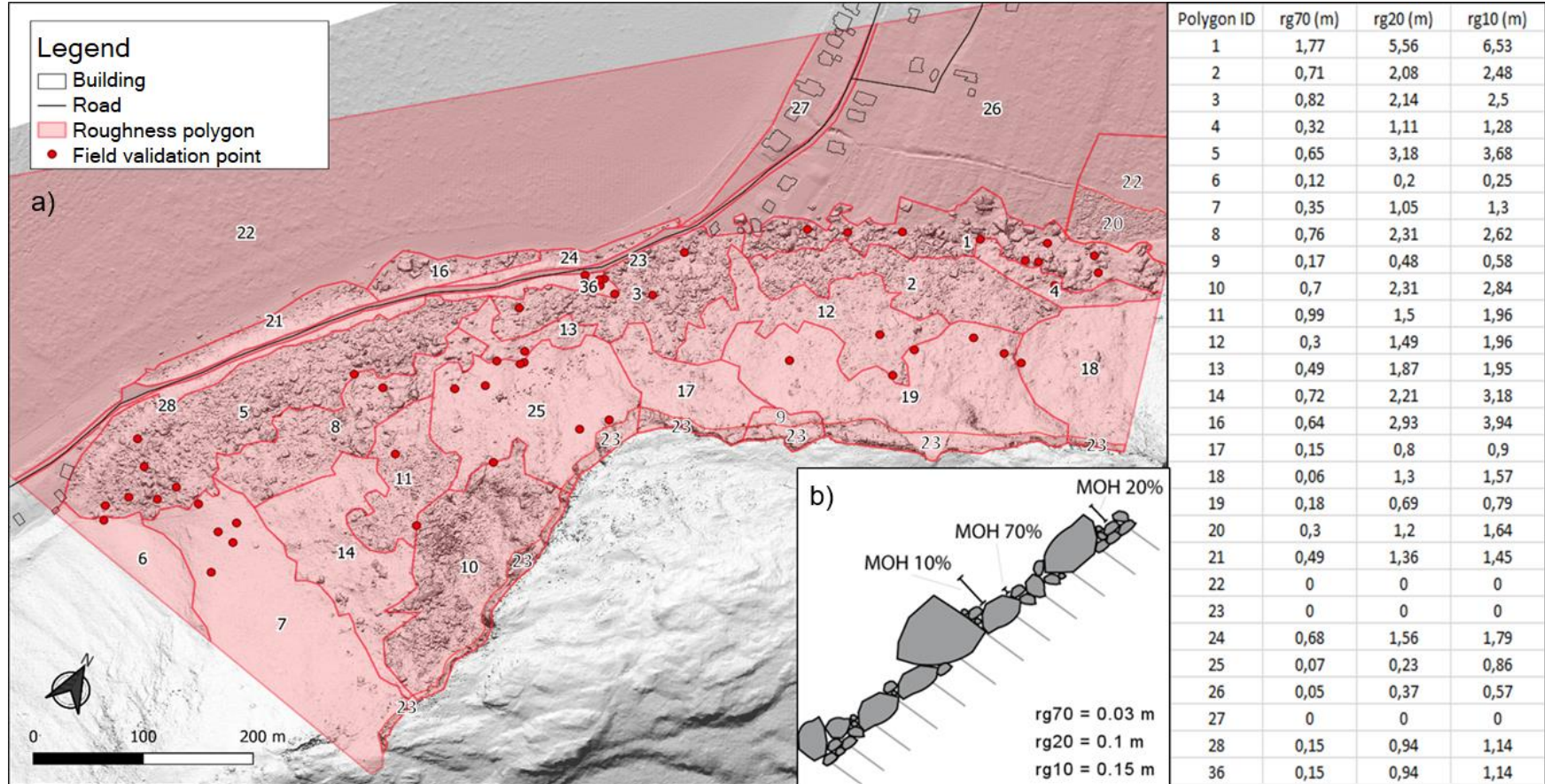


Figure 43. a) Field validation points (red dots) and their position within the roughness polygons (red lines). b) In Rockyfor3D, surface roughness is defined by the mean obstacle height (MOH) and a 70%, 20% and 10% probability height was calculated for each polygon (Dorren, 2016).

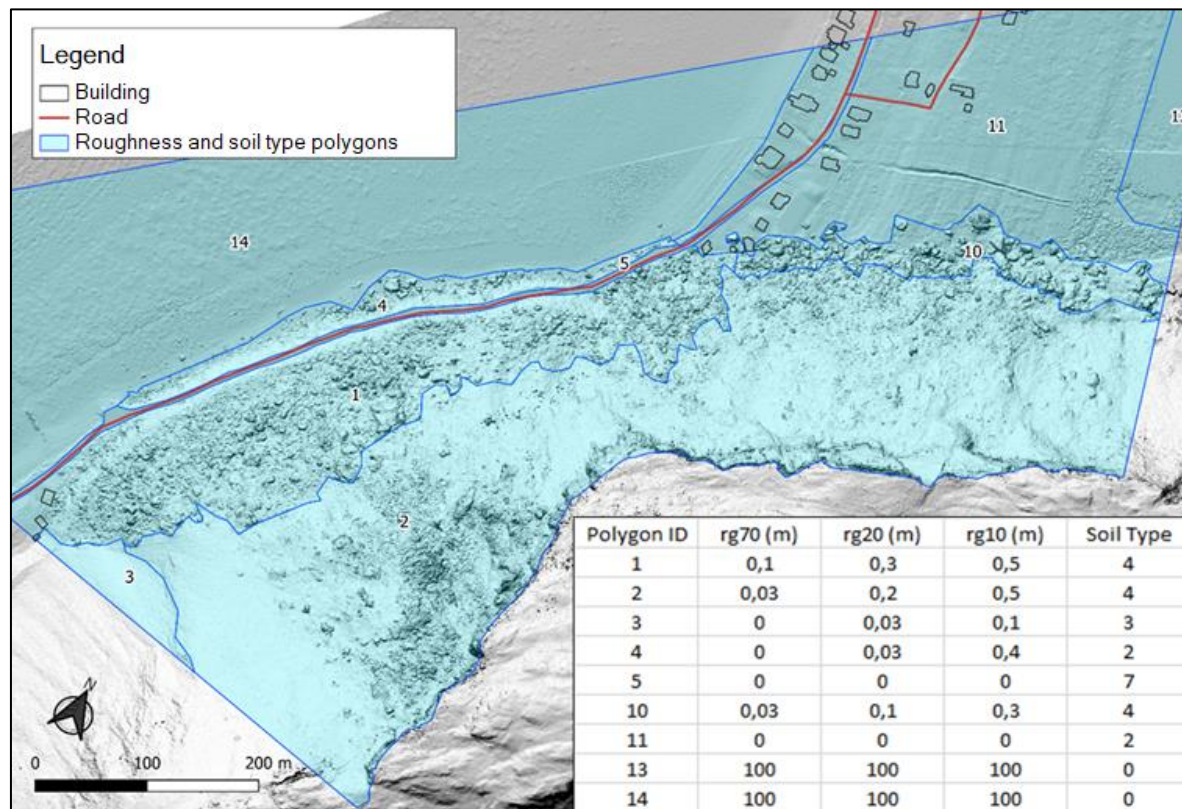


Figure 44. Map of the polygons that delimit the zones of similar surface roughness and soil type, according to the data used in Bédard, 2019, on the 0.25 m resolution hillshade.

### 3.3.1.3 Soil type

Each raster cell was also attributed one of the eight Rockyfor3D predetermined soil types to represent the ground's elasticity (Table 3). While the surface roughness is linked to the tangential coefficient of restitution, the soil type affects the normal coefficient of restitution in the rebound calculation. The 2019 orthomosaic was very helpful when drawing polygons of similar soil types in QGIS. In the field, the soil type was described at each of the validation waypoints for measuring obstacle heights.

The soil type polygons are presented in Figure 45 over the 0.25 m hillshade background. The bodies of water, including the Anse-à-Mercier, at the left of the map, and the Lac à Crapauds, at the right, were identified as soil type 0. The type 1 soil zone refers to the deposition of a thick layer (depth > 1 m) of organic material that has turned into a very soft soil. The second soil type is found

in some of the steepest parts of the talus, where the fine soil and organic material layer is present but thinner (depth < 1 m). Soil type 3 refers to a zone of smaller rock fragments ( $\varnothing < \sim 10$  cm) mixed with medium compact soil. On the study site, soil type 3 is present in the lower portion of the western part of the talus, where shale fragments are blended into the soil. The geologic nature of the inferior shale slope makes it that the rock fragments deposited in this zone do not exceed 10 cm in diameter. In the other talus zones (soil type 4), the conglomerate rocks blocks exceed 10 cm in diameter. The rockfall source zones, including the main cliff and detached pillars, are identified as bedrock (soil type 6). Finally, the asphalted road is described as soil type 7.

Table 3. Predetermined soil types for Rockyfor3D characterization of the talus slope. The  $R_n$  values correspond to the normal coefficient of restitution (Dorren, 2016).

| Soiltype | General description of the underground                                                                | mean $R_n$ value | $R_n$ value range |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------|
| 0        | River, or swamp, or material in which a rock could penetrate completely                               | 0                | 0                 |
| 1        | Fine soil material (depth > $\sim 100$ cm)                                                            | 0.23             | 0.21 - 0.25       |
| 2        | Fine soil material (depth < $\sim 100$ cm), or sand/gravel mix in the valley                          | 0.28             | 0.25 - 0.31       |
| 3        | Scree ( $\varnothing < \sim 10$ cm), or medium compact soil with small rock fragments, or forest road | 0.33             | 0.30 - 0.36       |
| 4        | Talus slope ( $\varnothing > \sim 10$ cm), or compact soil with large rock fragments                  | 0.38             | 0.34 - 0.42       |
| 5        | Bedrock with thin weathered material or soil cover                                                    | 0.43             | 0.39 - 0.47       |
| 6        | Bedrock                                                                                               | 0.53             | 0.48 - 0.58       |
| 7        | Asphalt road                                                                                          | 0.35             | 0.32 - 0.39       |

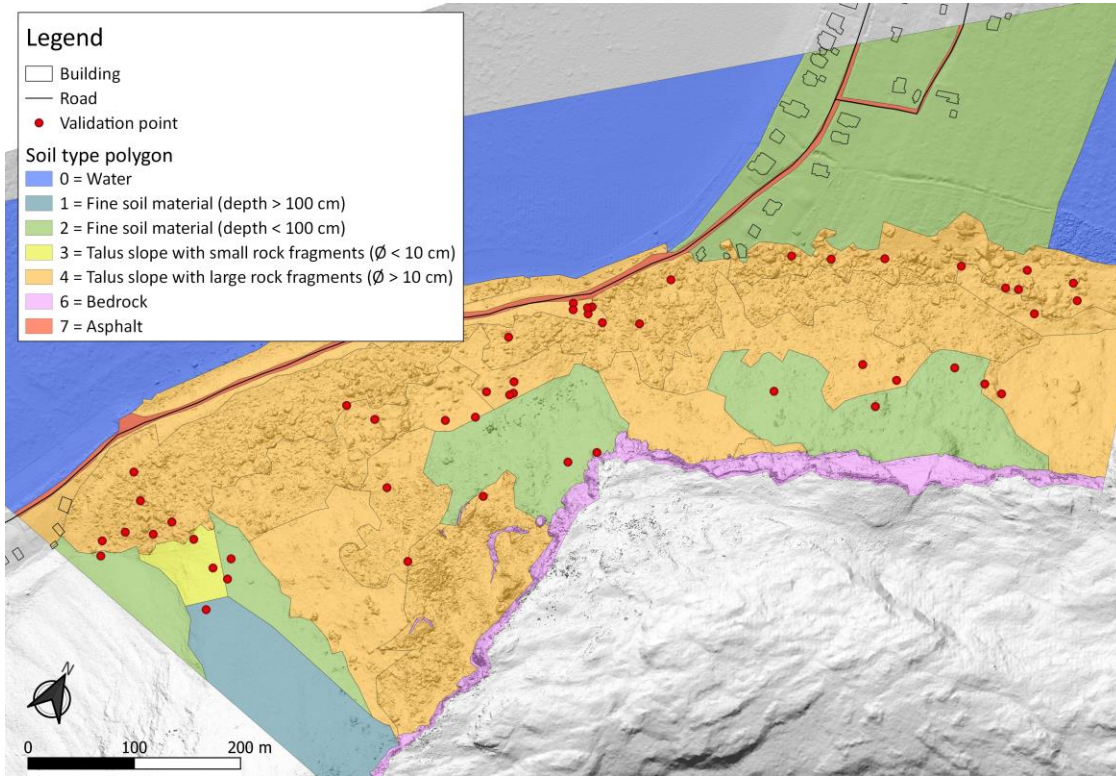


Figure 45. Soil type polygons used in this study and the validation points that were visited on the field.

#### 3.3.1.4 Forest characteristics

In order to integrate the forest data to Rockyfor3D, a tree position file (treefile) and a coniferous percentage raster map are needed. The treefile was produced using the *Find Individual Trees* (FINT) tool (Figure 46). It is used alongside Rockyfor3D to identify the position, height and diameter at breast height of every tree on the slope. To do so, two rasters are uploaded to FINT; a digital elevation model (DEM) and a normalized surface model (NSM). The software subtracts the DEM from the NSM, to obtain an estimated height for each tree. An estimated diameter at breast height is calculated as a function of the tree height. The diameter at breast height and tree species determine the amount of energy dissipated by a tree (Dorren, 2016). The default FINT settings

were used in this step to produce a treefile that adequately represents the study site's forest. The resulting treefile was then opened in QGIS and compared with the 2019 mosaic to see if the density is representative. The treefile was also cleaned manually in order to remove the erroneous trees found all over the study site.

The coniferous percentage raster map was produced in QGIS to inform Rockyfor3D on which tree types are present in the study site's forest. This is an important step because broad-leaved and coniferous trees dissipate rockfall energy differently (Dorren, 2016). By visualizing the high-resolution (0.075m) aerial photos from October 2019, it was possible to draw polygons regrouping areas of similar forest types (Figure 47). At that time of the year, the leaves had fallen out of the broad-leaved trees and makes it easy to differentiate with the green conifers. Each polygon was given one of the following estimated percentages of coniferous trees: 10%, 25%, 50%, 75%, 90% or 100%. Only the scar left by the 2017 rockfall event was noted as having 0% coniferous trees because vegetation is still absent since the event.

Finally, the treefile and coniferous percentage raster map were validated during field visits. The diameter and tree type (either coniferous or broad-leaved) were recorded for about 6 to 10 trees around 3 meters of each waypoint. A total of 44 validation waypoints were recorded all over the talus slope. In the field, the tree diameters at breast height were compared to the estimated diameters generated by the treefile, and the tree type was also recorded.

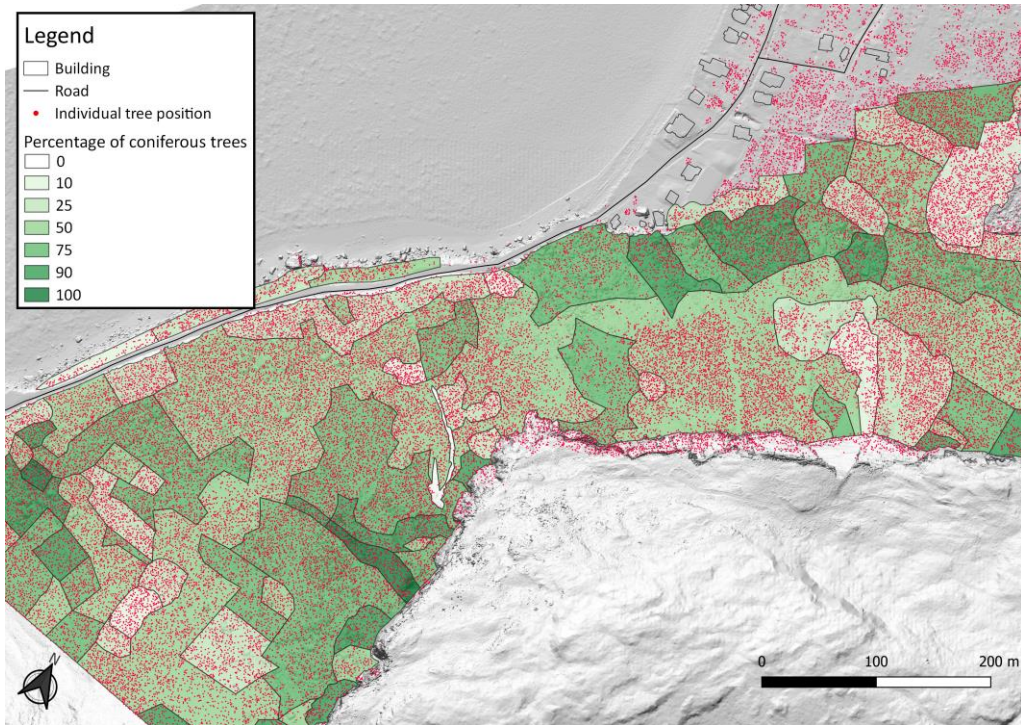


Figure 46. Tree file and coniferous tree percentage map.



Figure 47. Zoom of the 2019 aerial photo mosaic that was used to draw limit lines (green) between areas of similar forest types.

#### 3.3.1.5 Rockfall source zones

The rockfall source zones were mapped on QGIS by simultaneously visualizing a hillshade map and a slope map generated from the 0.25 m DEM, and the mosaic of 2019 aerial photos. Field visits later validated the exact position of the rockfall starting zones by walking above and below the cliff line while tracking with a handheld GPS. The rockfall source zones are not limited to the Murailles rock band because some free-standing rock pillars are also rockfall source zones (see chapter 2), as observed during the 2017 rockfall event. In total, 3198 rockfall starting cells were identified and the density of the conglomerate rock,  $2650 \text{ kg/m}^3$ , was extracted from the literature (Manger, 1963).

#### 3.3.2 Simulation, sensitivity analysis and validation

The probabilistic nature of the Monte Carlo-based Rockyfor3D simulation model makes it an effective model to test the relative importance of the different input parameters on the simulated trajectories. The large number of simulated rockfalls is helpful when comparing the probability of rock blocks reaching specific vulnerable areas. The model intrinsically varies, within a given range of values, some specific key parameters; such as the coefficients of restitution. In this sensitivity analysis, the rock block volume, the slope surface roughness and the presence of trees on the talus slope were chosen to test their effect on the model. All other parameters were kept the same for each simulation and the number of falling rock blocks was maintained at 1000 blocks per cell, for a total of 3198000 trajectories per simulation.

Three rock block volumes were chosen to test the effect of rock block dimensions on simulation results. As seen in Chapter 2, most of the blocks observed on the cliff have a tabular or cubic shape. In most cases, tabular or columnar blocks will break up into smaller cubic blocks. Cube-shaped blocks generally have further runout distances than rectangles (Caviezel *et al.*, 2019). For the purpose of considering the worst-case scenario from the real world, the simulated rock blocks in this study always have a cubic shape. Three selected volumes of 1, 27 and 729 cubic meters were chosen. First,  $1 \text{ m}^3$  because it is a common block size found on the cliff face and is deemed as the minimum volume that can make it to the lower parts of the talus slope. Smaller

blocks would simply be stopped by the rugged topography of the scree slope and the trees. Second, 27 m<sup>3</sup> was chosen because it is the volume of the block involved in the 2017 rockfall event and many other potentially unstable blocks of this size can be seen on the cliff (Tables 1 and 2). Third, 729 m<sup>3</sup> was chosen as the larger rock block volume because it is the estimated volume of the largest intact boulders found in the deposition area, and because potentially unstable blocks of this volume are present on the cliff (Tables 1 and 2).

Three different talus slope scenarios were decided to test the effect of the surface roughness and tree presence on the simulation results. It is important to state that in all three scenarios; the same underlying DEM (2m resolution) was used for the simulations. First of all, the A scenario aimed at recreating the slope specifications similar to those used in Bédard's 2019 study. The talus slope obstacle heights are significantly lower than what we have defined and there are no input maps to describe the forest. Second, the B scenario used surface roughness values defined in this study but, again, the forest component of the simulation was left out. Third, the C scenario, used the same surface roughness values as the B scenario, while also including the input treefile maps the effect of trees on the simulated trajectories. These scenarios help compare the effects of the different parameters on the simulation results. Scenarios A and B have different soil types and surface roughness values that were determined by different users and are compared using the simulated runout distances. Comparing the results of B and C helps understand how forests affect rockfall propagation, in deviation of direction and energy absorption.

Validating the results of the simulations is crucial to ensure that the model accurately represents the slope parameters and characteristics, and that the results align with real-world observations. This can be done by using the minimum energy line angle (°) output from the Rockyfor3D simulation, to the reach angle of the outlying boulders on the field (Gauthier *et al.*, 2023 ; Žabota et Kobal, 2020). The first step was to divide the talus slope into three boulder deposition zones of similar slope roughness characteristics. Second, the reach angles calculated by Rockyfor3D were extracted for each cell, in each of the three boulder deposition zones. Results outside the boulder deposition zones were excluded due to the lack of real boulders for comparison. The 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile of these extracted reach angles are calculated to account for the extremes; or the furthest boulders from the cliff, found near the limit outlying boulder line. Third, these angles were compared to the median reach angles of the boulders found near the outlying

boulder line; measured directly on the 0.25 m DEM and assuming a perpendicular line of travel. The reach angles of the 27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup> blocks were compared to the reach angles of the 2 to 4 m diameter blocks and the 7 to 15 m diameter blocks. The results of the three talus slope scenarios (A, B and C) were validated and compared, with the aim of selecting the most valid scenario to map the potential rockfall limit line.

### 3.3.3 Mapping the propagation zones using Rockyfor3D simulation results

The reach probability output map produced by Rockyfor3D was used to map the zones potentially exposed to rockfalls. This output expresses a percentage per cell; dividing the number of passages per cell by the total number of simulations from all source cells. This output was used in other studies (AGS, 2007 ; Dorren *et al.*, retracted preprint ; Mazengarb *et al.*, 2015 ; Nordang, 2017 ; Walberg, 2013) and proved to be a valuable susceptibility zoning descriptor in Mazengarb's (2015) report. Susceptibility maps are a quantitative assessment of the spatial distribution of the slope movement (AGS, 2007). “[Rockfalls] are expected to be more frequent in the most susceptible areas, but as time frame is not taken into account, the susceptibility does not directly represent temporal occurrence probability” (Horton *et al.*, 2013).

The Australian Geomechanics Society attributed reach probability values to rockfall susceptibility descriptors in their 2007 guidelines (AGS, 2007). For the cases where the conditions are quantified, a reach probability above 50% per cell is considered as having a high susceptibility to rockfall exposition, between 25% and 50% as moderate susceptibility, between 1% and 25% as low susceptibility and below 1% as very low susceptibility (AGS, 2007). The final maps proposing zones potentially exposed zones to rockfalls in Saint-Fabien-sur-Mer were drawn using these susceptibility descriptors, while varying the block volume (27 m<sup>3</sup> to 729 m<sup>3</sup>), and the slope characteristics (scenario selection in 3.4.3). Like in the validation step, blocks of 1 m<sup>3</sup> were not used in the mapping of zones exposed to rockfalls because they could not travel far enough in the simulation to be a serious threat.

With the aim of quantifying the level susceptibility of some of the closest vulnerable landmarks; road sections, buildings and cadastral lots under the cliff were vectorized into shapefile polygons. The extraction of reach probability values, calculated by rockfall trajectory simulations, for specific landmarks was also used by Zhang et al. (2022). Figure 48 shows the shape and position

of the thirty-two road sections polygons extracted for statistical comparison. Most of the road sections are on Chemin de la Mer Est (30 sections) and only two are on Chemin Ernest-Roy. The eleven building polygons outline the areas covered by homes, garages, sheds, mobile homes, and patios near the potentially exposed zone (Figure 49). Finally, seventeen cadastral lots were also drawn to determine the legal boundaries of each parcel of land below the talus (Figure 50). From the reach probabilities extracted for each polygon, for each of the three rock block volumes; a mean and standard deviation were calculated to quantify each vulnerable landmark's level of susceptibility.

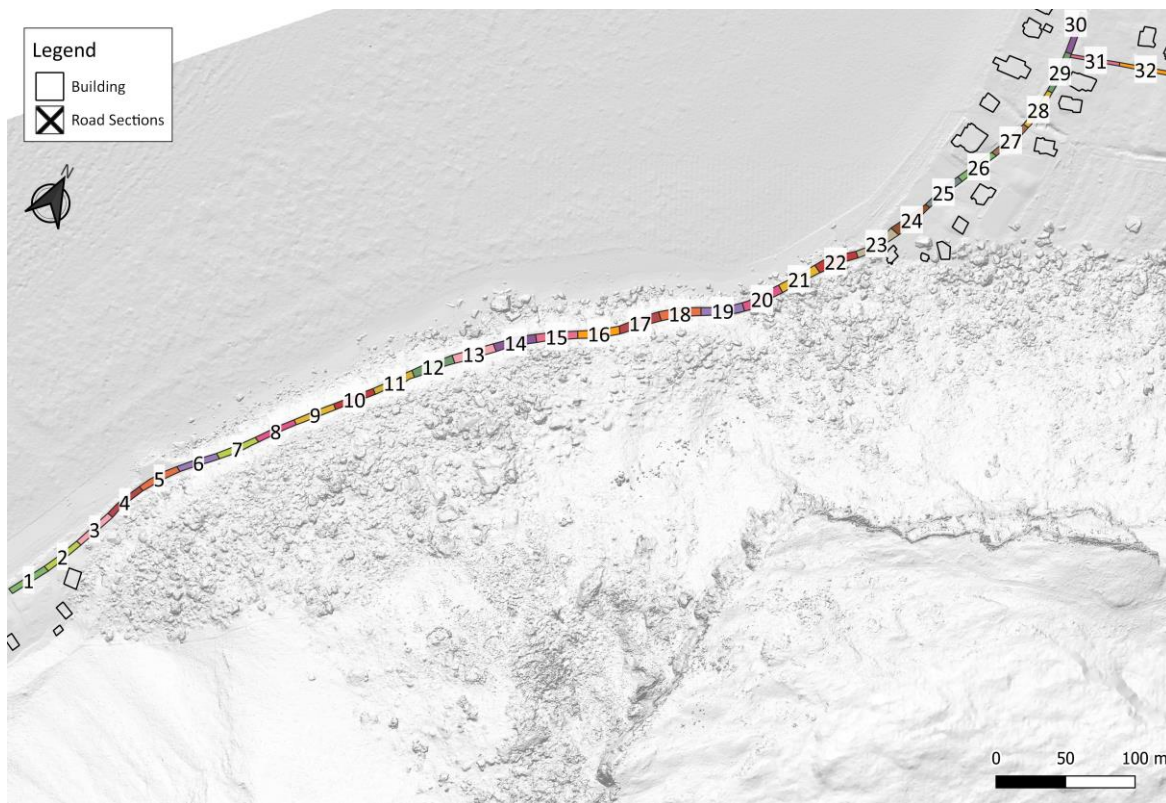


Figure 48. Position of road section polygons.

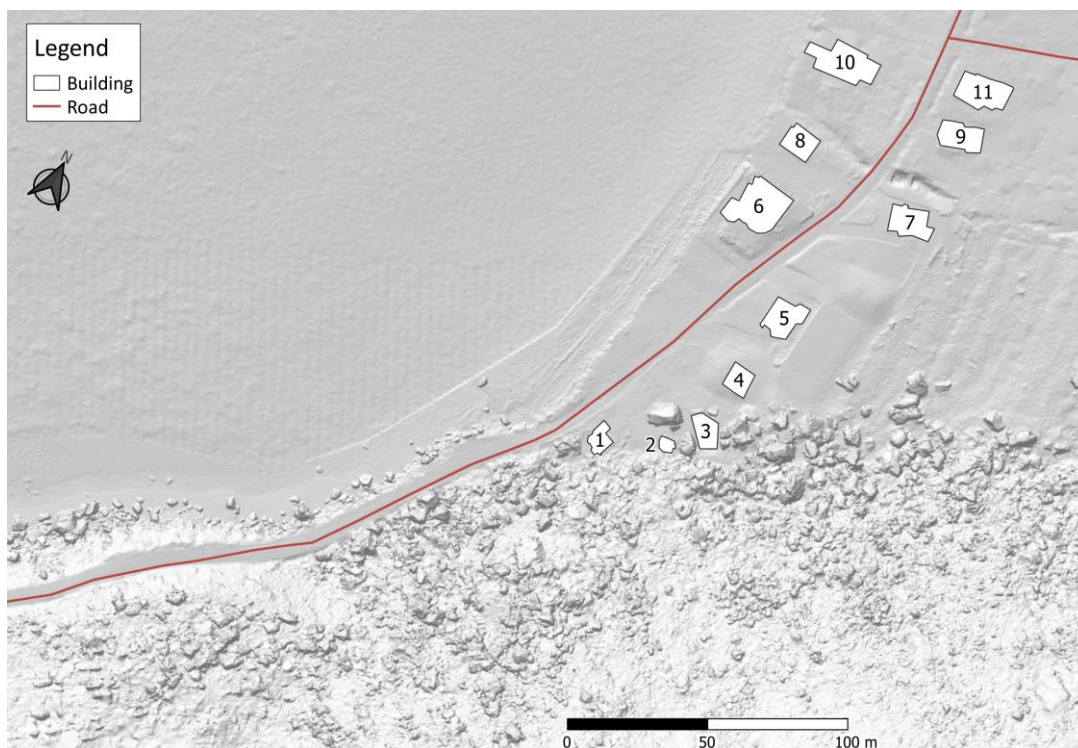


Figure 49. Position of building polygons.

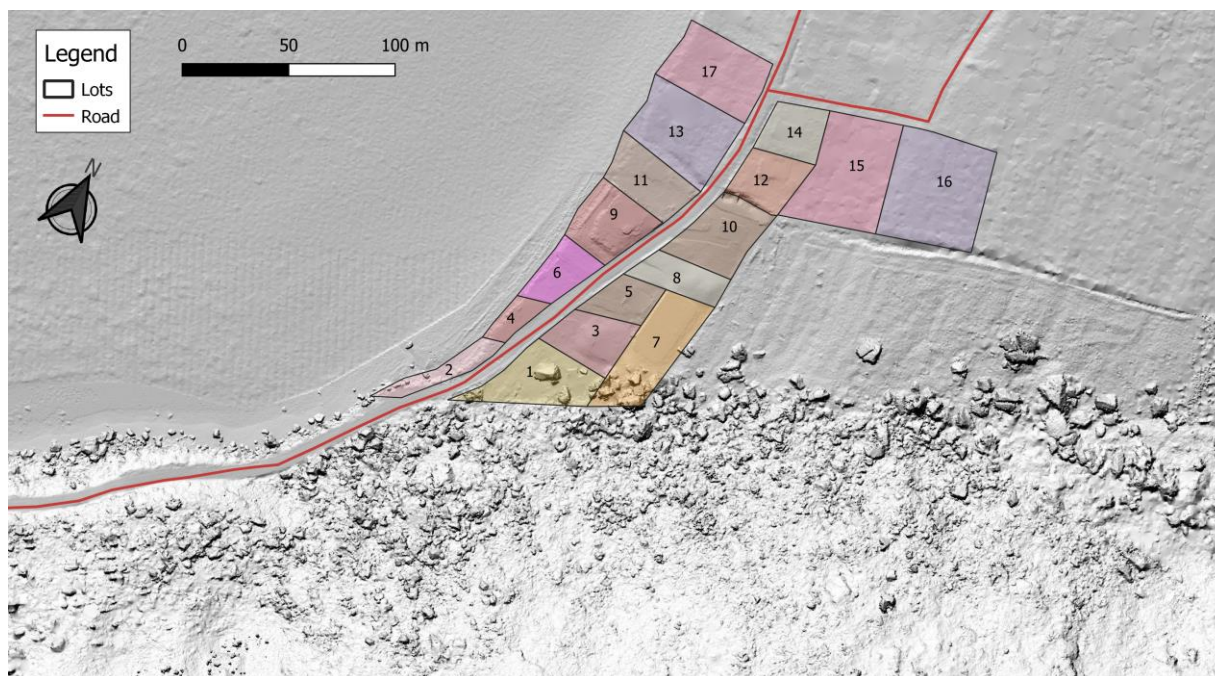


Figure 50. Cadastral plan of the study site values extracted for each lot polygon.

### 3.4 RESULTS

#### 3.4.1 Comparison of rockfall simulation results

The first step in the comparison of rockfall simulation results was to map the reach probability results and number of blocks deposited, for the three chosen block volumes and the three slope scenarios. In Figure 55, simulation results are presented side-by-side, for scenarios A and B, for all three chosen block volumes. Comparing these two highlights the significant influence of surface roughness, as determined by two different users. For Scenario A, the slope characteristics were determined with a 2 m resolution point cloud, while Scenario B used a 0.25 m resolution point cloud and numerous field visits. The difference in results between these two scenarios are explained by the higher obstacle heights in Scenario B (Figure 43) compared to those of Scenario A (Figure 44). Not only are the simulated limits of propagation visibly further for Scenario A than for B, the zones exposed to potential rockfall also have a greater probability of reach for Scenario A than for B. It is interesting to note that most of the smaller simulated blocks (volumes of 1 m<sup>3</sup> and 27 m<sup>3</sup>) are stopped high on the western side of the talus slope by the tall obstacles found in polygons 8, 10, 11 and 14 of Figure 43. On the eastern side of the talus slope, these smaller blocks are stopped at the bottom of the talus slope by the blocks in the outlying boulder zone.

The surface roughness characteristics are constant from Scenario B to C; however, Scenario C includes a treefile, whose effects are presented in Figure 56. For all three volumes, the simulated distances are lower in Scenario C because of the energy dissipated by impacts against trees (Dorren et Berger, 2006). On the western side of the talus, the simulated blocks do not even make it to the road. In addition to reducing the travel distances, there is also a convergence of many trajectories into darker, preferential paths that might be caused by the deviation of trajectories by tree impacts (Figure 57). The equations in Rockyfor3D that consider trajectory deviation and energy absorption by trees were calibrated for very small rock blocks (~1 m<sup>3</sup>); and may not be applicable to larger rockfalls (Dorren *et al.*, 2022a ; Dorren et Berger, 2006 ; Noël *et al.*, 2021).

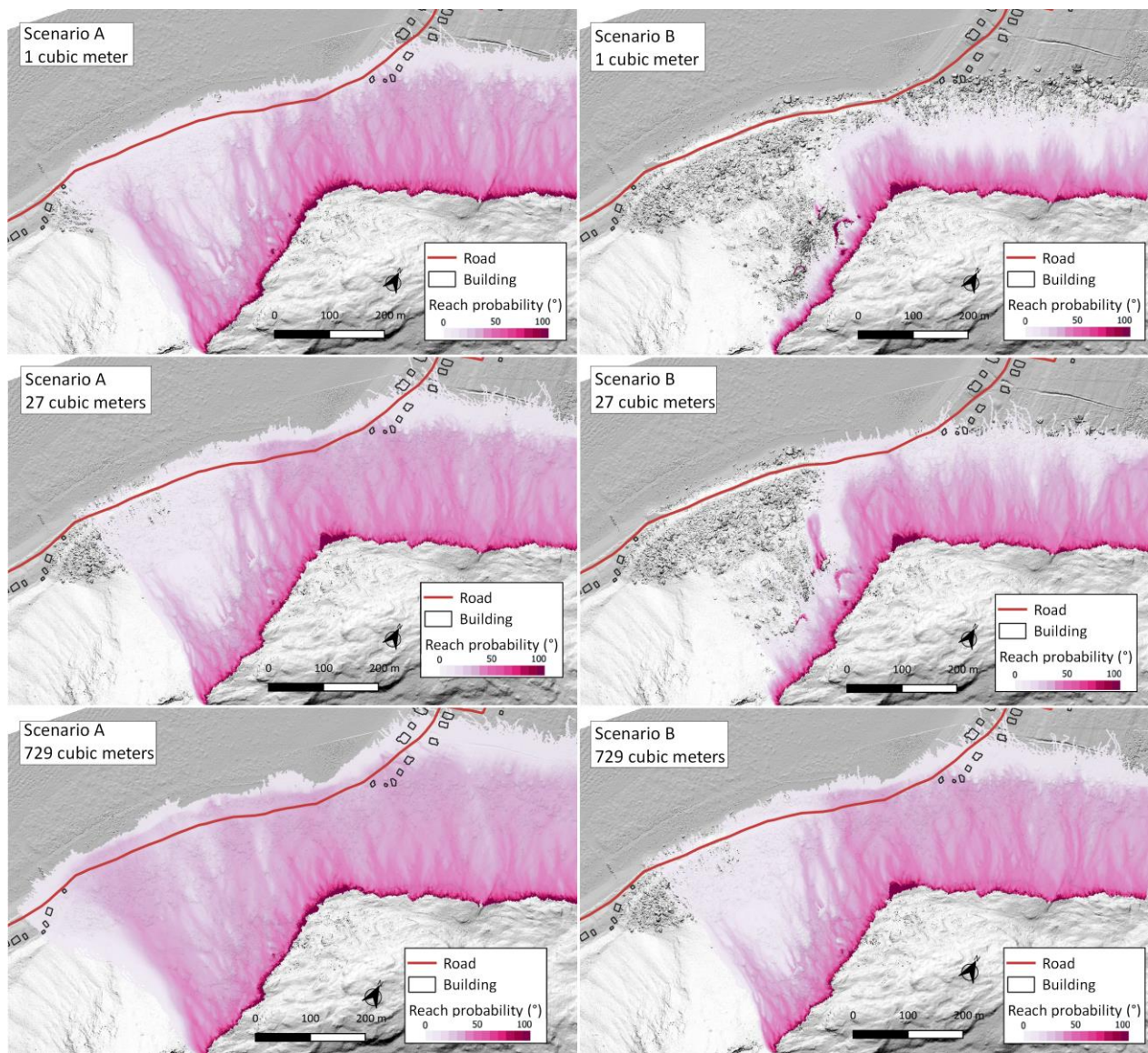


Figure 51. Reach probability results comparing Scenarios A and B for block volumes of 1 m<sup>3</sup>, 27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup>.

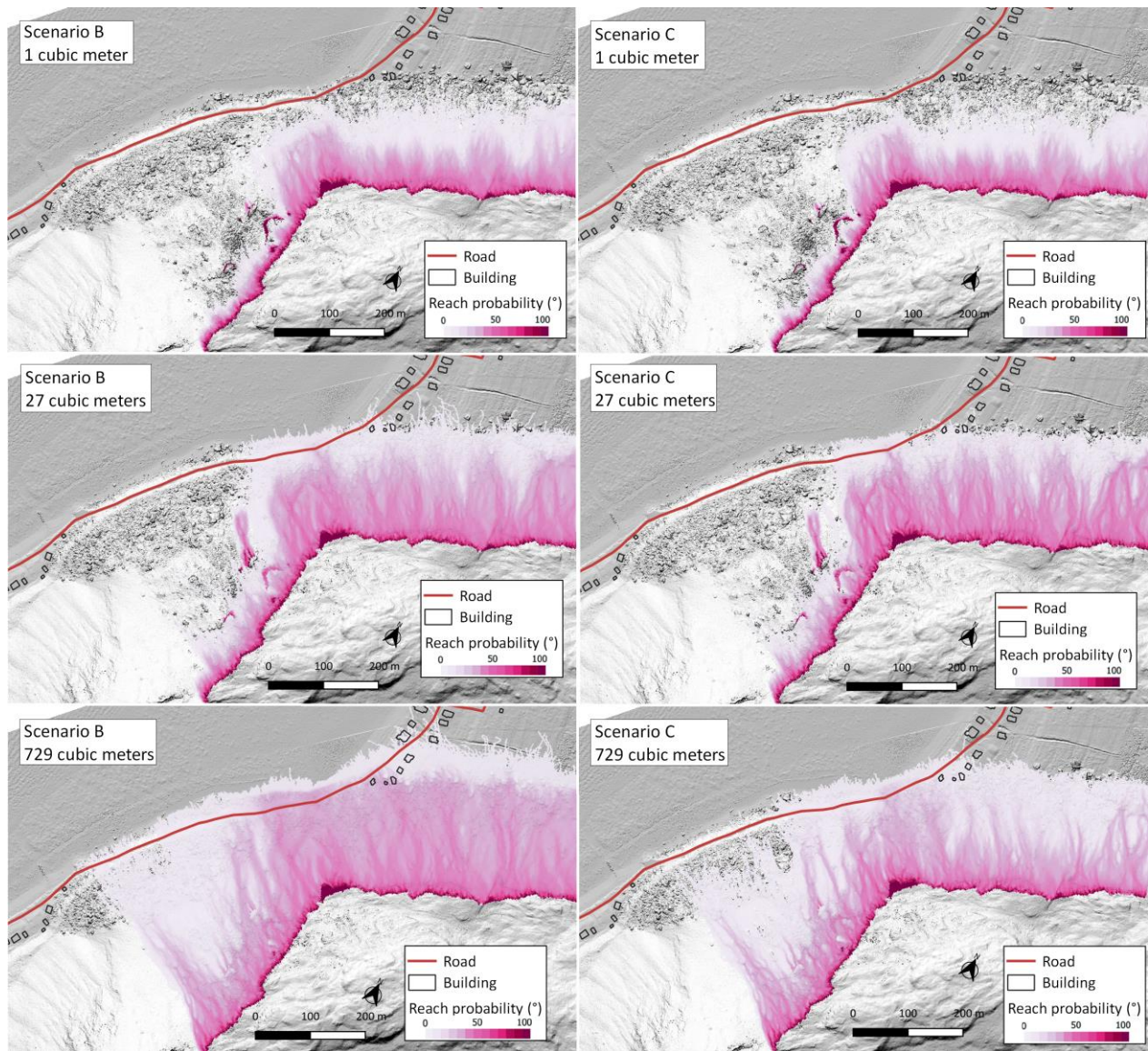


Figure 52. Reach probability results comparing Scenarios B and C for block volumes of 1 m<sup>3</sup>, 27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup>.

The other Rockyfor3D output map that was used to compare the three scenarios, for the three volumes, is the number of blocks deposited (Figure 53). In this Figure, maximum deposition lines were traced linking the furthest deposited blocks for every simulation. The advantage of this output is the ability to see the worst-case scenario with the furthest possible distance that can be travelled by a falling rock block. It is interesting to notice how for blocks of 1 and 27 m<sup>3</sup> the difference in maximum distance travelled is much greater when the surface roughness is augmented (from Scenario A to B), compared to when trees are added to the simulation (Scenario B to C). For the largest blocks (729 m<sup>3</sup>), the difference is not so obvious, and all three lines seem to be more equally spaced. Also, visualizing the maximum runout distances output shows how the water soil type brings the moving blocks to a complete stop upon contact (Figure 45). For all volumes of Scenario A, the green lines of maximum distance travelled are essentially aligned with the western coastline of the study site (Figure 53).

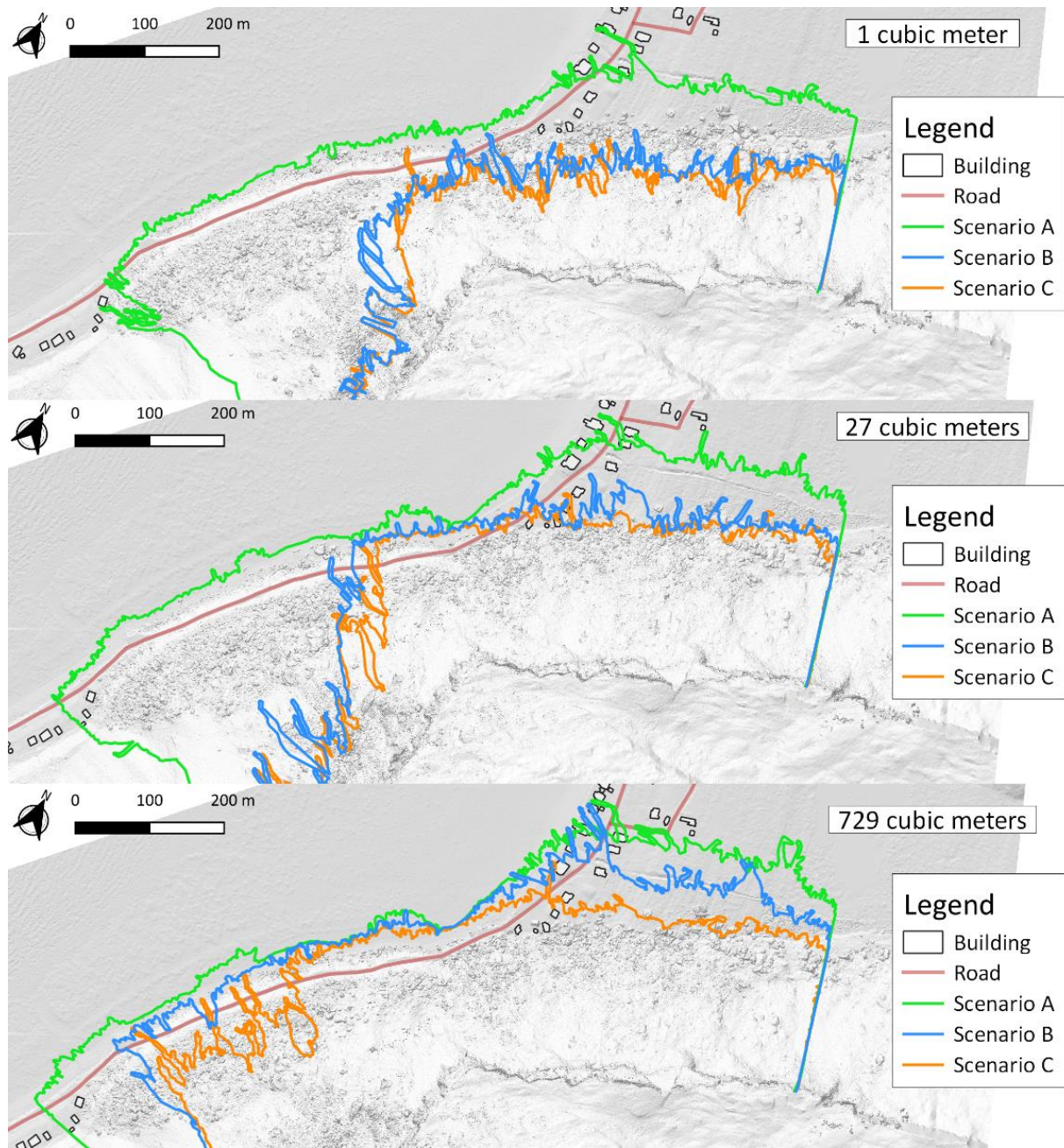


Figure 53. Furthest simulated block deposited for different slope characteristics and block sizes.

### 3.4.2 Validation and scenario selection

With the aim of validating the simulation results that will be used to map the zones potentially exposed to rockfall, the 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile of the minimum energy line angle per cell, calculated with Rockyfor3D, were compared to the reach angle of the boulders manually measured on the DEM, for Scenarios A (Figure 54), B (Figure 55) and C (Figure 56).

For blocks of 2 to 4 m in diameter, similar to the size of the block deposited after the 2017 event, the median reach angle measured on the DEM ranges between 40° and 42° in Zone 1, 37° and 39° in Zone 2, and approximately 35° in Zone 3 (Figure 57). In Scenario A, the Rockyfor3D 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile reach angles are approximately 10° lower than the measured median reach angle for blocks of 27 m<sup>3</sup> found at the bottom of the talus slope (Figure 54). In Scenarios B and C, the measured reach angle for blocks of 2 to 4 m in diameter and the calculated 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile of energy line angles, for blocks of 27 m<sup>3</sup>, match up very closely in the three deposition zones (Figure 55 and 56).

For blocks of 7 to 15 m diameter, like the size of the blocks deposited at the bottom of the talus slope after the 1967 event, the median reach angles were around 39° in Zone 1, between 36° and 38° in Zone 2, and 34° and 36° in Zone 3 (Figure 57). As expected, based on the laws of physics, the median reach angles for blocks between 2 and 4 m of diameter are higher than for blocks of 7 to 15 m diameter. Once again, for Scenario A the Rockyfor3D 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile reach angles are approximately 10° lower than the measured median reach angle for blocks of 729 m<sup>3</sup> found at the bottom of the talus slope (Figure 54). However, for Scenario B the Rockyfor3D reach angles are approximately 5° lower than the measured reach angle in the three zones (Figure 55). Conversely, in Scenario C, the reach angles extracted from the Rockyfor3D results are almost identical to the reach angle values measured off the DEM for all three zones, for blocks of 729 m<sup>3</sup>, (Figure 56).

According to this comparison, Scenarios B and C come out as the most valid slope surface scenarios. For the larger blocks, Scenario C shows a slight advantage over B, even if the simulation model is not calibrated to consider tree impacts for blocks >1 m<sup>3</sup>. In order to compare the effects of the slope surface characteristics on the simulation results, Scenario B and C will be used to map the zones potentially exposed to rockfall in the next section.

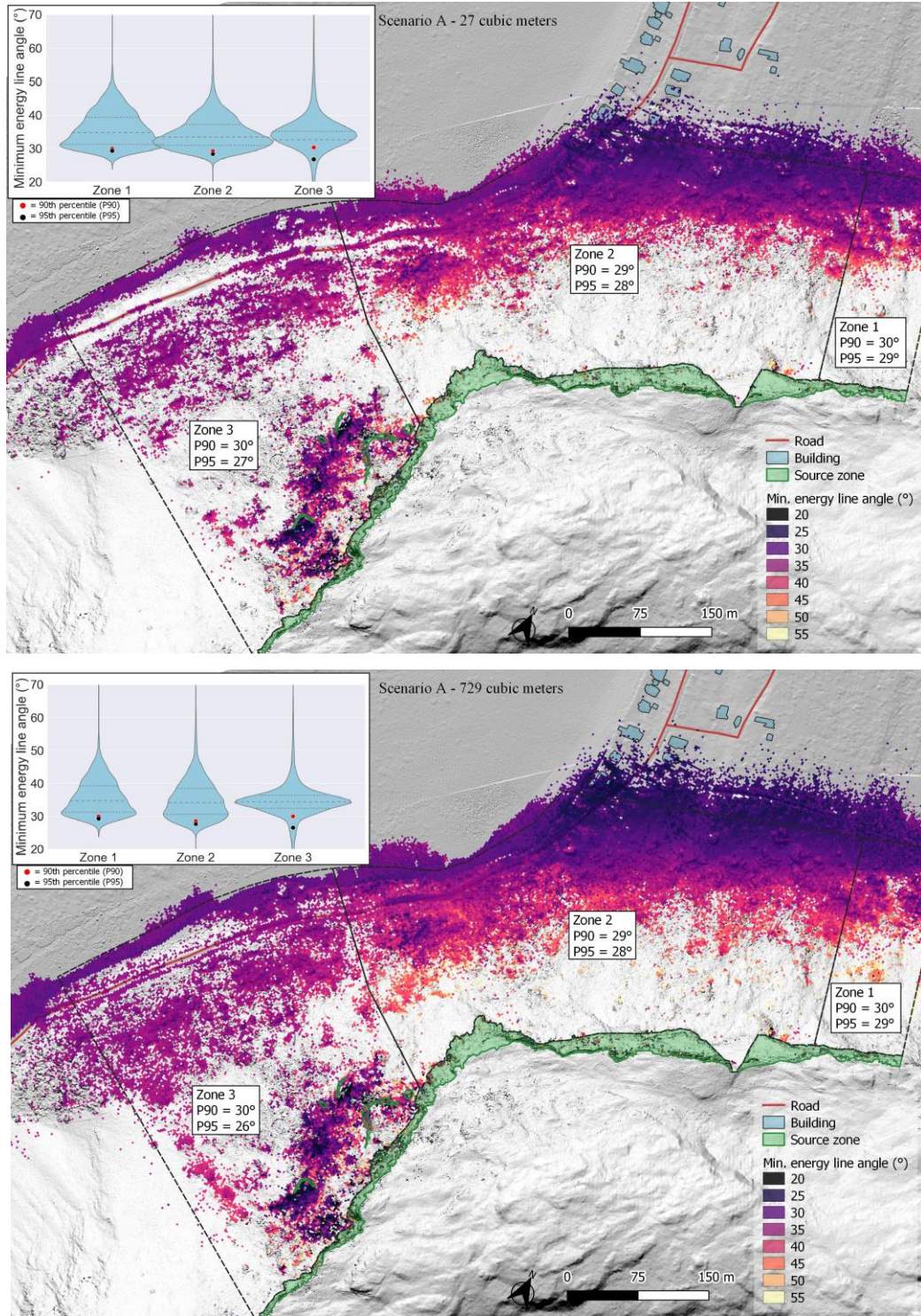


Figure 54. Map and violin plot of the simulated minimum energy line angle (or reach angle) used to extract the 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile (P90 and P95) in each of the three zones, for Scenario A, and blocks of 27 m<sup>3</sup> (above) and 729 m<sup>3</sup> (below).

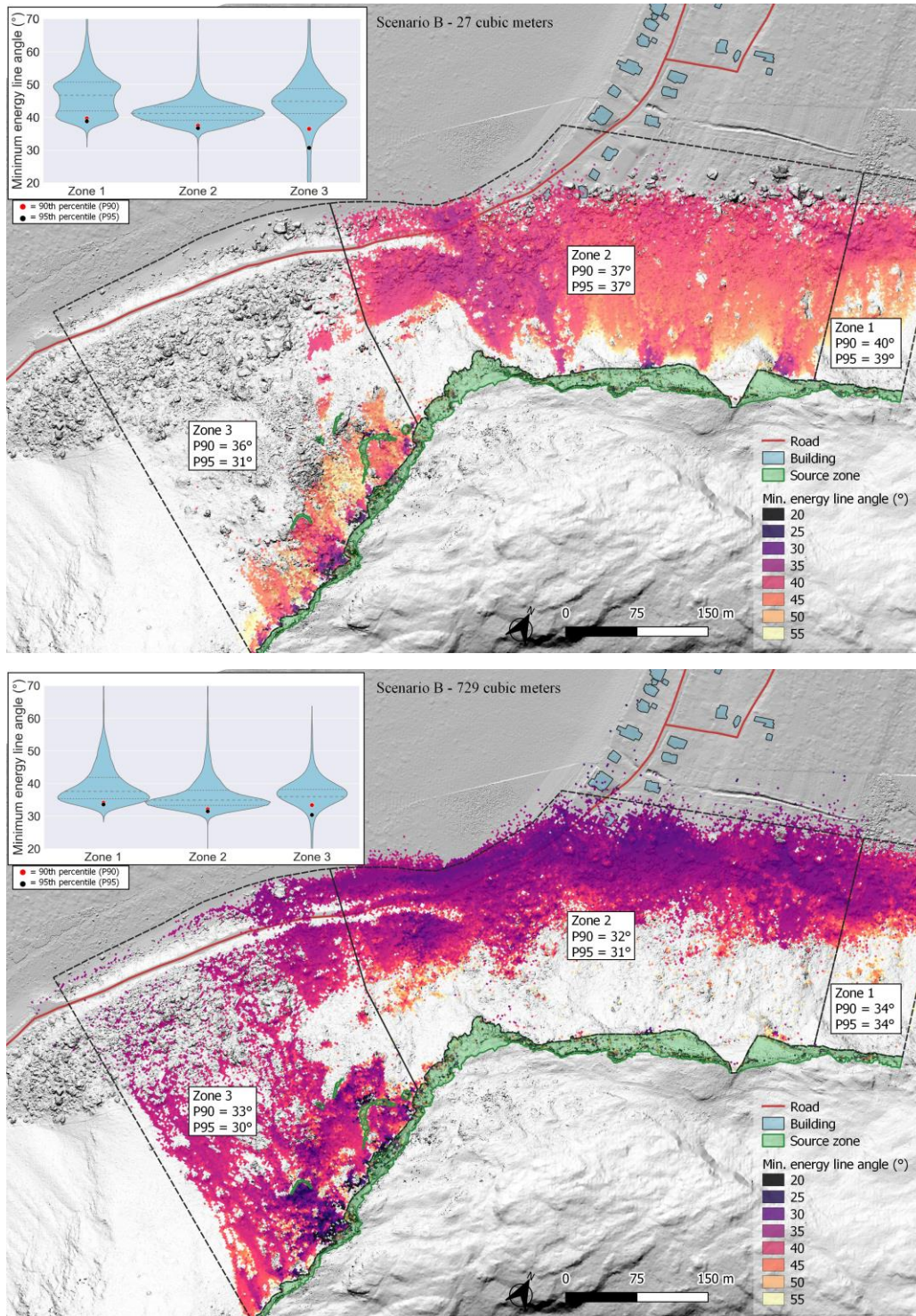


Figure 55. Map and violin plot of the simulated minimum energy line angle (or reach angle) used to extract the 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile (P90 and P95) in each of the three zones, for Scenario B, and blocks of 27 m<sup>3</sup> (above) and 729 m<sup>3</sup> (below).

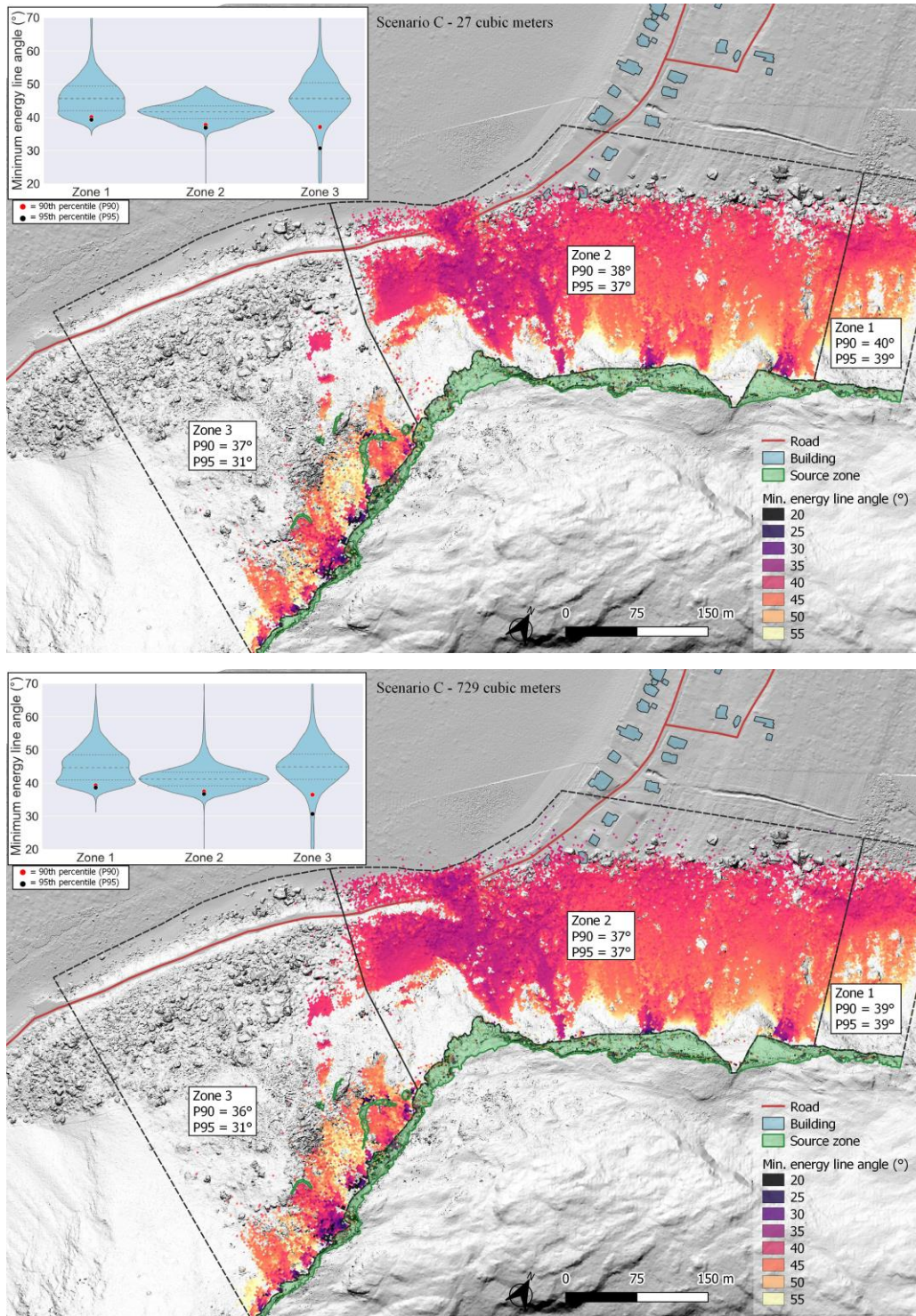


Figure 56. Map and violin plot of the simulated minimum energy line angle (or reach angle) used to extract the 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile (P90 and P95) in each of the three zones, for Scenario C, and blocks of 27 m<sup>3</sup> (above) and 729 m<sup>3</sup> (below).

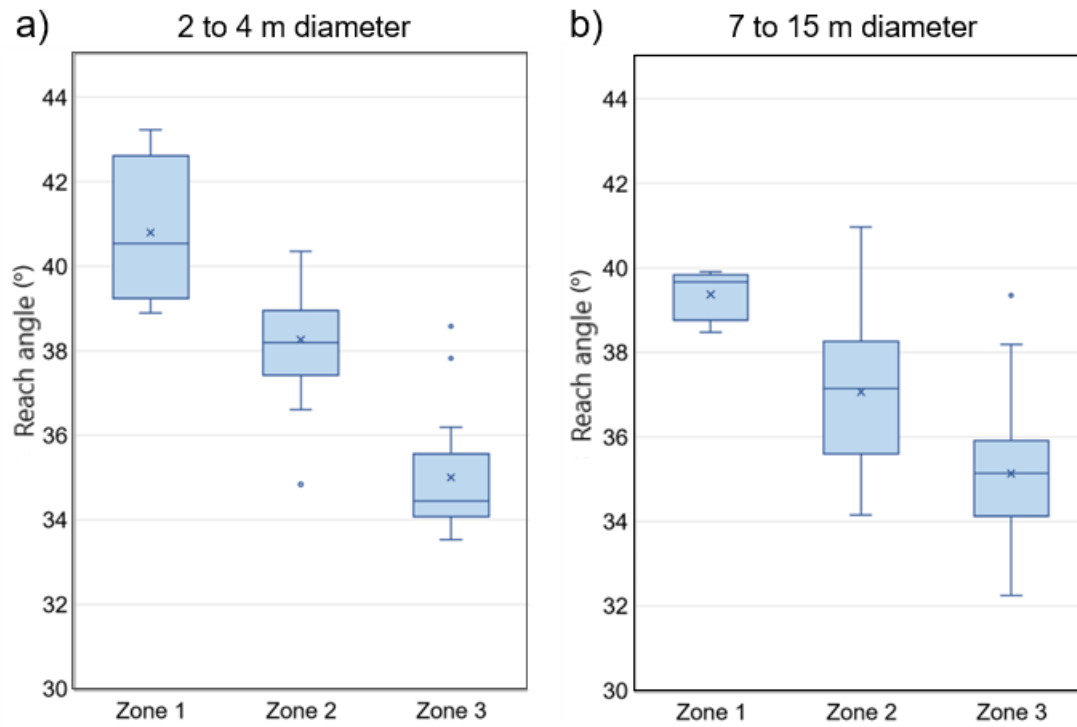


Figure 57. Box plot diagrams of the reach angle measured on the DEM: a) for blocks of 2 to 4 m in diameter, and b) for blocks of 7 to 15 m diameter (adapted from Gauthier *et al.*, 2023).

### 3.4.3 Mapping zones exposed to rockfall

The degree of exposition to rockfalls is divided into four levels of susceptibility, based on the guidelines of the Australian Geomechanics Society (AGS). The simulation output data used is the reach probability and each cell was given a colour corresponding to the AGS susceptibility descriptor (AGS, 2007). The first map (Figure 58) presents the reach probability results for the simulation on slope surface scenario B for blocks of 27 m<sup>3</sup> and the second map (Figure 59) shows the 729 m<sup>3</sup> blocks in Scenario B. To compare the effect of slope surface characteristics on the reach probability results, the third and fourth maps present the Scenario C simulation results for blocks of 27 m<sup>3</sup> (Figure 60) and 729 m<sup>3</sup> (Figure 61).

For blocks of 27 m<sup>3</sup>, the lower limit of the green zone is very close to the central and eastern outlying boulder line on the field (Figures 58 and 60). For the bigger blocks of 729 m<sup>3</sup>, in Scenario B, it is the upper line of the green zone, on the border with the yellow zone, low that aligns close to the central and eastern outlying boulder line (Figure 59). In Scenario C, for blocks of 729 m<sup>3</sup>, the green zone extends out past most of the outlying boulder line in the central and eastern portion (Figure 60). However, in this case, the yellow, low-susceptibility zone is stopped higher up on the talus. The downslope shape of the yellow polygon in Scenario B (Figures 58 and 59) is more uniform in its propagation when compared to the shape of the yellow polygon in Scenario C (Figures 60 and 61), where more of the simulated trajectories seem to have converged into preferential paths. In all four figures, the reach probability values in the western portion of the talus slope are much lower because of the higher obstacle heights in the area. Also, the moderate (25-50% reach probability) and high (50-100% reach probability) susceptibility zones are always very close to the cliff (never more than approximately 30 meters downslope).

The mean reach probabilities and standard deviations, for talus slope Scenarios B and C, for the three different rock block volumes, were extracted from the thirty-two road sections, the eleven buildings and the seventeen cadastral lots. The highlights of these findings are presented in Table 4. The mean reach probability and standard deviation values help quantify each vulnerable landmark's level of susceptibility. Some of the most vulnerable landmarks were highlighted in yellow (Table 4) and graphed in box plots (Figure 62). The box plots help visualize the impact of slope surface characteristics and block volume on the degree of susceptibility (reach probability).

As expected, for all seven vulnerable landmarks plotted in Figure 62, the median reach probabilities increase when rock block volumes increase from 27 m<sup>3</sup> to 729 m<sup>3</sup>. Across most landmark polygons, for both block volumes, Scenario B consistently shows higher reach probabilities than Scenario C. The difference between Scenario B and Scenario C is more pronounced for blocks of 729 m<sup>3</sup> than for 27 m<sup>3</sup>, where the probabilities are more similar. In the 729 m<sup>3</sup> box plot, the median reach probability for Scenario B exceeds that of Scenario C by more than 1% for building #2, road section #17 and road section #19. In contrast, the median difference for 27 m<sup>3</sup> blocks never exceeds 0.1%. According to Table 4, the most susceptible polygons are road sections #17 to #20 and buildings #2 and #3 because their mean reach probabilities are above 1% (indicating low susceptibility) in Scenario B for blocks of 729 m<sup>3</sup>. When blocks of 27 m<sup>3</sup> were simulated, the mean reach probability never surpassed 0.4% in any polygon. Interestingly, for most of the extracted polygons in Table 4, the standard deviation of the mean reach probability was higher for blocks of 729 m<sup>3</sup> than for blocks of 27 m<sup>3</sup>.

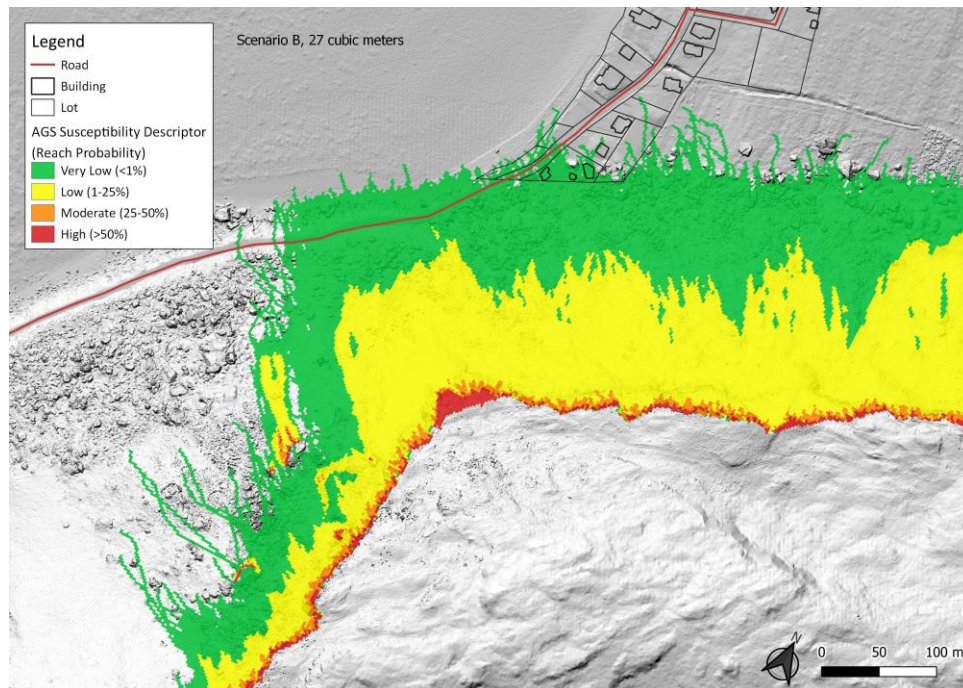


Figure 58. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 27 m<sup>3</sup> for Scenario B.

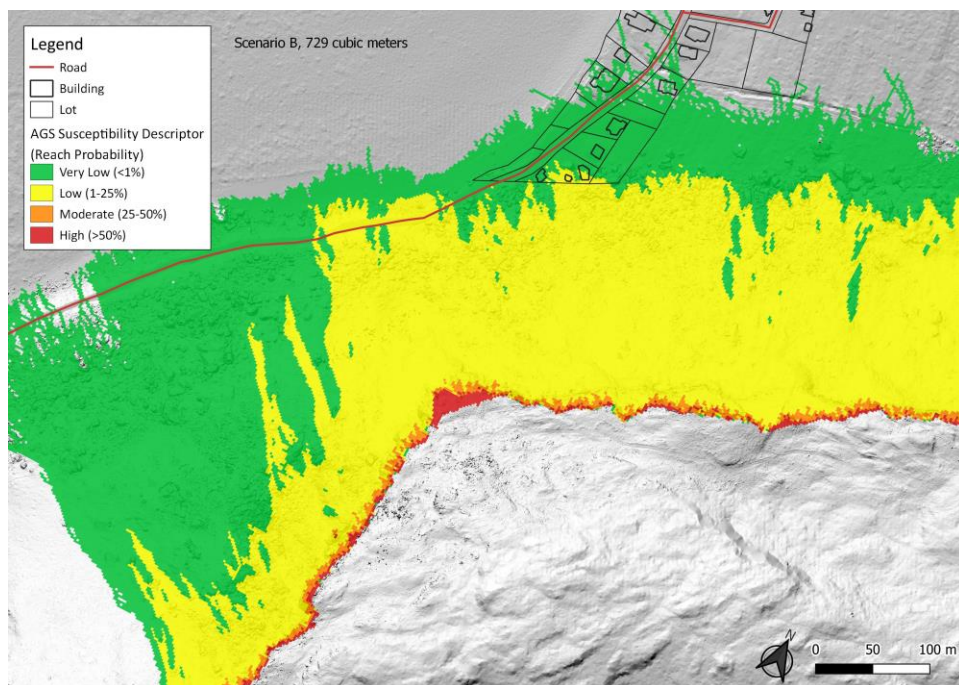


Figure 59. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 729 m<sup>3</sup> for Scenario B.

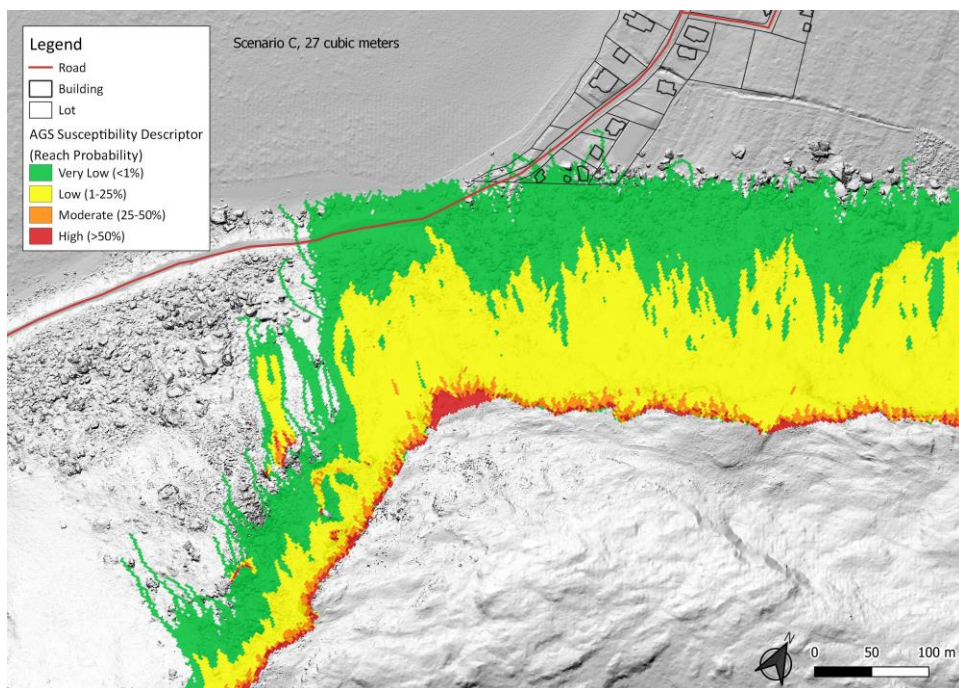


Figure 60. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 27 m<sup>3</sup> for Scenario C.

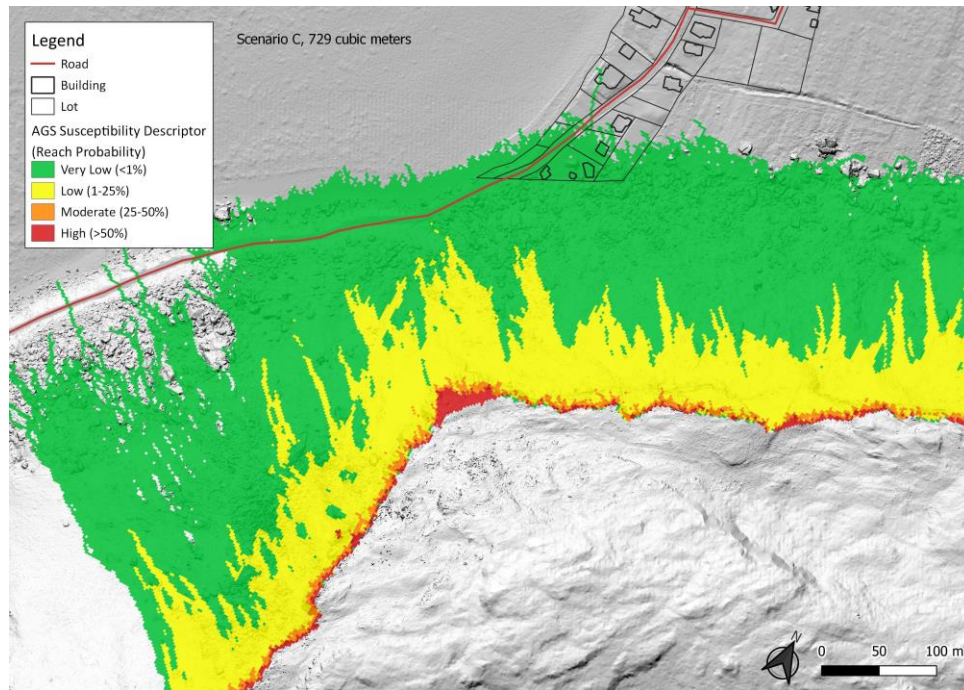


Figure 61. Map of reach probability zones according to AGS Susceptibility Descriptor for blocks of 729 m<sup>3</sup> for Scenario C.

Table 4. Reach probability (%) mean and standard deviation (SD) values extracted for each road section, building and cadastral lot polygon. The boxes highlighted in yellow indicate the relationships that were graphed as box plots in Figure 62.

|                             |        | Scenario B |       |       | Scenario C |       |       |                             |        | Scenario B |       |       | Scenario C |       |       |
|-----------------------------|--------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|-----------------------------|--------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|                             |        | 1          | 27    | 729   | 1          | 27    | 729   |                             |        | 1          | 27    | 729   | 1          | 27    | 729   |
| Block volume (cubic meters) |        |            |       |       |            |       |       | Block volume (cubic meters) |        |            |       |       |            |       |       |
| Road #5                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.100 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Building #1                 | Mean = | 0.000      | 0.102 | 0.668 | 0.000      | 0.095 | 0.164 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.000 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.007 | 0.109 | 0.000      | 0.024 | 0.019 |
| Road #6                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.104 | 0.000      | 0.000 | 0.009 | Building #2                 | Mean = | 0.000      | 0.107 | 1.660 | 0.000      | 0.114 | 0.129 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.013 | 0.000      | 0.000 | 0.029 |                             | SD =   | 0.000      | 0.005 | 0.095 | 0.000      | 0.013 | 0.003 |
| Road #7                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.100 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Building #3                 | Mean = | 0.000      | 0.100 | 1.082 | 0.000      | 0.074 | 0.111 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.000 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.483 | 0.000      | 0.044 | 0.009 |
| Road #8                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.077 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Building #4                 | Mean = | 0.000      | 0.012 | 0.128 | 0.000      | 0.006 | 0.094 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.042 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.032 | 0.012 | 0.000      | 0.024 | 0.024 |
| Road #9                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.023 | 0.000      | 0.000 | 0.010 | Building #5                 | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.102 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.042 | 0.000      | 0.000 | 0.030 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.005 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #10                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.067 | 0.000      | 0.000 | 0.003 | Building #6                 | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.067 | 0.000      | 0.000 | 0.007 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.047 | 0.000      | 0.000 | 0.017 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.047 | 0.000      | 0.000 | 0.025 |
| Road #11                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.101 | 0.000      | 0.000 | 0.016 | Building #7                 | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.043 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.003 | 0.000      | 0.000 | 0.037 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.050 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #12                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.104 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Building #8                 | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.022 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.006 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.042 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #13                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.127 | 0.000      | 0.000 | 0.060 | Block volume (cubic meters) |        | Scenario B |       |       | Scenario C |       |       |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.017 | 0.000      | 0.000 | 0.049 |                             |        | 1          | 27    | 729   | 1          | 27    | 729   |
| Road #14                    | Mean = | 0.000      | 0.010 | 0.178 | 0.000      | 0.000 | 0.100 | Lot #1                      | Mean = | 0.000      | 0.082 | 0.794 | 0.000      | 0.059 | 0.125 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.029 | 0.027 | 0.000      | 0.000 | 0.017 |                             | SD =   | 0.000      | 0.042 | 0.475 | 0.000      | 0.051 | 0.030 |
| Road #15                    | Mean = | 0.000      | 0.014 | 0.218 | 0.000      | 0.000 | 0.101 | Lot #2                      | Mean = | 0.000      | 0.066 | 0.329 | 0.000      | 0.024 | 0.137 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.035 | 0.051 | 0.000      | 0.000 | 0.017 |                             | SD =   | 0.000      | 0.047 | 0.106 | 0.000      | 0.047 | 0.030 |
| Road #16                    | Mean = | 0.000      | 0.104 | 0.575 | 0.000      | 0.030 | 0.118 | Lot #3                      | Mean = | 0.000      | 0.013 | 0.167 | 0.000      | 0.011 | 0.082 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.023 | 0.210 | 0.000      | 0.046 | 0.020 |                             | SD =   | 0.000      | 0.033 | 0.079 | 0.000      | 0.032 | 0.039 |
| Road #17                    | Mean = | 0.000      | 0.118 | 1.409 | 0.009      | 0.108 | 0.168 | Lot #4                      | Mean = | 0.000      | 0.029 | 0.134 | 0.000      | 0.000 | 0.080 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.010 | 0.375 | 0.028      | 0.010 | 0.020 |                             | SD =   | 0.000      | 0.045 | 0.034 | 0.000      | 0.000 | 0.043 |
| Road #18                    | Mean = | 0.000      | 0.132 | 1.465 | 0.000      | 0.113 | 0.147 | Lot #5                      | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.109 | 0.000      | 0.005 | 0.013 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.009 | 0.313 | 0.000      | 0.009 | 0.017 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.014 | 0.000      | 0.022 | 0.034 |
| Road #19                    | Mean = | 0.020      | 0.214 | 1.833 | 0.000      | 0.156 | 0.200 | Lot #6                      | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.092 | 0.000      | 0.000 | 0.022 |
|                             | SD =   | 0.040      | 0.090 | 0.481 | 0.000      | 0.063 | 0.111 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.039 | 0.000      | 0.000 | 0.042 |
| Road #20                    | Mean = | 0.004      | 0.305 | 1.640 | 0.000      | 0.287 | 0.503 | Lot #7                      | Mean = | 0.000      | 0.025 | 0.236 | 0.000      | 0.011 | 0.056 |
|                             | SD =   | 0.021      | 0.109 | 0.505 | 0.000      | 0.161 | 0.072 |                             | SD =   | 0.000      | 0.044 | 0.292 | 0.000      | 0.031 | 0.051 |
| Road #21                    | Mean = | 0.009      | 0.111 | 0.642 | 0.000      | 0.083 | 0.253 | Lot #8                      | Mean = | 0.000      | 0.009 | 0.101 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.029      | 0.037 | 0.204 | 0.000      | 0.046 | 0.071 |                             | SD =   | 0.000      | 0.028 | 0.009 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #22                    | Mean = | 0.000      | 0.083 | 0.546 | 0.000      | 0.038 | 0.211 | Lot #9                      | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.064 | 0.000      | 0.000 | 0.007 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.037 | 0.185 | 0.000      | 0.048 | 0.063 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.048 | 0.000      | 0.000 | 0.026 |
| Road #23                    | Mean = | 0.000      | 0.089 | 0.513 | 0.000      | 0.028 | 0.138 | Lot #10                     | Mean = | 0.000      | 0.001 | 0.069 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.034 | 0.073 | 0.000      | 0.045 | 0.017 |                             | SD =   | 0.000      | 0.008 | 0.047 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #24                    | Mean = | 0.000      | 0.051 | 0.315 | 0.000      | 0.009 | 0.108 | Lot #11                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.027 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.050 | 0.149 | 0.000      | 0.029 | 0.008 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.044 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #25                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.106 | 0.000      | 0.000 | 0.032 | Lot #12                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.023 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.008 | 0.000      | 0.000 | 0.047 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.042 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #26                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.097 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Lot #13                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.011 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.017 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.032 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #27                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.057 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Lot #16                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.004 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.050 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.021 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #28                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.044 | 0.000      | 0.000 | 0.000 | Lot #17                     | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.016 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.050 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.036 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |
| Road #29                    | Mean = | 0.000      | 0.000 | 0.021 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             |        |            |       |       |            |       |       |
|                             | SD =   | 0.000      | 0.000 | 0.040 | 0.000      | 0.000 | 0.000 |                             |        |            |       |       |            |       |       |

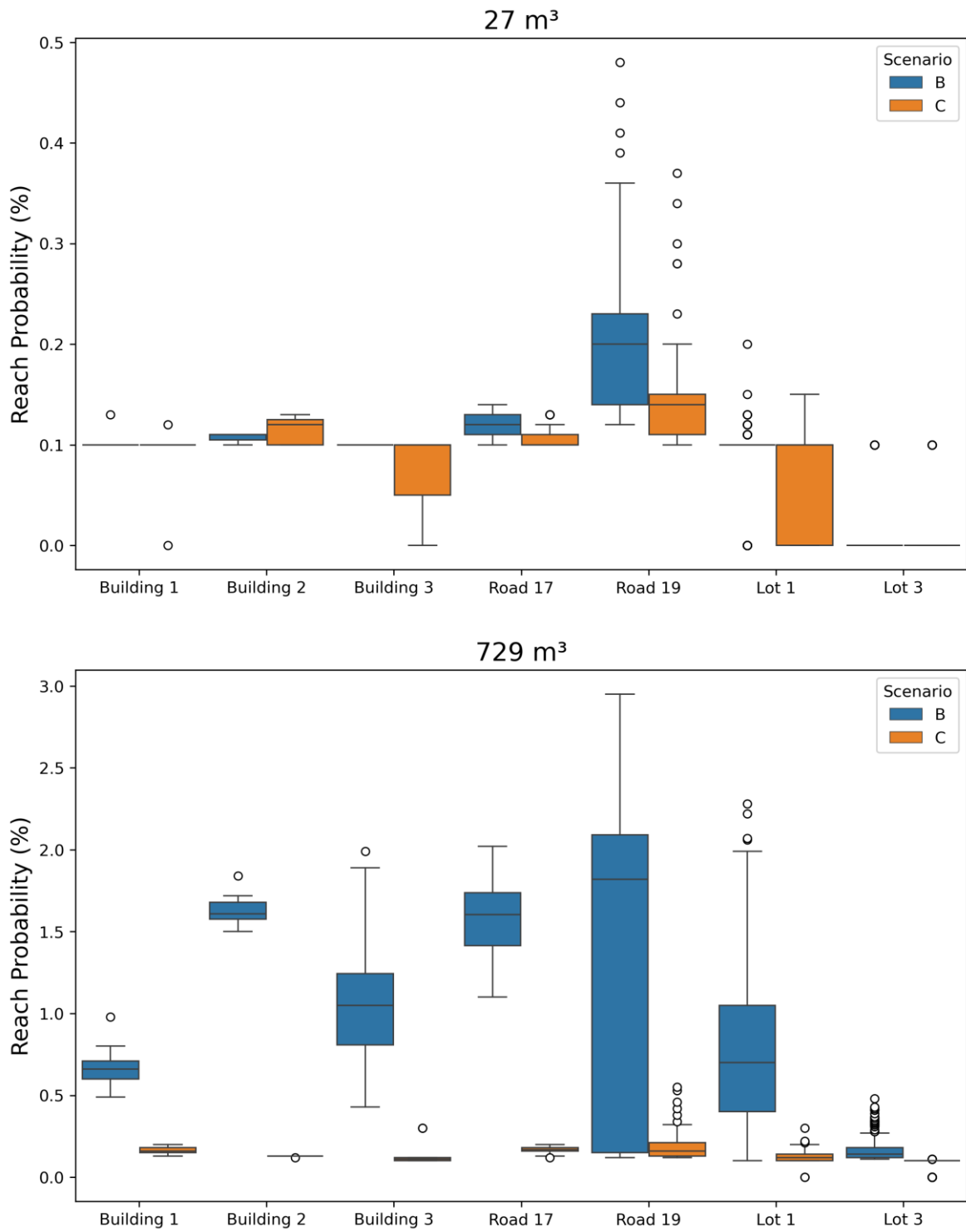


Figure 62. Box plots comparing the extracted reach probabilities, for Scenarios B and C, for buildings 1, 2 and 3, road sections 17 and 19 and lots 1 and 3; for blocks of 27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup>.

### 3.5 DISCUSSION

#### 3.5.1 Reliability of input raster maps

For the purpose of producing accurate and precise rockfall simulation results, it is recommended to provide representative and validated input maps (Lambert *et al.*, 2013 ; Noël *et al.*, 2023 ; Volkwein et Klette, 2014). The Rockyfor3D rockfall trajectory simulation model requires accurate and precise data to describe the characteristics of the talus slope and simulated blocks. The required slope characteristics include the digital elevation model, surface roughness and soil type. For the simulated blocks, it is their dimensions, shape, and density that are necessary.

The slope's topography is the fundamental controlling factor for the trajectory of moving rock blocks and is defined by the digital elevation model (DEM) in the simulation model. The point cloud used to create the input DEM had a relatively high resolution (0.25 m) before being downscaled to the recommended 2 m for Rockyfor3D. This downscaling is an important limitation to the reliability of DEM and could overlook particularities in the terrain and could affect the trajectory of the blocks (Figure 42) (Dorren et Seijmonsbergen, 2003 ; Loye *et al.*, 2009 ; Noël *et al.*, 2016 ; Noël *et al.*, 2021). Zhang *et al.* (2022) tested how the precision of the digital elevation model used in their rockfall simulations would affect the results. It would be interesting to compare the 2 m resolution results with those from another simulation model that supports finer resolutions.

It is important to distinguish the topography of the hillslope described by the digital elevation model (DEM) from the mean obstacle heights (MOH) described by the *rg70*, *rg20* and *rg10* surface roughness maps. Rockyfor3D does not consider the heights of the roughness as geometric obstacles. Instead, it uses the ratio of the block size to the encountered roughness obstacle, randomly picked from *rg10*, *rg20* and *rg70* (with respective probabilities of being picked of 10%, 20% and 70%), to determine the tangential coefficient of restitution every time the block bounces (Dorren, 2016). On the other hand, the DEM topographically influences the direction of fall of a block as it rebounds (Dorren, 2003 ; Dorren *et al.*, 2006 ; Dorren, 2016). Passing from relatively smooth roughness of Scenario A to the coarser roughness of Scenario B, which was validated from field observations, significantly reduced the runout distances and steepened their related reach angles. This is in line with observations from Pfeiffer and Bowen (1989) and Jones *et al.* (2000).

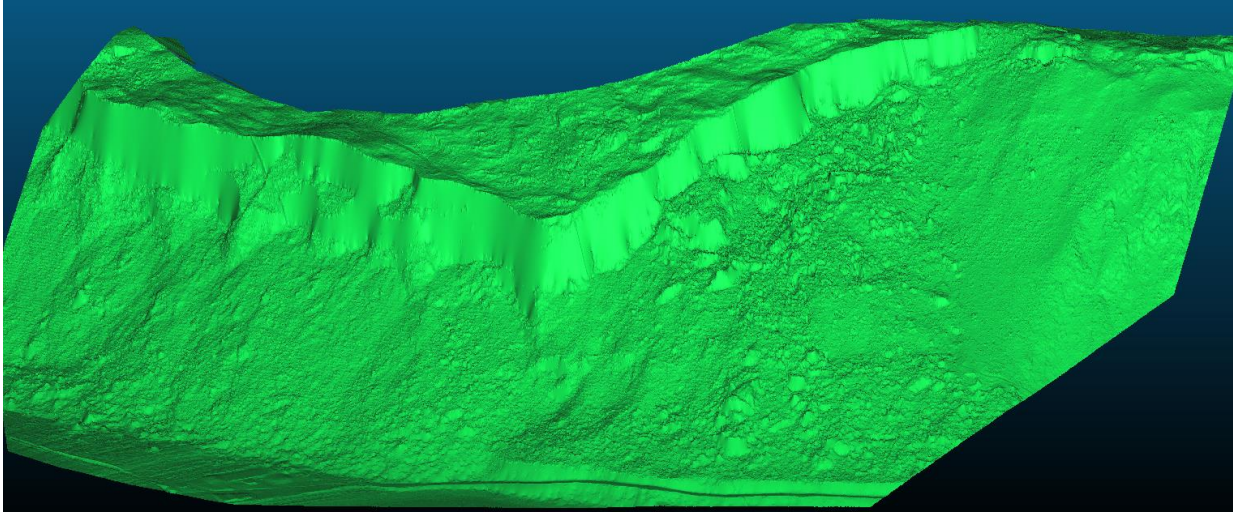


Figure 63. Three-dimensional mesh representation of the study site based on the 0.25 m resolution point cloud.

The drawing of polygons with similar roughness, the choice of 70%, 20% and 10% MOH values and the methods used to validate these MOH values are possibly limited by the potential user biases. Fortunately, the probabilistic nature of the Rockyfor3D allows flexibility in representing the height of the obstacles in each raster cell by requiring three different maps (*rg70*, *rg20* and *rg10*). However, it is possible that some of the MOH values chosen in Figure 43 might be higher than on the field. The west end of the talus slope is noted for having extremely high obstacle heights (Figure 63). For example, polygons 5, 8, 10 and 14 have mean obstacles heights above 2.5 m for *rg10*. Polygon 7, also in the west end of the talus, has very high obstacle heights; almost double those of polygon 25, which also seems to have a high level of surface roughness on the 0.25 m hillshade of Figures 42b and 43. The uncertainties in the surface roughness heights are not only limited to the western side of the talus slope. It is expected that the surface roughness be very high for polygon 1, located at the base of the talus slope, under the 1967 rockslide fracture. However, the *rg20* obstacle height of 5.56 m might be unreasonably high. The values entered for polygons 2 and 3, in the lower portion of the talus slope, might also be overestimated when compared to polygons 5 and 16 (Figure 43). These uncertainties arose after analyzing the results and led to reevaluating if the methodology used to determine the MOH values was ideal for the entire study site. The user's attention was certainly biased towards confirming the presence of the

larger and more imposing obstacles on the slope and this possible overestimation of the obstacle heights could imply a potential underestimation of the runout distances.

The goal of the field validation process is to confirm that the variability of obstacle heights best represents what is seen on the field. Adding a field validation step has a positive effect on the precision and accuracy of the simulation results (Dorren *et al.*, 2004, 2006). However, the field team was also biased towards confirming the presence of the larger and more imposing obstacles on the slope. It would have been better to have even more validation points on the field, to cover as much of the study site as possible, such as in polygons 2, 6, 12, 20, and in the upper portion of polygon 7. It would also be helpful to increase the number of measurements made at each validation point and to increase the number of validation points in the zones of higher uncertainty (polygons 5, 8, 10, 11 and 14).

The soil types chosen to describe the study site are a potential limitation to the reliability of the input raster maps (Figure 45). Particularly, the beach area located between the talus slope and the St-Lawrence River was designated as the “river” soil type. The model assumes that for the “river” soil type the normal coefficient of restitution is 0 and can be completely penetrated by the rock (Dorren, 2016). That means that the presence of water at the end of the scree slope brings the simulated boulders to a halt upon contact and we are not able to see the true maximum distance travelled on the beach at low tide. Also, upon later revision, there seems to be some areas south of the Lac à Crapauds that are, in fact, not water but the end of the talus slope, and a part of the western extremity of the talus that could have been soil type 5. The readjustment of these soil type input raster maps would modify all the maps produced.

The volume of a simulated block has a direct influence on its runout distance. Rockyfor3D has a built-in function that can randomly vary the volume of rock blocks in each source cell. However, it has been found that it is more appropriate to use predetermined volumes that are representative of the blocks found on site (Schilirò *et al.*, 2022). The three chosen volumes ( $1 \text{ m}^3$ ,  $27 \text{ m}^3$  and  $729 \text{ m}^3$ ) were selected as an approximate minimum, median and maximum of what can be found on the cliff and in the talus. It would be interesting to test different block shapes in the case of this study, such as spheres, discs and irregular shapes, to analyze the effects of shape on rockfall propagation.

Many rockfall simulation models do not consider the effect of individual trees on the trajectory of simulated rockfalls even if multiple studies have proven the protective effect of forests against rockfall hazards (Dorren *et al.*, 2006 ; Dorren *et al.*, 2007 ; Moos *et al.*, 2018b ; Moos *et al.*, 2018a). The treefile produced by the FINT tool is not required for simulation but is a significant advantage of the Rockyfor3D model. As was the case for the Saint-Fabien-sur-Mer study site, an appropriate treefile includes certain ice and rock fall couloirs that are denuded of trees due to harsh growing conditions and frequent damage (Dorren *et al.*, 2005). It is necessary to calibrate the tree file produced by FINT to ensure its representativeness, given the significant impact that tree species and diameter have on the results (Dorren *et al.*, 2007). For the entire study slope, the boundaries of the forested polygons, the interpretation of tree density and estimated percentage of coniferous trees were defined by the user and could be limitations to the precision and accuracy of the simulation results. Furthermore, the equations added to Rockyfor3D that account for trajectory deviation and energy absorption by trees were calibrated for very small rock blocks ( $\sim 1 \text{ m}^3$ ); and might not be applicable to larger rockfalls (Dorren, 2016 ; Dorren *et al.*, 2022b ; Dorren et Berger, 2006 ; Noël *et al.*, 2021).

### 3.5.2 Effects of model parameters on simulated rockfall propagation

The goal of varying the simulation parameters in a sensitivity analysis is to better understand the relative importance of the different input factors on the model output (Oberski, 2018). Overall, the 3D simulation of rockfall trajectories is fundamentally difficult because of the uncertainties associated with the internal mechanics of the rock failure and the variability of the slope (Zhang *et al.*, 2022). Very slight changes in the input parameters that describe the slope, or the block can have an important impact on the rockfall runout (Bonneau *et al.*, 2020; Farvacque *et al.*, 2019).

#### 3.5.2.1 Surface roughness and soil type

The simulation results of Scenarios A and B were compared in Figure 51 to analyze how surface roughness and soil type affect propagation. This comparison is difficult because multiple factors differentiate the two scenarios. The mean obstacle heights, the soil types but also the shape of the polygons have been altered from A to B. As expected, we found that the difference in slope

surface roughness between scenarios A and B, had a major effect on the propagation distances of the simulated rockfalls and that the runout distances were drastically lower for Scenario B. Interestingly, the difference is notably larger for smaller simulated blocks because the mean obstacle heights in the talus surpass 1 meter in scenario B and act as a barrier to the smaller blocks (Figures 51 and 53). For blocks as large as  $729 \text{ m}^3$ , the slope surface roughness has less of an impact because the boulders are able to roll over most obstacles (Francou, 1991 ; Gauthier *et al.*, 2013 ; Kirkby et Statham, 1975 ; Statham, 1976).

Previous studies found that surface roughness is one of the most sensitive parameters in rockfall trajectory simulation, but also one of the hardest to measure on the field (Dupire *et al.*, 2016a). The  $rg$  values used for Scenario B are significantly higher than those used for Scenario A; and as mentioned in 3.5.1, it could be argued that they were slightly overestimated because of the methodology used to determine the surface roughness characteristics. Nevertheless, this does not change the fact that the obstacle heights used for Scenario A are notably too low. This is illustrated in Figures 51 and 53; where simulated blocks of all three volumes have trajectories that greatly exceed the present outlying boulder line, highlighting the inadequacy of Scenario A and justifying its exclusion from the mapping in section 3.4.3.

Upon further observation of the validation maps of Figures 54, 55 and 56, it seems obvious that the surface characteristics of the western part of the slope were overestimated for Scenarios B and C because of the lack of points found at the bottom of the talus. It is important to note that the absence of points does not imply the nonexistence of data because the maps are only showing minimum energy line angles between  $20^\circ$  and  $55^\circ$ , in the three boulder deposition zones. For Scenario A, there is a band of blocks that made it to the bottom of the slope, as well as high concentrations of blocks that stopped in the upper and lower parts of the talus slope (Figure 54). For the bigger blocks of  $729 \text{ m}^3$ , the Scenario B minimum energy line angles are distributed across the upper and middle parts of the talus slope (Figure 55). For the smaller  $27 \text{ m}^3$  blocks of Scenario B, and for both block volumes of Scenario C, the minimum energy line angles are contained in the upper part of the talus slope (Figure 55 and 56). An improved results comparison could increase and decrease the input mean obstacle heights by increments of 10%, 20% and 50%; with the aim of gaining a better understanding of how surface roughness affects the results when polygon shape and soil type remain constant. Another potential improvement would be using the impact-detection

algorithm, first used by Noël *et al.*, 2021, to measure the perceived roughness by moving a rock over detailed terrain models to obtain quantified deviation values.

In scenario A, much of the talus slope is labelled as soil type 4, or a compact soil with large rock fragments (Dorren, 2016). On the other hand, scenario B (and C) has large patches of soil type 3 on the talus slope, mixed into soil type 4 (Figure 45). The coefficient of restitution is lower for soil type 3, which describes a medium compact soil with small rock fragments (Dorren, 2016). This type of softer soil type can imply a reduced rock propagation distance because of how rocks lose more energy after each rebound (Dupire *et al.*, 2016b).

It is very hard to clearly identify the boundaries of the shale cliff and talus at the western extremity of the study slope because of the soil and vegetation that has accumulated on the inclined bedrock. Some areas of the shale cliff were characterized as soil type 3, but could also have been characterized as bedrock (soil type 6) and this would have increased the resulting simulated runout distances. On the other side of the study site, south of the lake, some sections of polygon 20 (Figure 43) might have been wrongly identified as soil type 0: water (Figure 45). This could have been caused by the misrepresentation of the irregularities on the DEM and could have potentially caused an underestimation of the simulated rockfall runout.

#### 3.5.2.2 Trees

In Figure 52, the difference in simulation results for the slope with and without trees (Scenario B and C) was visualized. Our results show that the inclusion of trees into the simulations has a clear negative effect on the simulated runout distances (Figures 52 and 53). Unlike the comparison between scenarios A and B, the only difference between scenarios B and C is the presence of trees on the talus slope. Tree presence on the slope has an unquestionable diminishing effect on rockfall propagation distances for blocks of moderate volumes (Dorren *et al.*, 2007 ; Perret *et al.*, 2006 ; Stoffel *et al.*, 2006). Our results show that trees act as a barrier to rockfall propagation and reduce the simulated runout distances. The rockfall barrier effect depends on: “the size and kinetic energy of the rock, the total basal area that is available to intercept the falling rock, as well as the tree species” (Moos *et al.*, 2018 ; Volkwein *et al.*, 2011). Additionally, the height of the impact, the horizontal position of the impact on the tree and the impact angle also affects the behaviour of the block after its impact with a tree (Dorren, 2016).

The dissipation of kinetic energy is not the sole consequence of tree impacts on rockfall propagation. Trees also play a crucial role in deviating the direction of travel in the Rockyfor3D simulation model (Dorren, 2016). As seen in Scenario C of Figure 52, the convergence of many trajectories into darker lines indicating preferential paths is particularly apparent for the larger blocks (27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup>) and is suspected to be caused by the lateral deviation of rockfall trajectories caused by impacts with trees. Rockyfor3D was calibrated to simulate the effect of trees on rockfall propagation for blocks of 0.49 m<sup>3</sup> (Dorren *et al.*, 2022 ; Dorren et Berger, 2006). Noël *et al.* (2021) explained how the deviation of a rockfall's trajectory by a tree can be overestimated for larger blocks. On the field, rock blocks of greater volume (such as 729 m<sup>3</sup>) might see their kinetic energy decreased by tree impacts, but it is unlikely that their trajectory will deviate. The visible scar in the forest canopy left behind by the 2017 rockfall event casts doubt to the idea that the trajectory of a falling rock block, even of 27 m<sup>3</sup>, can be deviated by trees of this diameter (Figure 41). Farvacque *et al.* (2019) found that the protective effect of forests is limited to blocks smaller than 10 cubic meters. This raises the question of whether it is valid to extend the application of the block-tree rebound model to the larger blocks.

It is important to address how the simulated results produced in Scenario C might deviate from reality and the potential impact this could have on the susceptibility zoning of 3.4.3. The shorter predicted runout distances of Scenario C could result in an underestimation of the zones potentially exposed to rockfalls. The effect of trees could have been studied further in the Saint-Fabien-sur-Mer simulations, by varying the FINT density and diameter equations that produce the treefile (Davare, 2017). It would have been interesting to also analyze how the Rockyfor3D model responds to tree impacts for different smaller block volumes (< 5 m<sup>3</sup>) and how block dimensions are linked to the lateral deviation of trees (Dupire, 2016a).

### **3.5.3 Using 3D rockfall simulation software to support rockfall propagation zone mapping**

Two main questions emerge when simulation results are used to support rockfall propagation maps: 1. Is the model representative of the study site? 2. Which output could be used to map the zones potentially exposed to rockfall?

In an attempt to answer the first question, the input raster maps were validated on the field and a sensitivity analysis was performed to better understand how the input data affects the model. The Rockyfor3D simulation results can be validated by comparing the simulated runout distances to the position of blocks found on the field (Hantz *et al.*, 2014 ; Noël *et al.*, 2023 ; Ruiz-Carulla *et al.*, 2017). The 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile of reach angles calculated by the Rockyfor3D rockfall simulations for blocks of 27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup>, for all three scenarios (Figures 54, 55 and 56), was compared to the mean of reach angles calculated on the DEM (Figure 57). At the end of these comparisons, Scenarios B and C came out as having the closest simulated reach angle values compared to the reach angle of the blocks measured on the DEM. Scenario C is a slightly better match for bigger blocks (729 m<sup>3</sup>) even if the simulation model was not calibrated to consider tree impacts for blocks >1 m<sup>3</sup>. It is important to underline a possible limitation in the method used to extract the simulated reach angles from each zone, for each scenario. Not all minimum energy line angle values were extracted from the simulation results to generate the violin plots of Figures 54, 55 and 56. As previously mentioned, the values outside of the three predefined boulder deposition zones were excluded from the 90<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> percentile calculations as there are no boulders on the field for comparison. Keeping all the minimum energy line angle values could produce different validation results that could alter which scenario was selected for the mapping step. This could also be true for the maps presented in Figures 54, 55 and 56, which portray exclusively minimum energy line angles between 20° and 55° to minimize the visual clutter and improve the readability of the results.

It is possible that the fragmentation of blocks, which is not considered in the trajectory simulations, can explain the skewing towards more small blocks being found in-situ (Schilirò *et al.*, 2022). Ruiz-Carulla *et al.* (2017) found that there was an overestimation of the simulated runout distances because of the real-life breakage and disaggregation of the falling rock blocks that is not considered in the simulation model. On the other hand, the simulated block volumes could be set as the final deposited fragment size, that has detached from a bigger rock mass, which could underestimate the runout distances. Another useful way to validate the simulation results is to map the source and end position of known rockfall events and to compare them to the simulated trajectory of a “silent witness” block with the same dimensions in the same conditions (Dorren *et al.*, retracted preprint ; Mazengarb *et al.*, 2015).

During the Rockyfor3D rockfall simulations, multiple equations affect how the rock block reacts after each bounce. Once a block encounters a tree, the model randomly selects the angle at which the block will be deviated. However, the deviation calculation does not take into consideration the volume of the rock block, which is a possible limitation of Rockyfor3D brought up by Noël *et al.* (2021), stating that “a 500 m<sup>3</sup> rock should not be strongly deviated by a small tree”. For this reason, Noël *et al.* (2021) proposed an equation to adjust the deviation effect of tree impacts on bigger blocks. This might explain why the results are so different between Figures 58 and 59; and Figures 60 and 61. The position of the 1% line, or the line between the green and yellow zones, is much higher up on the talus for scenarios with trees (Figures 60 and 61) when compared to the 1 % line of scenarios without trees (Figures 58 and 59). It is also worth highlighting how the 1% line for blocks of 27 m<sup>3</sup> with trees is further down the talus when compared to blocks of 729 m<sup>3</sup> with trees. These incongruities might be linked to the Rockyfor3D equation that calculates the deviation and energy absorption of trees on moving rock blocks (Noël *et al.*, 2021).

As previously mentioned, the Rockyfor3D software proposes multiple statistical analysis outputs. The answer to the second question is the probability of reach, which was used with the Australian Geomechanics Society’s (AGS) susceptibility descriptor values to produce Figures 58, 59, 60 and 61. Rockfall susceptibility, as described by the AGS, is used in several other studies focused on the mapping of natural hazards (Crozier, 2013 ; Frattini *et al.*, 2008 ; Horton *et al.*, 2013 ; Parise, 2002) and, in the case of rockfall susceptibility, is defined as the probability of a rockfall reaching a specific area, given a rockfall event occurs (AGS, 2007).

The uncertainty associated with the frequency and magnitude of rockfalls potentially detaching from the Murailles escarpment makes it difficult to propose one definitive rockfall limit line. Recently, the Rockyfor3D team found that «the limit of a realistic runout lies in the range where simulated probability of reach values are between >1% and approximately 3%. As a basic rule, [...] we would recommend choosing reach probability threshold values larger than 1% and smaller than 2%» (Dorren *et al.*, retracted preprint). To stay on the more conservative side of Dorren’s recommendation, the 1% reach probability line was used in this study as a limit to the rockfall propagation zone because it also matches with the 1% of the AGS susceptibility criteria. This 1% line is represented by the boundary between the green and yellow polygons in Figures 58, 59, 60 and 61, and describes the maximum runout distance for 99% of simulated rockfall

propagation events. Interestingly, the reach probability 1% line for blocks of 729 m<sup>3</sup> in Scenario B also correlates with the deposition line of the biggest boulders found in Saint-Fabien-sur-Mer. Choosing the 1% line for Scenario B and blocks of 729 m<sup>3</sup> (Figure 59) can be seen as a conservative proposal because it has the furthest downslope limit line of the four proposed maps, and is closest to where the biggest blocks can be found on the talus.

The extraction of reach probability simulation results from fixed road sections, lots and building polygons for Scenario B and blocks 729 m<sup>3</sup> (Figure 59) allows us to describe a level of susceptibility for each polygon (Table 4). Road sections #5 to #16, and #21 to #29 are described as having a very low susceptibility (< 1%), while road sections #17 to #20 have a low susceptibility (1-25 %). There exists a danger of having a rockfall hit a moving automobile or pedestrian, block automobile circulation from the rest of the village or even cut off electricity to the eastern portion of the village if the power lines are hit. The very smooth surface roughness and steepness of the talus slope are two possible explanations to why road sections #17 to #20 are the most exposed to rockfall danger.

When looking at the extraction of reach probability data from the building polygons of Figure 49, it is interesting to specify the uses of the most exposed buildings. Building #1 is a seasonal trailer home that is disproportionately big because it includes an exterior deck that doubles its living area. Building #1 is only inhabited during the summer, and it is known that the two most frequent seasons for rockfall events are spring and fall (Birien *et al.*, 2024 ; Birien et Gauthier, 2023b ; Birien et Gauthier, 2023a ; D'Amato *et al.*, 2016 ; Matsuoka, 2001 ; Rapp, 1960a). Building #2 is an uninhabited shed and Buildings #3, #4 and #5 are seasonal rental cottages. A wall of very large boulders (~729 m<sup>3</sup>) protects these last three buildings by acting as a barrier to the propagation of smaller rockfall. The reach probability results show that for Scenario B and blocks of 729 m<sup>3</sup>; buildings #1, #4, #5, #6, #7 and #8 have a level of susceptibility described as very low, and buildings #2 and #3 have a low susceptibility.

Finally, the simulation results for Scenario B and blocks of 729 m<sup>3</sup> (Figure 59); lots #1 to #13 are considered to have a very low susceptibility to rockfall. It is reassuring to note that the seaside Lots #2, #4 and #6 are uninhabited and used as exterior seating area with picnic tables and chairs. A tennis court has been built on Lot #7 by the owners of Lot #9. As seen in Table 4, this lot

(#7) sees a lot of rockfall action in our multiple simulations; but is fortunately only visited during the summer months.

The next logical step in this study would be to explore the probability of rockfall occurrence (or probability of failure) from the Murailles escarpment. After mapping the susceptibility to rockfall results, which are based on the simulated reach probabilities, an inventory of the past and future rockfall events needs to be built. A historical rockfall inventory analysis, which describes the frequency and magnitude of past events, can give insight on future rockfall activity (Corominas et Moya, 2008 ; Hantz *et al.*, 2003 ; Hantz *et al.*, 2014). Additionally, a thorough geomechanical slope stability analysis to calculate the factor of safety of every block on the 1 km-long cliff would be very time-consuming but beneficial to understanding when and from where the next rockfall events could occur.

### 3.6 CONCLUSION

This study used the Rockyfor3D rockfall simulation model to propose zones potentially exposed to rockfalls in Saint-Fabien-sur-Mer. Three point clouds from three different remote sensing surveys were merged into a high-resolution (0.25 m) digital elevation model that was used to produce the input raster maps that were later validated on the field. A sensitivity analysis was carried out to analyze how the simulation results are affected by the variation of surface roughness values, soil types and tree presence for different simulated block volumes. The minimum energy line angle output maps were validated by comparing them to the measured reach angle of similarly sized blocks found at the bottom of the talus. The sensitivity analysis guided the selection of representative input parameters, while the validation step ensured the simulation scenario aligned closely with field observations.

Multiple studies in the literature used the reach probability output maps to draw the limit lines of the zones potentially exposed to rockfall. The reach probability results of Scenarios B and C for blocks of 27 m<sup>3</sup> and 729 m<sup>3</sup> were compared to determine which 1% line, as determined by the AGS susceptibility descriptors, adequately represents the rockfall exposition zone. The furthest of these lines is for Scenario B and blocks of 729 m<sup>3</sup> and can be seen as the worst-case scenario. It is also the 1% line that most closely matches the line of biggest boulders in the talus. The

comparison of the rockfall exposition boundary lines for these four scenarios helped provide valuable insights for the assessment and management of rockfall danger in Saint-Fabien-sur-Mer.

This research serves as an experimental case study in using 3D simulation software, the results of which demonstrate interesting potential to support planners in mapping areas potentially exposed to rock falls. This zone could one day be subject to special rules that would limit human activity in this potentially hazardous zone, such as a ban on building and or expanding present buildings. These types of rules are already in effect on Quebec lands that are exposed to coastal erosion and landslides on clay-rich soils (Québec, 2016).

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'escarpement rocheux sur le versant nord-ouest du Pic Champlain se situe au-dessus d'une partie du village de Saint-Fabien-sur-Mer. La présence d'un talus d'éboulis au pied de la paroi témoigne de l'activité géomorphologique en cours. De plus, en 1967 et 2017, des événements de chutes de pierres majeurs y ont été observés. L'objectif de cette étude de cartographier des zones potentiellement exposées aux chutes de pierres à Saint-Fabien-sur-Mer.

Premièrement, des observations par télédétection et sur le terrain, en plus d'une analyse des jeux de discontinuités, ont permis de circonscrire 26 masses de roche potentiellement instables sur le site de Saint-Fabien-sur-Mer. Leur volume varie entre 1 et 3300 m<sup>3</sup> et les modes de rupture potentiels sont le basculement et la chute. Quelques-unes de ces masses révèlent des signes d'instabilité, mais ne se situent pas nécessairement au-dessus des maisons. Cependant, certaines des masses plus volumineuses et plus fracturées pourraient représenter un enjeu. Pour y répondre, des simulations de trajectoires de chutes de pierres ont été lancées pour la paroi des Murailles à Saint-Fabien-sur-Mer. Plusieurs scénarios de simulation ont été élaborés dans Rockyfor3D, en variant les données et paramètres d'entrée, afin de choisir un scénario approprié à la cartographie des zones potentiellement exposées aux chutes de pierres. Cependant, la topographie du site, décrite par un modèle numérique de terrain, est restée constante à travers tous ces scénarios de simulation. Dans le cadre de cette étude, la taille des blocs simulés, la présence d'arbres, la hauteur des obstacles et le type de sol se sont révélés être les caractéristiques du talus qui influencent les distances de propagation des chutes de pierres. Une analyse de sensibilité a été réalisée afin de mieux comprendre les variables ayant le plus d'impact sur les distances de propagation. Afin de renforcer leur crédibilité, les résultats de simulation Rockyfor3D ont été validés en comparant les angles de parcours minimum par cellule aux angles de parcours de certains blocs trouvés sur le terrain.

Quatre cartes des zones potentiellement exposées aux chutes de pierres ont été produites en se basant sur les critères de susceptibilité à l'aléa de chutes de pierres définies par la *Australian Geomatics Society* (Figures 58, 59, 60 et 61). Ces cartes ont été générées à partir des résultats de probabilité d'atteinte issus des simulations Rockyfor3D, pour les Scénario B et C, et des blocs de 27 m<sup>3</sup> et 729 m<sup>3</sup>. Enfin, le Scénario C n'a pas été retenu, car Rockyfor3D n'est pas adéquatement calibrée pour les impacts de blocs de >1 m<sup>3</sup> contre un arbre (Dorren, 2016 ; Dorren *et al.*, 2022b ;

Dorren et Berger, 2006 ; Noël *et al.*, 2021). Le volume simulé de 729 m<sup>3</sup> a été choisi pour la cartographie finale afin de considérer la trajectoire des plus gros blocs trouvés dans le talus. Après tout, la ligne de probabilité d'atteinte de 1% du Scénario B, pour des blocs de 729 m<sup>3</sup> est suggérée comme étant la limite de la zone potentiellement exposée aux chutes de pierres (Figure 59). Finalement, l'extraction des données de probabilité d'atteinte pour chaque bâtiment, section de route et lot cadastral a permis de donner un niveau de susceptibilité à chaque élément vulnérable.

Dans les cartes des Figures 58 à 61, certaines trajectoires erratiques sont visibles dans le talus ce qui laisse présager qu'augmenter le nombre de simulations par cellule pourrait réduire la variabilité et densifier les résultats (Netti *et al.*, 2016). L'analyse des trajectoires simulées dans l'ouest du talus d'éboulis permet de constater que la rugosité du talus dans cette moitié semble très élevée. La possible surestimation des hauteurs d'obstacles dans la pente peut aussi entraîner la sous-estimation des distances de trajectoires simulées. Ce phénomène expliquerait la position en haut de talus de la ligne du 1% dans les Figures 58 et 59. Cette étude apporte des informations pertinentes sur les chutes de pierres sur le site de Saint-Fabien-sur-Mer, mettant en évidence l'importance de données précises et validées sur le terrain pour la simulation des trajectoires. Les résultats ont certaines limitations, mais pourraient éventuellement servir à la MRC Rimouski-Neigette dans leur identification des territoires présentant des contraintes naturelles.

Bien que certaines constructions et sections de route se trouvent à l'intérieur ou à proximité de la zone potentiellement exposée aux chutes de pierres, il est important de souligner que la probabilité de décrochage d'un bloc aussi volumineux dans cette zone est inconnue. Pour obtenir une évaluation plus précise de la probabilité de rupture, il est nécessaire de continuer à recueillir des données sur les événements de chutes de pierres à Saint-Fabien-sur-Mer, en vue de tracer une courbe fréquence-magnitude (Baillifard *et al.*, 2003 ; Rouiller *et al.*, 1998). Cette courbe pourrait servir à prédire la fréquence des chutes de pierres en fonction de leur magnitude, mais aussi à cartographier le risque de chute de pierre en attribuant un indice de vulnérabilité à chaque élément exposé dans le talus (Guzzetti *et al.*, 2003 ; Rouiller *et al.*, 1998).

Un suivi périodique de la paroi des Murailles pourrait inclure l'acquisition d'un relevé LiDAR (préférentiellement par drone) afin de le comparer au nuage de point de la paroi de 2018. La comparaison de nuages de points permet de détecter des différences de volumes qui seraient

décrochés lors de chutes de pierres récentes afin d'étoffer la base de données d'évènements de chutes de pierres. La datation de cicatrices d'arbres dans le talus par dendrochronologie peut également contribuer à enrichir la courbe fréquence-magnitude (Perret *et al.*, 2006). Pour finir, de futures recherches pourraient aussi explorer la simulation directement sur le nuage de points (ex. stnParabel) afin d'améliorer la précision des trajectoires simulées (Noël *et al.*, 2021).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N. J., Lim, M. et Lato, M. J. (2014). Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(1), 80-97. <https://doi.org/10.1002/esp.3493>
- Australian Geomechanics Society (AGS). (2007). *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Journal and News of the Australian Geomechanics Society.
- Azzoni, A., La Barbera, G. et Zaninetti, A. (1995). Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 32(7), 709-724. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00018-C](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00018-C)
- Badoux, A., Andres, N., Techel, F. et Hegg, C. (2016). Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), 2747-2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016>
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Rouiller, J. D. et Tosoni, D. (2001). *Matterock*. Dans Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises. Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin. (Programme, p. 70-79). Méditerranée Occidentale et Alpes Latines.
- Bédard, A. (2019). Détermination d'une zone potentiellement exposée aux chutes de pierres à Saint-Fabien-sur-Mer. *Essai dans le cadre du programme de maîtrise professionnelle (M.Sc.)*. Institut National de la Recherche Scientifique.
- Bertran, P., Clément, B., Courbouleix, S., Coussot, P., Coutard, J.-P., Jomelli, V., Hétu, B., Fabre, R., Francou, B., Le Bissonnais, Y. Meunier, M. et Texier, J.-P. (2004). Dépôts de pente continentaux. Dynamique et Faciès. Hors-série numéro 1. *Revue Quaternaire*.

- Birien, T. et Gauthier, F. (2023a). Assessing the relationship between weather conditions and rockfall using terrestrial laser scanning to improve risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(1), 343-360. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-343-2023>
- Birien, T. et Gauthier, F. (2023b). Influence of climate-dependent variables on deformation and differential erosion of stratified sedimentary rocks. *Geomorphology*, 421, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108518>
- Birien, T., Gauthier, F. et Meloche, F. (2024). Global warming impacts on rockfall frequency and magnitude due to changing frost distribution and frost cracking effectiveness. *Earth Surface Processes and Landforms*, (May), 3399-3418. <https://doi.org/10.1002/esp.5913>
- Bogaard, T. A., Antoine, P., Desvarreux, P., Giraud, A. et Van Asch, T. W. J. (2000). The slope movements within the Mondores graben (Drome, France); the interaction between geology, hydrology and typology. *Engineering Geology*, 55(4), 297-312. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00084-8)
- Bones, J. G. (1973). Process and Sediment Size Arrangement on High Arctic Talus, Southwest Devon Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, 5(1), 29-40. <https://doi.org/10.1080/00040851.1973.12003676>
- Bonneau, D. A., DiFrancesco, P. M. et Hutchinson, D. J. (2020). A method for vegetation extraction in mountainous terrain for rockfall simulation. *Remote Sensing of Environment*, 251(August), 112098. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112098>
- Bozzolo, D. et Pamini, R. (1986). Simulation of Rock Falls down a Valley Side. *Acta Mechanica*, 130, 113-130.
- Brady, B. H. G. et Brown, E. T. (2004). *Rock mechanics*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-99789-0.50014-5>

- Bunce, C. M., Cruden, D. M. et Morgenstern, N. R. (1997). Assessment of the hazard from rock fall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(3), 344-356. <https://doi.org/10.1139/t97-009>
- Caviezal, A., Lu, G., Demmel, S. E., Ringenbach, A., Bühler, Y., Christen, M. et Bartelt, P. (2019). RAMMS::ROCKFALL - a modern 3-dimensional simulation tool calibrated on real world data. *53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, (June).
- Chau, K. T., Wong, R. H. C., Liu, J. et Lee, C. F. (2003). Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(5), 383-408. <https://doi.org/10.1007/s00603-002-0035-z>
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., Mcardell, B. W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y. et Feistl, T. (2012). Integral Hazard Management Using a Unified Software Environment Numerical Simulation Tool « RAMMS ». *Congress Interpraevent*, 77-86.
- Christen, M., Bühler, Y., Glover, J., Gerber, W. et Bartelt, P. (2014). *RAMMS::ROCKFALL*, 1(April 2012).
- Cloutier, C., Turmel, D., Mayers, M., Noël, F. et Locat, J. (2017). *Projet ParaChute: Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires*, 213. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1200049.pdf>
- Copons, R. et Vilaplana, J. M. (2008). Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.020>
- Corominas, J. et Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102(3-4), 193-213. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.018>

- Crosta, G. B. et Agliardi, F. (2003). Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 176-191. <https://doi.org/10.1139/t02-085>
- Crosta, G. B. et Agliardi, F. (2004). Parametric evaluation of 3D dispersion of rockfall trajectories. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(Monitoring and modeling of landslides and debris flow), 583-598.
- Crosta, G. B., Frattini, P., Imposimato, S. et Agliardi, F. (2006). Modelling vegetation and fragmentation effects on rock falls. *Geophysical research*, 8, 7962.
- Crozier, M. (2013). Mass-Movement Hazards and Risks. *Treatise on Geomorphology*, 7, 249-258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00175-5>
- D'Amato, J., Hantz, D., Guerin, A., Jaboyedoff, M., Baillet, L. et Mariscal, A. (2016). Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 719-735. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-719-2016>
- Davare, A. (2017). *Modeling analysis of the forest function for hazard mitigation against rockfall in Col di Rocca village (Rocca Pietore BL)*. Master's Thesis. University of Padova.
- Davis, W. M. (1899). The Geographical Cycle. *The Geographical Journal*, 14(5), 481-504.
- Descoeurdes, F. et Zimmermann, T. (1987, 30 août). *Three-dimensional Dynamic Calculation of Rockfalls*. 6th ISRM Congress, ISRM-6CONGRESS-1987-061.
- Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C. et Rohmer, J. (2016). Facets : A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 799-804. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016>
- Dionne, J.-C. (1969). Note sur un éboulis récent à Saint-Fabien-sur-Mer, côte sud du Saint-Laurent. *La revue de géographie de Montréal*, 23, 365-368.

- Dixon, J. C. et Thorn, C. E. (2005). Chemical weathering and landscape development in mid-latitude alpine environments. *Geomorphology*, 67(1-2 SPEC. ISS.), 127-145. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.07.009>
- Dorren, L. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(1), 69-87. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp359ra>
- Dorren, L., Berger, F., Bourrier, F., Eckert, N., Saroglou, C., Schwarz, M., Stoffel, M., Trappmann, D., Utelli, H.-H. et Moos, C. (2022). Delimiting rockfall runout zones using reach probability values simulated with a Monte-Carlo based 3D trajectory model. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, (February), 1-23. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-32>
- Dorren, L., Berger, F., Jonsson, M., Krautblatter, M., Mölk, M., Stoffel, M. et Wehrli, A. (2007). State of the art in rockfall – forest interactions. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 158(6), 128-141. <https://doi.org/10.3188/szf.2007.0128>
- Dorren, L., Berger, F., Le Hir, C., Mermin, E. et Tardif, P. (2005). Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, 215(1-3), 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.012>
- Dorren, L., Berger, F. et Putters, U. S. (2006). Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(1), 145-153. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-145-2006>
- Dorren, L. K. A. (2016). *Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model*. ecorisQ paper ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)), 1-37.
- Dorren, L. K. A. et Berger, F. (2006). Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. *Tree Physiology*, 26(1), 63-71. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.1.63>

- Dorren, L. K. A., Moos, C. et Schaller, C. (2022). Automated delimitation of rockfall runout zones using high resolution trajectory modelling at regional scale. *EGU General Assembly 2022* (p. 12412).
- Dorren, L., Maier, B., Putters, U. S. et Seijmonsbergen, A. C. (2004). Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology*, 57(3-4), 151-167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00100-4)
- Dorren, L., Maier, B. et Seijmonsbergen, A. C. (2003). Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification. *Forest Ecology and Management*, 183(1-3), 31-46. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00113-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00113-0)
- Dorren, L. et Seijmonsbergen, A. C. (2003). Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology*, 56(1-2), 49-64. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00045-X)
- Draebing, D., Krautblatter, M. et Hoffmann, T. (2017). Thermo-cryogenic controls of fracture kinematics in permafrost rockwalls. *Geophysical Research Letters*, 44(8), 3535-3544. <https://doi.org/10.1002/2016GL072050>
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F. et Curt, T. (2016a). Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall. *Ecological Indicators*, 67, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.023>
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J. M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F. et Curt, T. (2016b). Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall. *Ecological Indicators*, 67, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.023>
- Evans, S. G. et Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 620-636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>

- Eberhart-Phillips, D., Haeussler, P. J., Freymueller, J. T., Frankel, A. D., Rubin, C. M., Craw, P., Ratchkovski, N. A., Anderson, G., Carver, G. A., Crone, A. J., Dawson, T. E., Fletcher, H., Hansen, R., Harp, E. L., Harris, R. A., Hill, D. P., Hreinsdóttir, S., Jibson, R. W., Jones, L. M., ... Wallace, W. K. (2003). The 2002 Denali fault earthquake, Alaska: A large magnitude, slip-partitioned event. *Science*, 300(5622), 1113-1118. <https://doi.org/10.1126/science.1082703>
- Eppes, M. C. et Keanini, R. (2017). Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical crack growth. *Reviews of Geophysics*, 55(2), 470-508. <https://doi.org/10.1002/2017RG000557>
- Evans, S. G. et Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 620-636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>
- Falcetta, J. L. (1985). Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux. *Revue Française de Géotechnique*, (30), 11-17. <https://doi.org/10.1051/geotech/1985030011>
- Farvacque, M., Lopez-Saez, J., Corona, C., Toe, D., Bourrier, F. et Eckert, N. (2019). How is rockfall risk impacted by land-use and land-cover changes? Insights from the French Alps. *Global and Planetary Change*, 174(June 2018), 138-152. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.009>
- Francou, B. (1991). Pentes, Granulométrie et Mobilité des Matériaux le long d'un Talus d'Eboulis en Milieu Alpin. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2(3), 175-186. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430020302>
- Frattoni, 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.037>
- Frayssines, M. et Hantz, D. (2006). Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). *Engineering Geology*, 86(4), 256-270. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.05.009>

- Gauthier, F., Hétu, B. et Bergeron, N. (2013). Impacts géomorphologiques des chutes de blocs de glace sur les versants du nord de la Gaspésie (Québec, Canada). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50(4), 406-422. <https://doi.org/10.1139/cjes-2012-0113>
- Gauthier, F., Laliberté, J. et Arnaldi, M. (2023). *Analyse des conditions propices au développement des instabilités rocheuses et élaboration d'une méthode de cartographie des zones exposées aux chutes de pierre basée sur des critères géomorphologiques à partir du cas de Saint Fabien-sur-Mer*. Rapport final. Présenté au ministère de la Sécurité publique.
- Gonzalez de Vallejo, L. I. et Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. CRC Press. ISBN 9780429065491
- Gouvernement du Québec (2016). *Guide d'utilisation des cartes de contraintes relatives aux glissements de terrain dans les dépôts meubles*. Les orientations gouvernementales en aménagement du territoire. [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement\\_territoire/orientations\\_gouvernementales/guide\\_utilisation\\_cartes\\_contraintes.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/affaires-municipales/publications/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/guide_utilisation_cartes_contraintes.pdf)
- Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V. et Guglielmi, Y. (2005). Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: Case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3), 331-349. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.11.003>
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. et Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences*, 28(9), 1079-1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)
- Hantz, D., Dussauge-Peisser, C., Jeannin, M. et Vengeon, J. M. (2003). Rock Fall Hazard Assessment : From Qualitative To Quantitative Failure Probability. *Fast Slope Movements*, 263-267.

- Hantz, D., Rossetti, J. P., Servant, F. et D'Amato, J. (2014). Etude de la distribution des blocs dans un éboulement pour l'évaluation de l'aléa. *Rock Slope Stability 2014*, Marakesh, 1(April 2014), 1-10.
- Hantz, D., Vengeon, J. M. et Dussauge-Peisser, C. (2003). An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 693-701. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-693-2003>
- Harp, E. L. et Jibson, R. W. (1995). *Inventory of landslides triggered by the 1994 Northridge, California earthquake*. <https://doi.org/10.5066/F7Z60MKF>, in Schmitt, R., Tanyas, H., Nowicki Jessee, M.A., Zhu, J., Biegel, K.M., Allstadt, K.E., Jibson, R.W., Thompson, E.M., van Westen, C.J., Sato, H.P., Wald, D.J., Godt, J.W., Gorum, T., Xu, C., Rathje, E.M., Knudsen, K.L., 2017, An Open Repository of Earthquake-triggered Ground Failure Inventories, U.S. Geological Survey data release collection, <https://doi.org/10.5066/F7H70DB4>.
- Heim, A. (1932). *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz & Wasmuth.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Rocscience. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.14.1.55>
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B. et Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4), 869-885. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-869-2013>
- Hudson, J. A. et Harrison, J. P. (1997). *Engineering Rock Mechanics*. Elsevier.
- Hungr, O., Evans, S. G. et Hazzard, J. (1999). Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2), 224-238. <https://doi.org/10.1139/t98-106>

- ISRM. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses contents. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319-368. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91472-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91472-9)
- Jaboyedoff, M. (2003). Case study: Visite des gorges du Tarn. *Quanterra*.
- Jaboyedoff, M. et Labiouse, V. (2003). Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *10th ISRM Congress*, 575-578.
- Jaboyedoff, M. et Labiouse, V. (2011). Technical note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 819-828. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-819-2011>
- Jeffreys, H. (1932). Scree Slopes. *Geological Magazine*, 69(8), 383-384. <https://doi.org/10.1017/S0016756800098046>
- Jones, C. L., Higgins, J. D. et Andrew, R. D. (2000). *Colorado Rockfall Simulation Program 4.0*.
- Karfunkel, J., Addad, J., Banko, A. G., Hadrian, W., & Hoover, D. B. (2001). Electromechanical disintegration - An important weathering process. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 45(3), 345-357. <https://doi.org/10.1127/zfg/45/2001/345>
- Keylock, C. et Domaas, U. (1999). Evaluation of Topographic Models of Rockfall Travel Distance for Use in Hazard Applications. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 31(3), 312-320. <https://doi.org/10.1080/15230430.1999.12003314>
- Kim, B. H., Cai, M., Kaiser, P. K. et Yang, H. S. (2007). Estimation of block sizes for rock masses with non-persistent joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 40(2), 169-192. <https://doi.org/10.1007/s00603-006-0093-8>
- Kim, D. H., Gratchev, I., Berends, J. et Balasubramaniam, A. (2015). Calibration of restitution coefficients using rockfall simulations based on 3D photogrammetry model: a case study. *Natural Hazards*, 78(3), 1931-1946. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1811-x>

- King, C. (1957). The uniformitarian nature of hillslopes. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 17(1), 81-102. <https://doi.org/10.1144/transed.17.1.81>
- Kirkby, A. M. J. et Statham, I. (1975). Surface Stone Movement and Scree Formation. *The University of Chicago Press*, 83(3), 349-362.
- Kobayashi, Y., Harp, E. L. et Kagawa, T. (1990). Simulation of rockfalls triggered by earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/BF01020418>
- Krautblatter, M. et Dikau, R. (2007). Towards a uniform concept for the comparison and extrapolation of rockwall retreat and rockfall supply. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 89(1), 21-40. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2007.00305.x>
- Krautblatter, M., Moser, M., Schrott, L., Wolf, J. et Morche, D. (2012). Significance of rockfall magnitude and carbonate dissolution for rock slope erosion and geomorphic work on Alpine limestone cliffs (Reintal, German Alps). *Geomorphology*, 167-168, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.007>
- Gigli, G., Morelli, S., Fornera, S. et Casagli, N. (2014). Terrestrial laser scanner and geomechanical surveys for the rapid evaluation of rock fall susceptibility scenarios. *Landslides*, 11(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0374-0>
- Lambert, S., Bourrier, F. et 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.029>
- Lambert, S. et Nicot, F. (2013). *Rockfall Engineering. Rockfall Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9781118601532>
- Lan, H., Derek Martin, C. et Lim, C. H. (2007). RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computers and Geosciences*, 33(2), 262-279. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.013>

- Li, L. et Lan, H. (2015). Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(4), 1163-1176. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0718-9>
- Loye, A., Jaboyedoff, M. et Pedrazzini, A. (2009). Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(5), 1643-1653. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1643-2009>
- Luckman, B. H. (1976). Rockfalls and rockfall inventory data: Some observations from surprise valley, Jasper National Park, Canada. *Earth Surface Processes*, 1(3), 287-298. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010309>
- Marija, L., Martin, Z., Jordan, A. et Matthew, P. (2022). *Rockfall susceptibility and runout in the Valley of the Kings*. *Natural Hazards* (vol. 110). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04954-9>
- Mateos, R. M., García-Moreno, I., & Azañón, J. M. (2012). Freeze-thaw cycles and rainfall as triggering factors of mass movements in a warm Mediterranean region: The case of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). *Landslides*, 9(3), 417–432. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0290-8>
- Matsuoka, N. (1994). Diurnal freeze–thaw depth in rockwalls: Field measurements and theoretical considerations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19(5), 423-435. <https://doi.org/10.1002/esp.3290190504>
- Matsuoka, N. (2001). Direct observation of frost wedging in alpine bedrock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(6), 601-614. <https://doi.org/10.1002/esp.208>
- Matsuoka, N. et Sakai, H. (1999). Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods. *Geomorphology*, 28(3-4), 309-328. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00116-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00116-0)

- Matsuoka, N. (2008). Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps: Long-term (1994-2006) observations. *Geomorphology*, 99(1-4), 353-368. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.11.013>
- Manger, G. E. (1963). Porosity and Bulk Density of Sedimentary Rocks. *Geological Survey Bulletin* 1144-E.
- Mazengarb, C., Stevenson, M. D. et Knight, K. (2015). The Mount Wellington rock fall event of 8 July 2014 described; with implications for MRT rock fall modelling methodology. *Tasmanian Geological Survey Record* 2015/02.
- Moos, C., Bebi, P., Schwarz, M., Stoffel, M., Sudmeier-Rieux, K. et Dorren, L. (2018a). Ecosystem-based disaster risk reduction in mountains. *Earth-Science Reviews*, 177(December), 497-513. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.011>
- Moos, C., Fehlmann, M., Trappmann, D., Stoffel, M. et Dorren, L. (2018b). Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis – Two case studies in Switzerland. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 32(June 2017), 55-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.09.036>
- Netti, T., Castelli, M. et De Biagi, V. (2016). Effect of the Number of Simulations on the Accuracy of a Rockfall Analysis. *Procedia Engineering*, 158, 464-469. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.473>
- Noël, F., Cloutier, C., Jaboyedoff, M. et Locat, J. (2021). Impact-detection algorithm that uses point clouds as topographic inputs for 3d rockfall simulations. *Geosciences (Switzerland)*, 11(5), 1-36. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050188>
- Noël, F., Cloutier, C., Turmel, D. et Locat, J. (2016). Using point clouds as topography input for 3D rockfall modeling. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 3, 1531-1535. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21520-189>

- Noël, F., Nordang, S. F., Jaboyedoff, M., Digout, M., Guerin, A., Locat, J. et Matasci, B. (2023a). Comparing Flow-R, Rockyfor3D and RAMMS to Rockfalls from the Mel de la Niva Mountain: A Benchmarking Exercise. *Geosciences*, 13(7), 200. <https://doi.org/10.3390/geosciences13070200>
- Noël, F., Nordang, S. F., Jaboyedoff, M., Travelletti, J., Matasci, B., Digout, M., Derron, M. H., Caviezel, A., Hibert, C., Toe, D., Talib, M., Wyser, E., Bourrier, F., Toussaint, R., Malet, J. P. et Locat, J. (2023b). Highly energetic rockfalls: back analysis of the 2015 event from the Mel de la Niva, Switzerland. *Landslides*, 20(8), 1561-1582. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02054-2>
- Noël, F. (2016). Cartographie semi-automatisée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires. *Mémoire de maîtrise (M. Sc.)*. Université de Laval.
- Noël, F. (2021). *stnParabel user manual*. [https://stnparabel.org/guide/en/docs/user\\_manual/index.html](https://stnparabel.org/guide/en/docs/user_manual/index.html)
- Noetzli, J., Hoelzle, M. et Haeberli, W. (2003). Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: a GIS-based approach to determine critical factors. *Permafrost*, 2, 827-832.
- Nordang, S. F. (2017). *Analyse av stabilitet og utløpslengde for moglege steinskred frå fjellside ved Sjøåsberget*, 213.
- Oberski, D. L. (2018). Sensitivity analysis. *Cross-Cultural Analysis: Methods and Applications, 2nd Edition*, 593-614. <https://doi.org/10.4324/9781315537078>
- OFEV. (2016). Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. *L'environnement pratique* n° 1608, 98.
- Parise, M. (2002). Landslide hazard zonation of slopes susceptible to rock falls and topples. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1-2), 37-49. <https://doi.org/10.5194/nhess-2-37-2002>

- Pasquier, J. B., Fleury, J., Besson, O. et Rouiller, J. D. (2003). Zonage du danger de chutes pierres à partir de simulations trajectographiques 3D: expérience du Canton du Valais. *Mémoires de la Société vaudoise des sciences naturelles* 25.
- Pauly, J. C. et Payany, M. (2002). Méthodologies mises en œuvre pour la cartographie de l'aléa lié aux instabilités rocheuses sur un bassin géographique: Cas des gorges du Tarn et de la Jonte (Lozère). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (236).
- Pellicani, R., Spilotro, G. et Van Westen, C. J. (2016). Rockfall trajectory modeling combined with heuristic analysis for assessing the rockfall hazard along the Maratea SS18 coastal road (Basilicata, Southern Italy). *Landslides*, 13(5), 985-1003. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0665-3>
- Pérez, F. L. (1989). Talus Fabric and Particle Morphology on Lassen Peak, California. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 71(1), 43-57.
- Perret, S., Stoffel, M. et Kienholz, H. (2006). Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps - A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology*, 74(1-4), 219-231. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.009>
- Penck, W. (1924). *Die Morphologische Analyse*. Stuttgart.
- Pfeiffer, T. J. et Bowen, T. D. (1989). *Computer simulation of rockfalls*. *Bulletin - Association of Engineering Geologists*, 26(1), 135-146. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxvi.1.135>
- Pfeiffer, T. J. et Higgins, J. D. (1990). Rockfall hazard analysis using the Colorado rockfall simulation program. *Transportation Research Record*, 1288(4), 117-126.
- Phillips, M., Wolter, A., Lüthi, R., Amann, F., Kenner, R. et Bühler, Y. (2017). Rock slope failure in a recently deglaciated permafrost rock wall at Piz Kesch (Eastern Swiss Alps), February 2014. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), 426-438. <https://doi.org/10.1002/esp.3992>

- Price, M. F., Byers, A. C., Friend, D. A., Kohler, T. et Price, L. W. (2013). *Mountain Geography*. University of California Press.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. *Choice Reviews Online* (vol. 31). <https://doi.org/10.5860/choice.31-0957>
- Quanterra. (2003). User's Guide CONEFALL 1.0.
- Gouvernement du Québec. (2016). *Glissements de terrain dans les dépôts meubles guide d'utilisation des cartes de contraintes relatives aux glissements de terrain*, 11.
- Rapp, A. (1960a). Recent Development of Mountain Slopes in Kärkevagge and Surroundings, Northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 42(2-3), 65-200. <https://doi.org/10.1080/20014422.1960.11880942>
- Rapp, A. (1960b). Talus slopes and mountain walls at Tempelfjorden, Spitsbergen. *Norsk PolarInstitutts Skrifter*, 119, 125. <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/173865>
- Roering, J. J. et Hales, T. C. (2013). Changing Hillslopes: Evolution and Inheritance; Inheritance and Evolution of Slopes. *Treatise on Geomorphology: Volume 1-14*, 1-14, 284-305. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00178-0>
- Rouiller, J.-D., Jaboyedoff, M., Marro, C., Philipposian, F. et Mamin, M. (1998). *Pentes instables dans le Pennique valaisan, MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels*. Rapport final PNR 31.
- Ruiz-Carulla, R., Corominas, J. et Mavrouli, O. (2017). A fractal fragmentation model for rockfalls. *Landslides*, 14(3), 875-889. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0773-8>
- Schilirò, L., Robiati, C., Smeraglia, L., Vinci, F., Iannace, A., Parente, M. et Tavani, S. (2022). An integrated approach for the reconstruction of rockfall scenarios from UAV and satellite-based data in the Sorrento Peninsula (southern Italy). *Engineering Geology*, 308(March). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106795>

- Selby, M. J. (1982). Controls on the stability and inclinations of hillslopes formed on hard rock. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7, 449-467.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, New York. 480 pp.
- Statham, I. (1976). A scree slope rockfall model. *Earth Surface Processes*, 1(1), 43-62. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010106>
- Stead, D. et Wolter, A. (2015). A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology*, 74, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002>
- Stevens, W. D. (1998). *RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls*, 143.
- Stock, G. M., Luco, N., Collins, B. D., Harp, E. L., Reichenbach, P. et Frankel, K. L. (2014). *Quantitative rock-fall hazard and risk assessment for Yosemite Valley, Yosemite National Park, California*. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2014–5129.
- Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L. K. A., Perret, S. et Kienholz, H. (2006). Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *Forest Ecology and Management*, 225(1-3), 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.030>
- TVA Nouvelles (2017, 10 novembre). Une immense roche bloque une route à Saint-Fabien-sur-Mer [Photographie]. <https://www.tvanouvelles.ca/2017/11/10/une-immense-roche-bloque-une-route-a-saint-fabien-sur-mer>
- Vo, D. T. (2015). *RAMMS :: Rockfall versus Rockyfor3D in rockfall trajectory simulations at the Community of Vik , Norway*. Master's Thesis in Geosciences. University of Oslo.
- Volkwein, A. et Klette, J. (2014). Semi-automatic determination of rockfall trajectories. *Sensors (Switzerland)*, 14(10), 18187-18210. <https://doi.org/10.3390/s141018187>

- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L., Gerber, W. et Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - A review. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(9), 2617-2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>
- Walberg, N. A. K. (2013). *Landslide Hazard Mapping in Norddal , Møre og Romsdal*. Master's Thesis in Geosciences. University of Oslo.
- Wakasa, S. A., Nishimura, S., Shimizu, H., & Matsukura, Y. (2012). Does lightning destroy rocks?: Results from a laboratory lightning experiment using an impulse high-current generator. *Geomorphology*, 161–162, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.005>
- Wieczorek, G. F. et Jäger, S. (1996). Triggering mechanisms and depositional rates of postglacial slope-movement processes in the Yosemite Valley, California. *Geomorphology*, 15(1), 17-31. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00112-I](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00112-I)
- Wieczorek, G. F., Morrissey, M. M., Iovine, G. et Godt, J. W. (1998). *Rock-fall hazard in the Yosemite Valley*. USGS Report.
- Wieczorek, G. F., & Snyder, J. B. (1999). Rock falls from Glacier Point above Camp Curry, Yosemite National Park, California. US Geological Survey Open-File Report 99-385, 95389, 1–12.
- Wood, A. (1942). The development of hillside slopes. *Proceedings of the Geologists' Association*, 53(3-4), 128-140. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(42\)80019-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(42)80019-X)
- Wyllie, D. C. (2014). *Rock fall engineering: development and calibration of an improved model for analysis of rock fall hazards on highways and railways*. PhD Thesis. University of British Columbia.
- Wyllie, D. C. et Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: civil and mining 4th edition*. Spon Press. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

- Žabota, B. et Kobal, M. (2020). A new methodology for mapping past rockfall events: From mobile crowdsourcing to rockfall simulation validation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi9090514>
- Zhang, W., Zhao, X., Pan, X., Wei, M., Yan, J. et Chen, J. (2022). Characterization of high and steep slopes and 3D rockfall statistical kinematic analysis for Kangyuqu area, China. *Engineering Geology*, 308(July), 106807. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022>.

