

Projet ParaChute: Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires

Rapport technique 05- Rapport final
LERN-ParaChute-2017-02

Auteurs
Catherine Cloutier
Dominique Turmel
Mélanie Mayers
François Noël
Jacques Locat

*Laboratoire d'études sur les risques naturels
Département de géologie et de génie géologique, Université Laval*

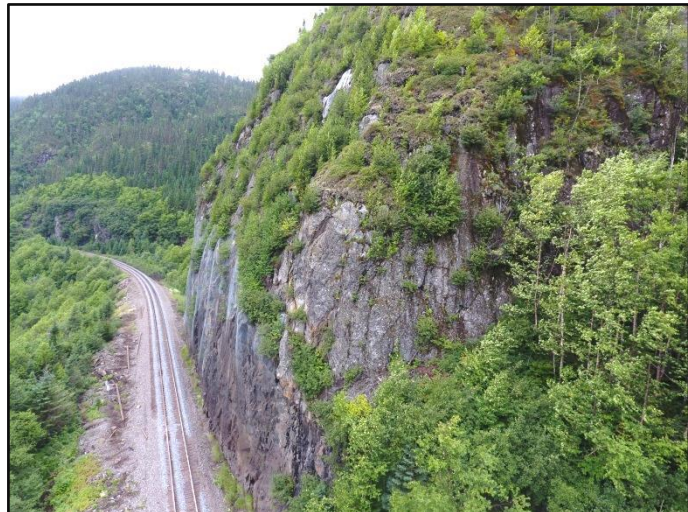
Pour
Pierre Gionet
ArcelorMittal Infrastructure Canada s.e.n.c

Chantal Jacob
Service du transport ferroviaire et
Pierre Dorval
*Service de la géologie et de la géotechnique
Ministère des Transports, de la Mobilité durable
et de l'Électrification des transports du Québec*



UNIVERSITÉ
LAVAL

Photographie prise à l'été 2016 à partir du drone d'une paroi rocheuse constituée d'une coupe de roc et d'escarpements naturels. Les deux types de parois sont caractérisés par l'outil développé dans le projet ParaChute: la Méthode d'Évaluation du Danger Chute de Pierres



Juin 2017

Les partenaires financiers du projet ParaChute



*Transports,
Mobilité durable
et Électrification
des transports*



Avant-propos

Le projet de recherche *ParaChute* sur le *Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires* a été réalisé au Laboratoire d'Études sur les Risques Naturels du Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval (LERN). Nous tenons à remercier particulièrement Monsieur Pierre Gionet et ses collègues d'ArcelorMittal Infrastructure, Chantal Jacob, François Bossé et Pierre Dorval du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec ainsi que Michel Jaboyedoff de l'Université de Lausanne pour leur aide à la réalisation d'un projet exceptionnel qui s'est déroulé harmonieusement. Sans leur aide inestimable, ce projet n'aurait pu se dérouler dans les délais impartis.

Divers ateliers, dont un s'est tenu à Port-Cartier en juin 2016, ont eu lieu au cours du projet et lors desquels l'avancement des travaux a pu être constaté et les informations préliminaires partagées et discutées. De plus, une journée de discussion a eu lieu lors de l'atelier final en avril 2017 tenu suite à une première version du rapport final soumise en mars 2017. De plus, deux rencontres (mai 2016 et avril 2017) ont eu lieu à Port-Cartier afin de permettre le transfert de connaissances auprès des éventuels utilisateurs des résultats du projet *ParaChute* chez ArcelorMittal Infrastructure.

Les auteurs du présent rapport n'ont porté aucun jugement sur les aspects de probabilité ou de risque acceptable qui serait relié du danger de chutes de pierres le long de la voie ferrée de la compagnie ArcelorMittal Infrastructure. Il en va du ressort d'ArcelorMittal Infrastructure d'utiliser les résultats obtenus dans la cadre du projet *ParaChute* et cela en fonction de leurs critères opérationnels tout en optimisant l'utilisation des divers outils développés dans le cadre du projet *ParaChute* dont le MEDCP et de toute la banque de données qui l'accompagne.

Les informations contenues dans ce rapport ainsi que les outils qui ont été développés dans le cadre du projet *ParaChute* ont été établis dans un contexte de recherche scientifique afin de soutenir ArcelorMittal Infrastructure et le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec dans leur démarche respective visant à l'évaluation et la réduction du danger posé par les chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires (routes et voies ferrées). Les auteurs de ce rapport, et l'Université Laval, ne peuvent pas être tenus responsables pour quelque dommage que ce soit résultant d'une utilisation autorisée ou non de ces informations.

Sommaire exécutif

Le projet de recherche ParaChute sur le *Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires* a été réalisé au Laboratoire d'Études sur les Risques Naturels du Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval et s'est déroulé sur une période de trois ans. Il a été réalisé de concert avec ArcelorMittal Infrastructure et le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Le territoire étudié est celui bordant la voie ferrée reliant Port-Cartier à Fermont, de sa portion du sud jusqu'au Monts Groulx.

La Méthode d'Évaluation du Danger de Chutes de Pierres (MEDCP) permet de reconnaître, caractériser et catégoriser les parois rocheuses situées le long d'un corridor de transport par rapport à leur potentiel à générer des chutes de pierres qui pourraient se propager jusqu'à l'infrastructure. Cette méthode s'intègre à la gestion des risques naturels et aide à déterminer les cibles prioritaires d'intervention, pour augmenter la sécurité des usagers et réduire les conséquences découlant de chutes de pierres.

Le MEDCP distingue deux types de parois rocheuses: (1) les coupes de roc bordant l'infrastructure et (2) les secteurs de parois éloignées qui sont des falaises rocheuses généralement naturelles situées à plus de 20 m de l'infrastructure. Les secteurs de parois éloignées sont souvent hors du champ de vision lorsque l'on circule sur l'infrastructure. L'incorporation systématique des parois éloignées est un élément novateur du MEDCP en comparaison aux systèmes de classification existants et appliqués par diverses agences internationalement.

Le MEDCP a été appliqué à l'ensemble du territoire étudié et comprend les étapes ci-dessous.

1. Acquisitions de scan laser aéroportés et de photographies aériennes sur une bande de largeur permettant d'incorporer les bassins versants se drainant vers l'infrastructure. Le modèle numérique de terrain (MNT) obtenu est essentiel à l'application du MEDCP;
2. Acquisitions de scan laser mobile (MLS) à partir d'un véhicule circulant sur l'infrastructure. Ces données ont été utilisées à plusieurs étapes d'application du MEDCP et elles permettent de réduire l'incertitude et le temps d'évaluation terrain;
3. Cartographie morphostructurale du territoire formant une base de connaissances sur la morphologie et les matériaux de surface, utile à divers volets liés à la gestion d'un territoire;
4. Évaluations pré-terrain
 - a. Inventaire d'un total de 425 coupes de roc (à partir du MNT et MLS), caractérisation géométrique (hauteur, longueur, inclinaison, orientation, dimension des fossés), analyse structurale des familles de discontinuités sur nuages de points MLS et tests cinématiques permettant d'évaluer la faisabilité des modes de rupture planaire, dièdre et basculement, puis classification préliminaire réalisés au bureau et en préparation aux évaluations terrain;
 - b. Reconnaissance des 73 secteurs de parois éloignées (à partir du MNT) par l'analyse de simulations de trajectoires de chutes de pierres réalisées de manière systématique et semi-automatisée sur tout le territoire. Puis, caractérisation géométrique (hauteur, longueur, inclinaison, orientation) et classification préliminaire basée sur le nombre de trajectoires atteignant l'ouvrage.
5. Visite de terrain
 - a. Évaluation visuelle de paramètres influençant les chutes de pierres pour toutes les coupes de roc, incluant la reconnaissance des mécanismes de rupture;

- b. Acquisition systématiques de photographies des coupes de roc et des parois éloignées à pied, à partir d'un drone ou d'un hélicoptère afin de créer des modèles par reconstruction photogrammétrique.
6. Détermination du Danger MEDCP (D_{MEDCP})
- La valeur numérique, qui permet de classer les parois rocheuses, est obtenue de la multiplication de deux termes prenant une valeur entre 0 et 1 : le potentiel de rupture et le potentiel d'atteinte. Si l'un des deux est 0, cela signifie que la paroi n'est pas prioritaire, car soit qu'elle est peu susceptible à générer des chutes de pierres, ou que les chutes de pierres ne peuvent pas atteindre l'infrastructure.
- a. Potentiel d'atteinte des coupes de roc : efficacité des fossés évaluée par des abaques et par certains critères visuels
 - b. Évaluation du potentiel d'atteinte des parois éloignées par des simulations de trajectoires numériques
 - c. Évaluation du potentiel de rupture des coupes de roc et des parois éloignées par des évaluations visuelles sur le terrain et sur photographies;
 - d. Une catégorie de priorité définie en fonction des valeurs du D_{MEDCP} est associée à chacune des parois rocheuses.

La méthode permet aussi de considérer l'effet de la mitigation sur la diminution du danger (paramètre M). Les conséquences potentielles associées à une chute de pierres à une certaine paroi pourraient être évaluées par le gestionnaire et permettre de départager les parois se trouvant à l'intérieur d'une même catégorie. Toutes les données et résultats sont disponibles dans une base de données accessible à l'aide de systèmes d'informations géospatiales (SIG).

Table des matières

Avant-propos.....	v
Sommaire exécutif	vii
1. Introduction	1
2. Objectifs.....	5
2.1. Objectifs généraux	5
2.2. Objectifs spécifiques	5
3. Retombées.....	7
4. Méthodologie.....	11
4.1. Acquisition de données de télédétection.....	11
4.2. Photogrammétrie.....	13
4.2.1. Principes.....	14
4.2.2. Méthodes d'acquisition	16
4.3. Carte morphostructurale	18
4.3.1. Le drainage.....	19
4.3.2. Le système de classification des motifs (adapté de Cruden et Thomson 1987)	19
4.3.3. L'assemblage des motifs : la carte morphostructurale	20
4.4. Inventaire, nomenclature et classification préliminaire des parois rocheuses.....	21
4.5. Identification des falaises éloignées comme sources potentielles de chutes de pierres	24
4.5.1. Localisation des falaises éloignées (les sources).....	24
4.5.2. Choix du logiciel de simulation de la trajectométrie 3D	25
4.5.3. Paramètres nécessaires à la simulation de la trajectométrie à l'aide de Rockyfor3D	25
4.5.4. Reconnaissance et classement des falaises potentiellement dangereuses	27
4.6. Analyses des parois rocheuses sur nuages de points.....	29
4.6.1. Caractérisation géométrique d'une surface	30
4.6.2. Caractérisations géomécaniques des massifs rocheux.....	30
4.6.3. Évaluation des modes de ruptures sur nuages de points (travaux de maîtrise de Mélanie Mayers).....	31
4.6.4. Caractérisation visuelle.....	33
4.6.5. Extraction de profil et calcul de volumes	33
4.6.6. Calcul de la distance de visibilité	34
4.7. Évaluation pré-terrain	35
4.8. Travaux de terrain	35
4.8.1. Validation de la structure rocheuse et des modes de ruptures.....	36
4.8.2. Observations des paramètres affectant la stabilité.....	36
4.8.3. Photogrammétrie	39
4.8.4. LiDAR terrestre	39
4.8.5. Distance de visibilité	40
4.9. Développement du MEDCP-SIG	40
4.9.1. Retour sur la littérature	40
4.9.2. Objectifs et approche adoptée du MEDCP-SIG	48
4.9.3. Évaluation du potentiel d'atteinte attribué aux secteurs de parois éloignées (A_{SE})	53
4.9.4. Évaluation du potentiel de rupture attribué aux secteurs de parois éloignées (S_{SE})	56
4.9.5. Évaluation du potentiel d'atteinte attribué aux coupes de roc (A_{CR})	61
4.9.6. Évaluation du potentiel de rupture attribué aux coupes de roc (S_{CR})	66
4.9.7. Intégration des paramètres liés aux conséquences et à la vulnérabilité	70
4.9.8. Présentation cartographiques du D_{MEDCP}	72
5. Structure de la base de données	111
5.1. Hiérarchie	111
5.2. Données non-géoréférencées	111
5.3. Données géoréférencées	112

6.	Résultats	117
6.1.	Carte morphostructurale	117
6.1.1.	Exemples de cartographie morphostructurale	117
6.1.2.	Application : cartes thématiques	118
6.2.	Reconnaissance et caractérisation des parois éloignées	118
6.2.1.	Reconnaissance initiale des parois éloignées pertinentes	119
6.2.2.	Potentiel d'atteinte des secteurs de parois éloignées (A_{SE})	123
6.2.3.	Potentiel de rupture des secteurs de parois éloignées (S_{SE})	124
6.3.	Inventaires et caractérisation des coupes de roc	126
6.3.1.	Reconnaissance et inventaire	126
6.3.2.	Potentiel d'atteinte des coupes de roc (A_{CR})	126
6.3.3.	Potentiel de rupture des coupes de roc (S_{CR})	128
6.4.	Aperçu des glissements rocheux pouvant impliquer des volumes supérieurs aux chutes de pierres	129
6.4.1.	Exemples de ruptures en masse du massif rocheux	130
6.4.2.	Commentaire sur le potentiel d'atteinte	132
6.4.3.	Éléments d'aide à la gestion des parois rocheuses	132
6.5.	Classification MEDCP	133
6.5.1.	Danger MEDCP des secteurs de parois éloignées ($D_{MEDCP, SE}$)	133
6.5.2.	Danger MEDCP des coupes de roc ($D_{MEDCP, CR}$)	134
7.	Discussions	181
7.1.	Parois éloignées	181
7.2.	Coupes de roc	181
7.2.1.	Potentiel d'atteinte (A_{CR})	182
7.2.2.	Potentiel de rupture (S_{CR})	183
7.3.	Classification MEDCP	186
7.3.1.	Classification préliminaire vs classement MEDCP	186
7.3.2.	Comparaison avec les autres systèmes de type RHRS	186
7.3.3.	Combinaison des secteurs de parois éloignées et des coupes de roc ($D_{MEDCP, SE}$ et $D_{MEDCP, CR}$)	188
7.3.1.	Illustration de l'intégration du terme <i>Conséquence et Vulnérabilité (C&V)</i>	188
7.4.	Outils d'aide à la gestion des parois rocheuses	189
8.	Conclusions	199
8.1.	Conclusion sur les objectifs généraux	199
8.2.	Conclusion sur les objectifs particuliers	202
9.	Recommandations	207
9.1.	Scientifiques	207
9.2.	Opérationnelles	207
9.3.	Pour l'application du MEDCP aux routes	208
10.	Remerciements	208
11.	Références	209
12.	Annexes	213

Liste des tableaux et des illustrations

Tableau 4-1. Taille des données de télédétection telles que livrées par Groupe Info Consult.	13
Tableau 4-2. Critères proposés dans le RHRS original pour effectuer la classification préliminaire des coupes de roc.	23
Tableau 4-3. Paramètres de la pré-classification des coupes développés pour le Projet ParaChute	24
Tableau 4-4. Paramètres de la fiche en développement par l'équipe du MTQ telle qu'elle était en mai 2015 et utilisée lors des travaux de l'été 2015 par le LERN.	38
Tableau 4-5. Présentation des cote terrain telles qu'attribuées lors des travaux de terrain (première colonne) suivie des modifications numériques effectuées pour l'affichage graphique et la comparaison avec les catégories MEDCP qui seront présentées à la section 4.9.	39
Tableau 4-6. Paramètres et critères du RHRS de base (Pierson 2012).	42
Tableau 4-7. Grille d'évaluation des paramètres du système du Colorado (CRHRS) tirée de Pierson et Turner (2012).	43
Tableau 4-8. Reproduction du tableau présentant les paramètres évalués pour déterminer la valeur du facteur géologique du système de classification de l'état de New York (Pierson et Turner 2012).	44
Tableau 4-9. Valeurs associées au terme RF (Reproduction du tableau 1 de Pritchard et al. 2005).	45
Tableau 4-10. Un exemple de pointages (Lacasse 2008) associés à des mots permettant de qualifier la probabilité d'occurrence d'un certain scénario, par exemple, l'occurrence d'une chute de pierres de 5 m ³ sur une certaine coupe de roc sur une période de 50 ans.	53
Tableau 4-11. Relation entre le pointage de la densité des sources et le coefficient de pondération utilisé.	60
Tableau 4-12. Angles des lignes d'énergie calculées à partir des résultats des abaques de Pierson et al. (2001) pour les trois géométries de fossés et les cinq inclinaisons de coupes de roc. La distance de propagation correspondant à une efficacité de 99% a été utilisé. La valeur minimale est de 22°, celle maximale de 76°.	64
Tableau 4-13. Valeur attribuée au facteur de pondération en fonction de la dimension des parois rocheuses (F_{SUP}).	69
Tableau 4-14. Cote terrain et hauteurs des cent coupes pour lesquelles la fiche MTQ n'a pas été saisie au cours des travaux de terrain.	70
Tableau 5-1. Structure de la base de données associée aux parois rocheuses et aux secteurs de parois éloignées.	111
Tableau 6-1. Nombre de coupes de roc associées aux six valeurs que peut prendre le facteur de pondération en fonction de la superficie F_{SUP}	128
Tableau 6-2. Quantité de coupes de roc classées dans chacune des cinq classes de priorité, pour tout le secteur étudié et par canton. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de coupes dans ce canton.	136
Tableau 7-1. Évaluation de l'efficacité de deux fossés dont les dimensions les situent près de la limite des critères de sélection de la forme du fossé, soit de 1V:4H ou de 1V:6H. Cette limite est un ratio largeur sur profondeur de 4. L'abaque pour une paroi de 18.29 m de hauteur et incliné à 76° a été utilisé.	183
Tableau 7-2. Évaluations de onze parois réalisées à un an d'intervalle par deux évaluateurs différents.	185
Tableau 7-3. Divers scénarios testés pour l'application du facteur de pondération pour la superficie des coupes de roc (F_{SUP}).	185
Tableau 7-4. Nombre de coupes de roc par plage de superficie pour les quatre scénarios de F_{SUP}	185

Tableau 8-1. Présentations du projet ParaChute lors de divers congrès.....	201
--	-----

Figure 1.1. Carte de localisation de la voie ferrée d'ArcelorMittal au Québec et de ses principaux camps et tunnels pour les cantons d'Able à Kay.....	3
Figure 1.2. Planification temporelle du projet ParaChute présentée dans le devis de recherche.....	4
Figure 4.1. Illustration de nuages de points acquis avec le LiDAR sur rail (couleur bleue) et en photogrammétrie (couleurs réelles), montrant des zones non visibles ou des zones masquées par la végétation.....	75
Figure 4.2. Coupe d'un modèle photogrammétrique, extraite sur une largeur de 0.5 m, d'une paroi montrant le bruit élevé (à gauche) et le bruit un peu moins grand (à droite) après filtrage des données.....	75
Figure 4.3. Principaux types de drainage possibles dans la région du projet ParaChute.....	76
Figure 4.4. Exemple d'un drainage angulaire dans le canton Eva.....	77
Figure 4.5. Exemple de drainage parallèle et plus ou moins perpendiculaire à la voie ferrée dans le canton Kay. Ce même patron semble se développer tout autour du massif central de la figure pour pratiquement former un ensemble annulaire.....	77
Figure 4.6. Exemple d'un réseau penné dans des dépôts fluvioglaciers fortement ravinés (portion centrale de l'image). L'image vient du canton Item.....	78
Figure 4.7. Composantes et légende du système de classification des motifs de la carte morphostructurale, (a): légende de la grille d'interprétation; (b) et (c) code de classification des motifs autre que le drainage. ...	79
Figure 4.8. Exemple d'un motif et de ses attributs réalisés pour le projet ParaChute et illustrant son intégration dans QGIS.....	80
Figure 4.9. Exemple d'attribution des noms de coupes de roc lorsqu'une paroi est continue.....	80
Figure 4.10. Sommets automatiquement identifiés pour le PM 50.3. Les sommets identifiés avec les seuils de 40, 60 et 80 ° sont respectivement représentés en bleu, vert et rouge.....	81
Figure 4.11. À gauche, représentation des types de terrain qui varient en fonction des pentes. À droite, série de modèles numériques de terrain à pente variable sur lesquels les caractéristiques de terrain ont été automatiquement attribuées aux pentes par les outils développés en fonction des paramètres retenus. Les valeurs de coefficient de restitution tangentiel (R_t) sont estimées d'après les équations de Rockyfor3D pour les paramètres de terrain concernés, pour des particules cubiques de 30 cm de côté et de masse volumique de 2800 kg/m ³ et des impacts à des vitesses correspondant à celles obtenues après une chute libre verticale de 20 m sur une surface inclinée à 45°.....	81
Figure 4.12. Trajectoires simulées au Cap-Tourmente avec les paramètres utilisés pour le projet ParaChute selon les trois scénarios pour l'identification des zones sources en sommet de falaise. En a), le modèle numérique de terrain en relief ombragé est représenté en 3D avec la position du pied du talus d'éboulis identifiée au GPS représentée par des points blancs. Les points noirs correspondent aux blocs exceptionnels ayant dépassé le talus d'éboulis qui ont été observés sur le terrain. En b), c) et d), le nombre de trajectoires passant en chaque pixel est représenté par le large spectre de couleurs. Les sources à partir desquelles les trajectoires sont simulées sont représentées par les points rouges. Celles-ci sont attribuées aux sommets des parois rocheuses pour les seuils de 40, 60 et 80 ° respectivement en b), c) et d). Notez qu'un faible nombre de trajectoires (1-5) passant par un pixel colore ce dernier en blanc rose très peu saturé, ce qui s'apparente beaucoup au gris du relief ombragé.....	82
Figure 4.13. Représentation en 3D sous forme de nuage de point (à droite) du secteur du PM 50 visible sur la photographie de gauche. La variable des coefficients de restitution tangentiels est affichée sur les points	

en différentes couleurs. Le choix des paramètres peut facilement être ajusté lorsque les résultats produits par les outils ne correspondent pas aux types de terrains observés. La visualisation en 3D facilite les étapes de validation des résultats et la calibration des paramètres.	82
Figure 4.14. Carte de la compilation des observations sur nuages de points avec les sommets de falaise classifiés pour les deux derniers scénarios (60 ° et 80 °) représentés par les tracés colorés. Les points milliaires sont indiqués au niveau de la voie en guise d'échelle et de repères.	83
Figure 4.15. Deux pentes de même dénivelé sont représentées, l'une plutôt abrupte en a) et l'autre moins abrupte (en b), avec une pente légèrement supérieure à 40°. Le modèle numérique de terrain (MNT) matriciel (raster) est une représentation à plat des terrains. Ceux-ci sont subdivisés en sections d'aire à plat égale (pixel). Ces divisions égales sont ici représentées avec leurs projections au niveau du sol. Les pixels ayant une pente égale ou supérieure à 40° sont représentés en rouge. Deux pixels sont identifiés dans le cas de la falaise (en a) alors que 5 pixels sont identifiés dans le cas de la pente moyennement abrupte (en b). La surface réelle des terrains ne peut donc pas être correctement représentée par les modèles numériques de terrain.	84
Figure 4.16. Extraction d'un profil topographique, indiqué par une ligne pointillée jaune d'un nuage de points de la paroi rocheuse du PM 150 (a) pour réaliser des simulations de trajectoire 2D (b et c) à l'aide du logiciel RocFall de Rocscience (2016)(c). Ces simulations ont été réalisées avec des paramètres arbitraires pour démontrer l'utilité des nuages de points, par conséquent, le résultat (en b et c) est invalide.	84
Figure 4.17. Reconnaissance et caractérisation des familles de discontinuités dans le logiciel Coltop 3D sur nuage de points photogrammétriques. Au centre de l'image, le nuage est affiché avec les couleurs de la photographie, soit les valeurs rgb (rgb pour red, green and blue) attribuées aux points. Le reste de la figure présente les points colorés en fonction de leur pendage et direction de pendage selon la charte de couleur affichée dans le stereonet en haut à droite.	85
Figure 4.18. Modes de ruptures dans le roc a) rupture planaire, b) rupture en dièdre, c) rupture par basculement et d) rupture circulaire (Tirée de Wyllie et Mah 2004).	85
Figure 4.19. Critères évalués par les tests cinétiques pour les modes de ruptures planaire, dièdre et par basculement.	86
Figure 4.20. Représentation 3D d'une paroi rocheuse sur laquelle une analyse cinématique pour les glissements plans a été réalisée pour une discontinuité donnée et ce sur chacun des points. Les orientations des plans sont présentées selon la convention pendage/direction de pendage.	86
Figure 4.21. Ensemble des modes de rupture considérés dans l'analyse cinématique et les calculs de susceptibilité se produisant dans les pentes et en surplomb.	87
Figure 4.22. Représentation 3D d'une paroi rocheuse sur laquelle a) une analyse cinématique pour tous les modes de ruptures et pour toutes les familles de discontinuités a été réalisée sur chacun des points et b) l'analyse de la susceptibilité a été appliquée sur les modes de ruptures.	88
Figure 4.23. Définition et évaluation de volumes pouvant potentiellement basculer au PM 150. a) et b) Photographies du bas de la paroi, prises de la voie ferrée, où les trois volumes sont indiqués en bleu, brun et vert. c) Modèle photogrammétrique réalisé à partir des photographies prises du drone. d) Gros plan du secteur encadré en c) avec les plans ajustés aux fractures ouvertes. L'espace ainsi formé est rempli de prismes rectangulaires verts qui sont générés pour calculer le volume. e) Modèle photogrammétrique avec les plans ajustés aux fractures lors de l'opération de calcul d'un volume. Le nuage photogrammétrique est peu détaillé dans la partie sommitale du plan violet ce qui crée de l'incertitude par rapport à la définition géométrique du bloc rocheux.	89
Figure 4.24. Schéma de l'évaluation numérique de la distance de visibilité maximale.	90

Figure 4.25. Exemple de fiche remplie avant le terrain indiquant les résultats de l'analyse structurale avec Coltop et des tests cinématiques.	91
Figure 4.26. Exemple de fiche de terrain.	92
Figure 4.27. Approche générale menant à l'évaluation du D_{MEDCP} et leur catégorisation en niveau de priorité. Les secteurs de parois éloignées et les coupes de roc sont évalués en utilisant des techniques différentes, mais les paramètres évalués et l'équation générale du MEDCP est la même pour les deux types de parois. Les conséquences et la vulnérabilité permettent de différencier des parois d'une même catégorie de priorité.	93
Figure 4.28. Illustration des étapes du MEDCP menant à l'évaluation des secteurs de parois éloignées. Entre parenthèses, les données, et parfois les logiciels, nécessaires à l'analyse sont indiquées. MNT : modèle numérique de terrain; MLS : nuages de points obtenus de scans laser mobiles sur rail; LAS : nuages de points obtenus de scans laser aéroportés.	94
Figure 4.29. Illustration des étapes du MEDCP menant à l'évaluation des coupes de roc. Entre parenthèses, les données, et parfois les logiciels, nécessaires à l'analyse sont indiquées. MNT : modèle numérique de terrain; MLS : nuages de points obtenus de scans laser mobiles sur rail.	95
Figure 4.30. Différences d'une même géométrie de fossé mais avec un MNT avec des pixels de 1 m de côté et l'un avec des pixels de 0,5 m de côté.	96
Figure 4.31. Comparaison de l'effet de la largeur du maillage. En a) le maillage est au 1 m tandis qu'en b) le maillage est au 0,50 m.	96
Figure 4.32. Les différents types de sommets d'escarpement qui peuvent être identifiés. En jaune (a), on a les premiers sommets des coupes rencontrés en partant de la voie ferrée. Au-dessus de ceux-ci, on retrouve parfois un second niveau de la coupe et les sommets associés, illustré ici en vert (b). Il y a ensuite les sommets ambigus où il est difficile de déterminer s'ils sont naturels ou simplement le prolongement de la coupe, ici en bleu (c). Finalement, il y a les sommets des falaises naturelles, ici pour de petites falaises en rouge (d).	97
Figure 4.33. Illustration montrant l'effet de l'orientation de la grille (pour la rasterisation) sur le nombre de pixels interceptés par l'élément linéaire.	97
Figure 4.34. Comparaison des pourcentages d'atteinte obtenus avec la méthode par pixel et la méthode par trajectoire pour les 69 secteurs comparables (les cinq tunnels sont retirés), ici avec les valeurs classées par pourcentage d'atteinte croissant de la méthode par pixel. Les résultats de ceux-ci ont été utilisés pour établir la pondération à appliquer pour que la méthode par trajectoire approche la méthode par pixel.	98
Figure 4.35 Exemple de secteurs avec des pointages du paramètres $F_{DENSITE}$ de 3, 9, 27 et 81.	99
Figure 4.36. Combinaisons d'inclinaison et de hauteur de parois pour lesquelles un abaque de l'efficacité des fossés est disponible dans Pierson et al. (2001) et distribution de coupes de roc du projet ParaChute. Les abaques sont disponibles pour les fossés de trois géométries : fossé plat (absence de fossé), 1V:6H et 1V:4H.	100
Figure 4.37. Reproduction d'un des abaques de Pierson et al. (2001) pour une coupe de roc de 24.4 m de hauteur et inclinée à 76°. L'histogramme présente les largeurs de fossés mesurées pour les parois de plus de 26 m de haut. La fréquence relative de l'histogramme exprimée en % correspond aux valeurs de l'axe des y, mais inversées, e.g.: 90=10%, 95=5%.	101
Figure 4.38. Reproductions des abaques de Pierson et al. (2001) mettant en relation le pourcentage de blocs retenus dans un fossé en fonction de sa largeur. a) Les courbes des parois inclinées à 76° pour un fossé de 1V:6H sont rapportées sur un même graphique, afin de montrer l'influence de la hauteur de la paroi sur la capacité de rétention. b) Les courbes des parois de 24.4 m de haut avec un fossé de 1V:6H	

sont représentées sur un même graphique pour montrer l'influence de l'inclinaison de la paroi sur la capacité de rétention.....	102
Figure 4.39. Définition de la ligne d'énergie formant un cône pouvant être atteint par des chutes de pierres se détachant de la paroi rocheuse (tirée de Noël 2016).	103
Figure 4.40. Calcul de l'angle de la ligne d'énergie reliant le haut d'une coupe au bloc s'étant le plus propagé. Cet exemple est fait pour un fossé plat. Les paramètres de l'équation 4.17 y sont représentés (h, L1, L2 et θ).....	103
Figure 4.41. Abaques modifiés de Pierson et al. (2001) a) fosse de captage de 1V:6H et b) fossé plat.	104
Figure 4.42. Matrice de décision du choix de l'abaque de Pierson et al. (2001) à utiliser.....	105
Figure 4.43 Exemple de profils de parois rocheuses de 26 m de haut et plus où l'inclinaison générale et celle de la ligne d'énergie sont calculées.....	106
Figure 4.44. Distribution du pointage de chacun des paramètres de la fiche MTQ saisie pour 300 coupes de roc.....	106
Figure 4.45. Histogrammes des pointages attribués aux treize paramètres de la fiche MTQ pour les coupes de roc avec des cotes terrain de 1 à 5 (histogrammes de gauche) et de 11 à 13 (histogrammes de droite). Si le paramètre reflète bien la susceptibilité à la rupture d'une coupe de roc, il devrait y avoir une proportion plus importante de 27 et de 81 dans l'histogramme de gauche que dans celui de droite.....	107
Figure 4.46. Hauteurs de coupes ayant reçues des cote terrain de 1 à 5 (a) et de 11 à 13 (b). Aucune coupe qui fait moins de 10 m de haut s'est vu attribuée une cote terrain de plus de 5. Les coupes jugées les moins prioritaires (cotes terrain de 11 à 13) sont en général moins hautes. Celles de 17 m et de 30 m de haut sur l'histogramme b, sont deux parois situées relativement loin de la voie ferrée, donc avec des probabilités d'atteinte faible et c'est pour cette raison qu'elles sont cotées de 11 à 13. Les histogrammes en c et d présentent les longueurs des mêmes coupes de roc.....	108
Figure 4.47. Distribution des superficies des coupes de roc évaluées comme étant l'aire d'un triangle en utilisant la hauteur maximale et la longueur des parois mesurées à partir du MNT. Les limites des catégories de facteurs de pondérations (F_{SUP}) sont indiquées par les lignes verticales pointillées.....	109
Figure 4.48 Démonstration de l'effet de F_{SUP} sur la valeur du potentiel de rupture (S_{CR}).....	110
Figure 5.1. Histogramme montrant l'année où des événements ont été notés dans l'historique.	115
Figure 5.2. Histogramme du nombre d'événements par cantons.	115
Figure 6.1. Carte générale du secteur à l'étude montrant les différents secteurs couverts par la carte morphostructurale.	137
Figure 6.2. Exemple du contrôle de la roche en place sur le drainage (canton Baker).....	138
Figure 6.3. Illustration de la trace laissée par l'écoulement glaciaire sur le substratum rocheux par l'érosion directe la roche en place sous la forme de roches moutonnées ainsi que par la mise en place de moraine fuselée. Tout est orienté vers le sud et n'est pas ici influencé par la structure de la roche en place (canton Georges).	139
Figure 6.4. Exemple de dépôts morainique (till) formé principalement de sables et de graviers (au centre de la figure, T(G)-V) et qui est fortement disséqué par du ravinement (V).	140
Figure 6.5. Exemple spectaculaire de dépôts fluvioglaciaires de contact de glace mis en place lors de la déglaciation du territoire. On y retrouve un esker le long duquel d'autres dépôts fluvioglaciaires de contact de glace ont été mis en place. La proximité de la glace lors de la déposition est mise en évidence par la présence de multiples kettles (lacs plus ou moins circulaires) (canton Item).....	141
Figure 6.6b. Exemple de carte thématique montrant un dépôt de colluvions associé aux débris provenant d'une falaise rocheuse.	143

Figure 6.7. Sommets automatiquement identifiés pour le PM 50.3. Les sommets identifiés avec les seuils de 40°, 60° et 80° sont respectivement représentés en bleu, vert et rouge.	144
Figure 6.8. Sommets automatiquement identifiés pour les secteurs des environs des PM 151 (à gauche) et 152 (à droite). Les sommets identifiés avec les seuils de 40°, 60° et 80° sont respectivement représentés en bleu, vert et rouge. On remarque aussi que les pixels au niveau des pentes abruptes couvrent une plus grande surface que ceux des pentes moins importantes.	144
Figure 6.9. Carte des coefficients de restitution tangentiels correspondant aux rugosités de terrain automatiquement identifiés par les outils développés en fonction des classes de pentes choisies pour le secteur du PM 50.3. Pour les valeurs de Rn (coefficients de restitution normaux se référer à la fig. 4.11).	145
Figure 6.10. Différents résultats des simulations pour le PM 50.3 pour le scénario des sources identifiées aux sommets avec un seuil de 60°. En a), photographie du secteur en guise de référence. En b), l'accumulation des blocs simulés est représentée par les pixels colorés en rouge. En c), le nombre de trajectoires passant en chaque pixel est représenté par le large spectre de couleurs. Les sources à partir desquelles les trajectoires sont simulées sont représentées par les points noirs. En d), la vitesse maximale des trajectoires en chaque pixel est représentée, avec les couleurs froides correspondant aux faibles vitesses et les couleurs chaudes aux vitesses élevées.	146
Figure 6.11. Lignes d'énergies des trajectoires simulées avec les sources identifiées avec un seuil de 60°, pour le secteur du PM 50.3.	147
Figure 6.12. Histogramme compilant l'ensemble des trajectoires simulées atteignant l'ouvrage en chaque mètre pour les trois scénarios de sources (avec des seuils de 40°, 60° et 80°). Le secteur du PM 50 est indiqué par une flèche. Le large secteur peu affecté par les trajectoires entre les miles 100 et 145 correspond principalement aux cantons How et Item et est suivi par les canyons où il y a de nombreuses atteintes. Le terme « simulation 2 » utilisé ici dans le titre correspond aux simulations réalisées en plaçant les sources aux sommets, contrairement à la « simulation 1 » réalisée sur l'ensemble des terrains en plaçant les sources au niveau des pentes abruptes et non présentée dans ce rapport.	147
Figure 6.13. Histogramme des trajectoires simulées atteignant l'ouvrage en chaque mètre pour les trois scénarios de source. Secteur agrandi pour montrer le mile du PM 50. Le nombre de trajectoires croisant l'ouvrage provenant du premier scénario, avec les sources identifiées pour un seuil de 40°, est représenté par les barres bleues. Celles représentées par les barres vertes correspondent au second scénario, utilisant un seuil de 60°. Celles représentées par les barres rouges correspondent au troisième scénario, utilisant un seuil de 80° pour définir les sommets des falaises pour l'emplacement des sources.	148
Figure 6.14. Nombre de trajectoires passant en chaque pixel (à gauche) avec la classification des sommets de falaise associée pour les environs du PM 50 (à droite). Elle se base sur l'analyse des trajectoires atteignant l'ouvrage, faite à l'aide des histogrammes et des cartes des trajectoires pour les scénarios de sources avec les seuils de 60° et 80°. Les sommets produisant des trajectoires simulées qui atteignent l'ouvrage sont classés en fonction du nombre de trajectoires au niveau de l'ouvrage. Plus le nombre est élevé et plus la catégorie s'approche de 1 (fig. 6.16).	148
Figure 6.15. Récapitulatif des critères de classification arbitraires des parois rocheuses en fonction du nombre de trajectoire atteignant l'ouvrage vis-à-vis la paroi.	149
Figure 6.16. Répartition des secteurs de parois éloignées par canton.	149
Figure 6.17. Analyse des traces éventuelles de chutes de pierres sur nuage de points brut (avec les arbres) provenant des données LiDAR aéroportées du secteur du PM 50.3. L'observation des données brutes permet d'atteindre un niveau de détail supérieur par rapport aux données rastérisées (MNT). Il est possible	

d'y observer la taille des arbres et leur densité, de même que les blocs en pied de falaise. Ici, la végétation est peu mature (petits feuillus) et éparpillée au niveau du talus d'éboulis. Les portions agrandies sont réalisées à partir des données brutes. Elles sont cependant observées par en dessous afin de faire ressortir le sol sous la végétation et les éventuelles fissures subverticales. Les flèches noires pointent ici ce qui semble être des fissures ouvertes et des blocs désolidarisés.150

Figure 6.18. Résultats des analyses trajectographiques au PM 157.5. La figure (a) montre la position de départ et la position d'arrivée des blocs, la figure (b) montre l'énergie relative qu'ont ces blocs. La figure (c) montre les densités de trajectoires des blocs. Les images a et c pour chacun des secteurs de parois éloignées se trouvent dans l'annexe «Atteinte_Secteurs_Eloignes.pdf»151

Figure 6.19 Histogramme du potentiel d'atteinte des parois éloignées en fonction du nombre de coupes pour les méthodes par pixel et par trajectoires.152

Figure 6.20. Les potentiel d'atteinte obtenus ne semblent pas dépendent du dénivelé (disques noirs) des secteurs éloignés, ni de la distance horizontale maximale séparant les crêtes de la voie ferrée (cercles rouges).....152

Figure 6.21. Une corrélation est obtenue entre le potentiel d'atteinte et le rapport dénivelé sur distance moyenne entre la paroi et la voie ferrée.....153

Figure 6.22. Une faible corrélation est trouvée entre le classement préliminaire des crêtes formant les secteurs éloignés en fonction du potentiel d'atteinte du secteur éloigné.154

Figure 6.23 Distribution des pointages attribués aux paramètres du potentiel de rupture (S_{SE}) pour les 73 secteurs de parois éloignées.154

Figure 6.24 Ce graphique présente l'impact sur le classement de (S_{SE}) de la multiplication par le facteur de correction de la densité de parois ($F_{DENSITE}$). En croix grises, la valeur du terme Y_{SE} est mise en graphique en ordre décroissant. Puis, le résultat de la multiplication de Y_{SE} par $F_{DENSITE}$ (S_{SE}) est présenté par les carrés noirs, dans le même ordre séquentiel que les croix grises. Le désordre apparent des carrés noirs met l'emphase sur les parois qui ont changé de place dans le classement séquentiel. Puis, S_{SE} est mis en graphique en fonction de son ordre décroissant (carrés bleus). Les carrés noirs et bleus sont les mêmes valeurs, mais ordonnées différemment.155

Figure 6.25 Présentation des résultats du classement de S_{SE}156

Figure 6.26. Histogrammes et courbes de fréquence cumulée de la hauteur (a) et la longueur (b) des 425 parois répertoriées.157

Figure 6.27. Rosette présentant la direction de pendage des coupes de roc répertoriées. La direction de pendage indique le côté où fait face les parois.158

Figure 6.28. Cette figure présente le nombre de coupes de roc répertoriées par canton ainsi que la densité de coupes par mile à l'intérieur du canton.158

Figure 6.29. Histogrammes présentant la répartition des pointages de 3, 9, 27 et 81 attribués aux deux paramètres utilisés pour l'évaluation du potentiel d'atteinte des coupes de roc: a) Présence de trempins et b) Taille des blocs et volume disponible. La définition des critères associés aux pointages sont indiquées au tableau 4-4, section 4.8.2.....159

Figure 6.30. Histogrammes présentant les efficacités de fossés évaluées pour les parois de plus de 26 m de haut. En a, l'évaluation est faite à partir des abaques non-modifiés de Pierson et al. (2001), soit des abaques pour des coupes de 24.4m de haut. En b, l'évaluation est faite à partir des abaques modifiés par le principe des lignes d'énergie. Ce sont les valeurs en b qui sont utilisées dans le calcul du potentiel d'atteinte (A_{CR}).159

Figure 6.31. Histogrammes de l'efficacité des fossés de toutes les coupes de roc étudiées (a) et de celles de plus de 6 m de haut (b).	160
Figure 6.32. Distribution du potentiel d'atteinte des 425 coupes de roc étudiées. Elles sont présentées en ordre séquentiel de gauche à droite de la plus faible valeur (#425) à la plus grande valeur (#1). b) Histogramme du potentiel d'atteinte des 425 coupes de roc étudiées.	161
Figure 6.33. Présentation des valeurs de S_{CR} par un histogramme (a), par la distribution en ordre décroissant sur une échelle linéaire (b) et logarithmique (c) de S_{CR} .	162
Figure 6.34. Schéma général du projet ParaChute et la portion reliée aux grand mouvements de terrain rocheux encadrée en bleu.	163
Figure 6.35. Illustration des modes de ruptures dans un massif rocheux (tiré de Hoek et Bray 1981).	164
Figure 6.36. Exemple d'une coupe (a) où le mode de rupture est clairement identifiable (planaire) et (b) à la coupe de roc (E7 W, PM 69.1) il ne l'est pas et on y trouve surtout des surplombs (mode associé surtout à des chutes de pierres, Mayers 2017).	165
Figure 6.37. Schéma simplifié d'une rupture planaire d'un bloc sur un plan incliné à un angle Ψ et illustrant le rôle de l'eau (U et V) ainsi que celui de l'ajout d'une force d'ancrage (T)(modifié d'après Hoek et Bray 1981).	166
Figure 6.38. Rupture planaire potentielle au PM 72.95 dans le secteur Eva; (a) : photographie d'une partie de la coupe de roc et une surface pannaire bien visible (famille 1m) sur laquelle des ancrages ont été placés, (b) : stéréonet des principales familles de discontinuités et (c) image du nuage de points analysé avec Coltop et qui présente les plans associés aux principales familles de discontinuités observées sur la paroi. On notera en bleu pâle les surfaces sur lesquelles une rupture planaire pourrait se développer.	167
Figure 6.39. Rupture par dièdre potentielle au PM 71.82 dans le secteur Eva; (a) : photographie d'une partie de la coupe de roc, (b) : stéréonet des principales familles de discontinuités et (c) image du nuage de points analysé avec Coltop et (d) image en nuage de points obtenus par le Lidar terrestre lesquels présentent les plans associés aux principales familles de discontinuités observées sur la paroi. On notera en bleu pâle (2m) et en vert (3m) les principales familles de discontinuités qui permettent le développement de ruptures dièdre sur la paroi.	168
Figure 6.40. Illustration des conditions permettant une rupture pas basculement pour un seul bloc. Les blocs en rouge indiquent les conditions géométriques le permettant.	169
Figure 6.41. Rupture par basculement potentielle au PM 90.55 dans le secteur Fox; (a) : photographie d'une partie de la coupe de roc, (b) : stéréonet des principales familles de discontinuités et (c) image du nuage de points analysé avec Coltop et qui présente les plans associés aux principales familles de discontinuités observées sur la paroi. On notera en bleu la famille de discontinuités fortement pentue qui s'appuie sur celle en jaune qui est de faible pendage.	170
Figure 6.42. Présentation des résultats du classement $D^b_{MEDCP, SE}$. Les barres verticales de couleur indiquent les limites des catégories de priorité. Les coupes de priorité 1 sont celles situées à droite de la ligne verticale rouge située à l'abscisse 0.1. L'histogramme indique le nombre de parois par catégorie de priorité.	171
Figure 6.43 Mise en graphique du potentiel de rupture en fonction du potentiel d'atteinte des secteurs de parois éloignées. La grosseur du symbole représente le pointage associé aux paramètres incertitude. Les disques de plus grand diamètre sont associés au pointage de 81.	172
Figure 6.44. Exemple de représentation graphique du MEDCP pour les secteurs éloignés, avec la table attributaire montrant une partie de l'information disponible pour chacun des secteurs éloignés.	173
Figure 6.45. Exemple de fiche récapitulative de l'évaluation MEDCP pour les secteurs éloignés.	174

Figure 6.46. Résultats du classement MEDCP pour les coupes de roc. Le graphique présente $D_{MEDCP, CR}^b$ en fonction du classement séquentiel. Les barres verticales de couleur indiquent les limites des catégories de priorité. Les coupes de priorité 1 sont celles situées à droite de la ligne verticale rouge située à l'abscisse 0.1. L'histogramme indique le nombre de parois par catégorie de priorité.	175
Figure 6.47. Figure similaire à la figure 6.46, mais uniquement pour le canton Able.....	176
Figure 6.48. Figure similaire à la figure 6.46, mais uniquement pour le canton Jig avec agrandissement des coupes ayant la plus haute priorité.	177
Figure 6.49. Histogrammes de la catégorisation des coupes de roc résultant de l'inspection de 2009 (a) par Golder et ass. (2009), de la cote attribuée sur le terrain lors des travaux du projet ParaChute (b)(Cloutier et al. 2016) et de l'application du MEDCP (c).	178
Figure 6.50. Effet de l'application du facteur M sur le nombre de coupes de roc par catégorie de priorité..	178
Figure 6.51. Effet de l'application du facteur M sur le classement séquentiel des coupes de roc. Les annotations indiquent, pour certaines coupes avec mitigation, le changement de position dans le classement, e.g. -20 indique que la coupe est passée de la 10 ^e à la 30 ^e position.....	179
Figure 6.52. Exemple de représentation graphique du MEDCP pour les coupes de roc.....	180
Figure 7.1. Secteur de parois éloignées du secteur des canyons dans le canton de Jig. À cet endroit, les secteurs sont en continu.	191
Figure 7.2. Trajectographie du secteur J PM154.3. Deux escarpements dont les trajectoires n'atteignent pas la voie ferrée sont identifiés.	191
Figure 7.3. Classement obtenu pour onze parois évaluées par deux évaluateurs différents à un an d'intervalle.....	192
Figure 7.4. Pour chacune des classes préliminaires, un histogramme présente le nombre de coupes de roc qui ont été catégorisées dans chacune des cinq classes de priorité du MEDCP.	193
Figure 7.5. Ordre séquentiel obtenu par l'application de la méthode RHRS aux coupes de roc du projet ParaChute en fonction du classement séquentiel obtenu par le MEDCP. Si le même classement était obtenu des deux systèmes, les points du graphique s'aligneraient sur une droite inclinée à 45°, ce qui est la tendance observée.	193
Figure 7.6. Ce graphique présente que les 50 coupes avec les scores RHRS les plus élevés et est le même que celui de la figure précédente. Les annotations indiquent la valeur du potentiel d'atteinte évalué par le MEDCP (A_{CR}).....	194
Figure 7.7. Intégration des D_{MEDCP}^b des secteurs de parois éloignées et des coupes de roc. Les secteurs de parois éloignées sont symbolisés en rouge. Les plages de valeurs sont les mêmes pour les deux types de parois.	195
Figure 7.8. Ce graphique met en relation les D_{MEDCP} des coupes de roc de catégorie 1 avec la visibilité moyenne calculée à partir du MNT au droit des coupes de roc. Les coupes de roc situées dans la portion supérieure du graphique sont celles dont la visibilité est la plus faible, et donc, où l'opérateur de locomotive dispose d'une distance plus courte pour appliquer les freins avant d'atteindre l'endroit où une chute de pierres se serait immobilisée sur la voie ferrée.....	196
Figure 7.9. Organigramme du projet ParaChute et les éléments liés aux conséquences (encadré vert) et à la gestion (encadré bleu).	197
Figure 7.10. Approche suggérée quant à l'utilisation des outils de gestion dans la réduction du danger posé par les chutes de pierre le long de la voie ferrée d'ArcelorMittal.....	198

1. Introduction

Dans un effort global de réduction des conséquences des chutes de pierres, des chercheurs du Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN) de l'Université Laval, de concert avec le Ministère des Transports de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) et ArcelorMittal Infrastructure Canada s.e.n.c., ci-après nommé ArcelorMittal, collaborent dans le cadre du projet *ParaChute* visant à intégrer divers outils modernes d'analyse du territoire, afin d'offrir une «parade» permettant de réduire les risques associés aux chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires. L'Université de Lausanne a aussi contribué aux avancées faites par le projet *ParaChute*.

L'infrastructure choisie pour développer de tels outils est celle du chemin de fer d'ArcelorMittal qui relie Port-Cartier au Mont Wright (fig. 1a). Le secteur étudié (fig. 1b), celui où l'on retrouve divers problèmes de mouvements de terrain, se situe dans les premiers 220 km à partir de Port-Cartier jusqu'à la limite nord des Monts Groulx, où la voie ferrée traverse des terrains escarpés. La zone d'étude, de par sa situation géographique, est aussi un lieu qui permet d'apprécier les impacts potentiels des changements climatiques sur les dangers associés à divers types de mouvements de terrain.

Du point de vue historique, il est important de rappeler ici que le projet *ParaChute* a été précédé du projet Charlevoix. Ce dernier considérait, d'un point de vue général, plusieurs types d'aléas de mouvements de terrain. Le projet Charlevoix a servi de laboratoire initial au développement de la méthode de cartographie morphostructurale qui sera détaillée plus loin. Il a aussi été le tremplin à partir duquel plusieurs idées ont été développées et incorporées dans le projet *ParaChute*. Le rapport final du projet Charlevoix a été soumis en mai 2013 (Locat et al. 2013b) et peu de temps après, des discussions ont été entreprises entre ArcelorMittal Infrastructure, le MTMDET et l'Université Laval afin de continuer le développement des connaissances en mettant sur pied un projet de recherche qui considérerait principalement la thématique des chutes de pierres. Une fiche du projet *ParaChute* était soumise au processus interne d'évaluation du MTMDET dès décembre 2013. Le premier contrat a été signé avec ArcelorMittal le 11 septembre 2014 et le 10 mars 2015 par le MTMDET. Le coût total du projet *ParaChute* est de 1 270 564\$ assumé à 75% par ArcelorMittal Infrastructure et 25% par le MTMDET, de ce budget, environ 395 000\$ étaient prévus pour les levés LiDAR aéroportés et terrestres ainsi que pour les photographies aériennes à haute résolution. Le soutien du MTMDET au projet *ParaChute* provient du Plan Vert ce qui a permis de développer un volet novateur portant sur les impacts potentiels des changements climatiques sur les mouvements de terrain. Ce volet du projet *ParaChute* sera brièvement mentionné dans les objectifs mais fera, comme prévu, l'objet d'un rapport séparé aussi prévu pour la fin avril 2017 (Cloutier et al. 2017).

Grâce à une excellente collaboration de tous les partenaires et au travail acharné tant du personnel de terrain d'ArcelorMittal que de ceux de l'Université Laval, du MTMDET et de l'Université de Lausanne, la planification du projet indiquée dans le devis de recherche (fig. 1.2) a pu être réalisée presque sans changements significatifs.

Ce rapport est le cinquième et dernier de la série des rapports techniques prévus au projet *ParaChute* pour la fin de mars 2017 :

Rapport technique 01 : Données antérieures et récentes (Cloutier et al. 2014);

Rapport technique 02 : Planifications des travaux de terrain 2015 (Cloutier et Locat, 2015a);

Rapport technique 03 : Travaux de terrain réalisés à l'été 2015 (Cloutier et Locat, 2015b);

Rapport technique 04 : Utilisation du drone et photogrammétrie en terrain rocheux (Cloutier et al. 2016);

Rapport 05 : Rapport final du projet *ParaChute*.

La prémisse du projet est d'optimiser l'utilisation des modèles numériques de terrain et des systèmes d'information géographique (SIG) pour la gestion des dangers associés aux chutes de pierres. La méthodologie proposée incorpore les orthophotographies, les levés laser aéroportés, les levés laser réalisés à partir d'un véhicule sur rail, le drone, les simulations numériques de trajectoires de chutes de pierres et la photogrammétrie comme outils pour générer des nuages de points. Le produit final est une méthodologie appliquée à l'ensemble du territoire étudié laquelle permet de caractériser les parois rocheuses en termes de susceptibilité à la rupture et au potentiel que des chutes de pierres atteignent l'infrastructure. Le résultat permet de catégoriser les parois pour définir des priorités d'intervention. Le principe s'inspire des méthodes « RHRS¹ » existantes en y intégrant les outils énumérés précédemment et est appelé plus loin le MEDCP (Méthode d'Évaluation du Danger de Chutes de Pierres).

L'incorporation de simulations de trajectoires réalisées de manière systématique permet de reconnaître et d'incorporer à l'inventaire des parois rocheuses, souvent naturelles, qui ne sont pas situées directement en bordure de la voie ferrée. Ces parois passeraient pour la plupart inaperçues dans les systèmes RHRS traditionnels. À ce niveau, la méthodologie se démarque et innove, car elle permet d'identifier, de caractériser et de catégoriser les secteurs de parois éloignées en plus des coupes de roc.

Dans son ensemble, la lecture de ce rapport devrait permettre d'apprécier le chemin parcouru depuis 2014 et l'ampleur, initialement sous-estimée, du travail qui a dû être accompli. La lecture de ce rapport final devrait permettre au lecteur d'apprécier la qualité des outils qui ont été développés dans le cadre du projet *ParaChute* et la qualité et l'efficience de la base de données développée dans un environnement SIG.

Le contenu du rapport final est plutôt volumineux et est réparti en trois composantes. La première est le rapport proprement dit, la deuxième est un support numérique contenant les diverses annexes relatives au projet ainsi que plusieurs tableaux sous format Excel qui, par leur taille, n'ont pu être intégrés directement au texte, et la troisième un atlas. Cet atlas contient l'ensemble des cartes morphostructurales couvrant le territoire du projet (Mayers et al. 2017).

Le rapport proprement dit est divisé en plusieurs chapitres. Après le chapitre d'introduction (chap. 1), d'objectifs (chap. 2) et de retombées (chap. 3), le rapport présente les diverses méthodes et approches utilisées dans le cadre du projet dont le MEDCP (chap. 4). Puis, la structure de la base de données est présentée (chap. 5) suivie de chapitres portant sur les résultats (chap. 6) et leur discussion (chap. 7). Le rapport se termine par des conclusions (chap. 8) et des recommandations (chap. 9).

Nous souhaitons que le lecteur de ce rapport sera convaincu de l'originalité et la qualité des outils de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires (routes et voies ferrées) développés pour le Québec, et cela par une collaboration entre l'industrie (ArcelorMittal), le gouvernement (MTMDET) et le milieu universitaire (Université Laval et Université de Lausanne). Tel était le but principal du projet *ParaChute*.

¹ RHRS: Rockfall Hazards Rating System

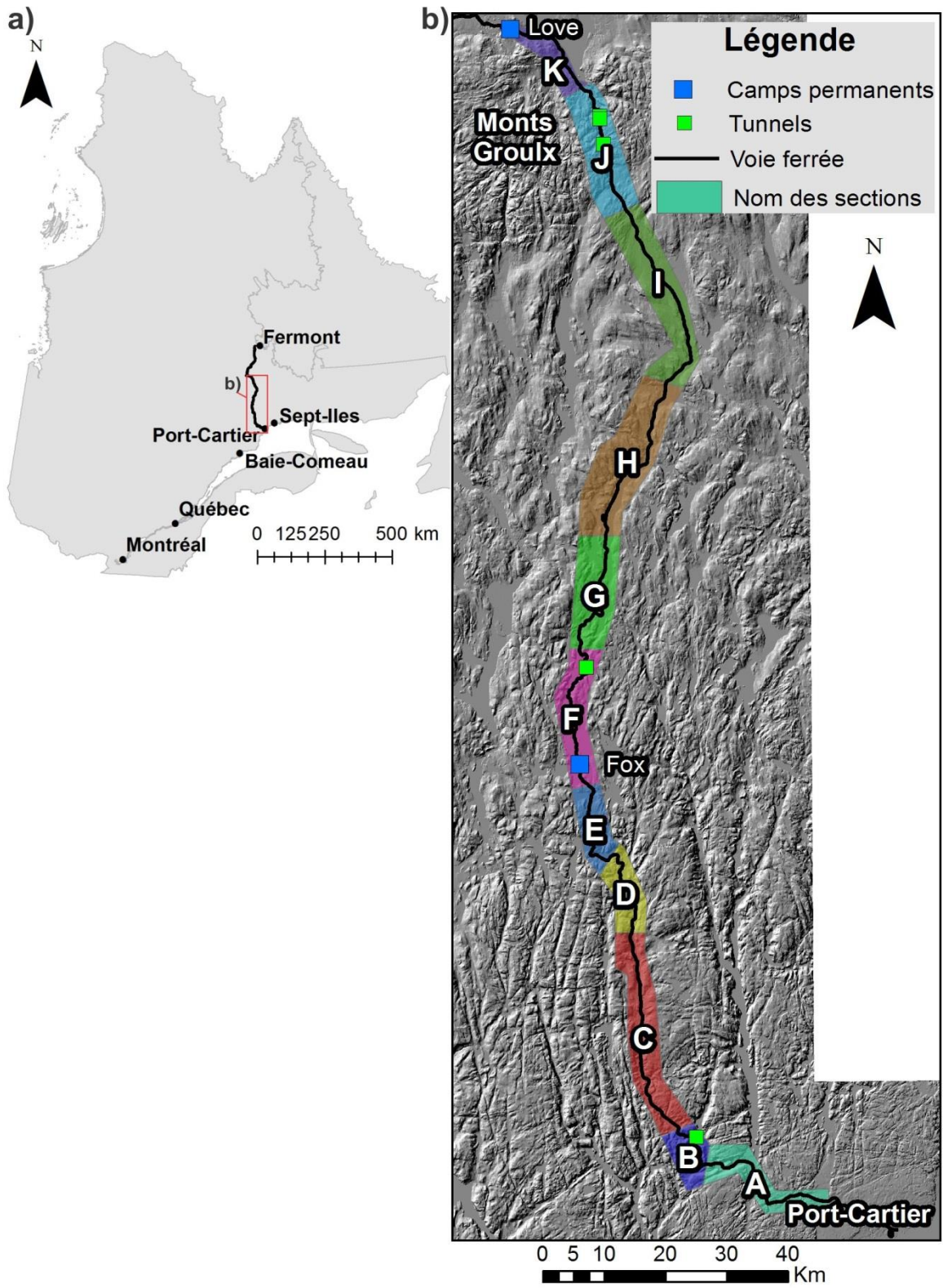


Figure 1.1. Carte de localisation de la voie ferrée d'ArcelorMittal au Québec et de ses principaux camps et tunnels pour les cantons d'Able à Kay.

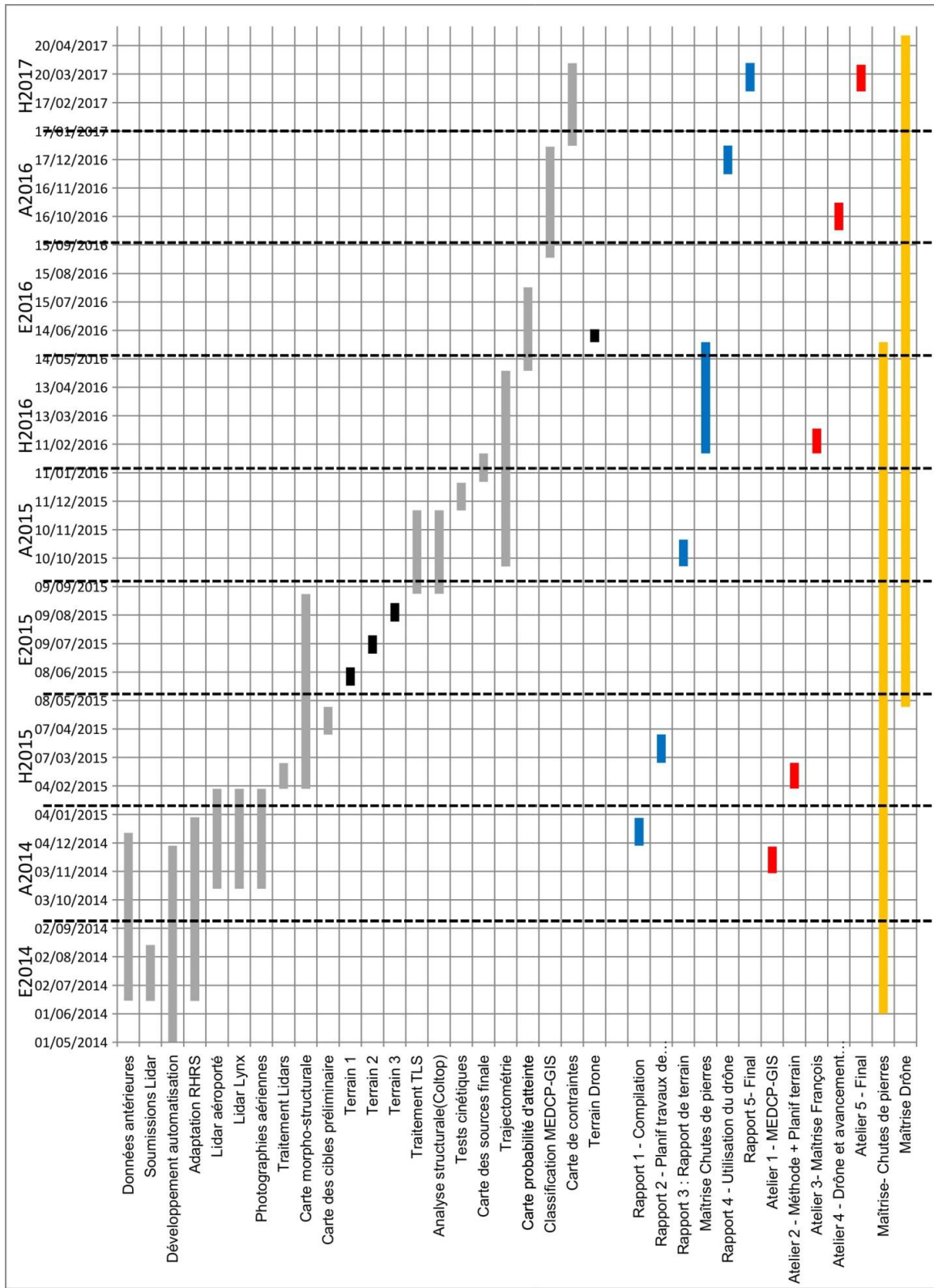


Figure 1.2. Planification temporelle du projet ParaChute présentée dans le devis de recherche.

2. Objectifs

Les objectifs généraux (1 à 7) et spécifiques (8 à 14) décrits dans le devis de recherche du projet *ParaChute* sont repris ici et adaptés au contexte de leur réalisation. Les objectifs généraux du projet sont dans certains cas communs aux deux partenaires, mais parfois particuliers à un seul partenaire. Par contre, dans les énoncés qui suivent, on considère que l'atteinte des objectifs généraux du projet de recherche demeurent les mêmes pour les partenaires.

2.1. Objectifs généraux

1. Se doter d'une méthodologie et d'outils permettant de caractériser la susceptibilité d'endommagement d'un ouvrage linéaire par les chutes de pierres comme soutien à la gestion de ces dangers dans l'aménagement sécuritaire du territoire et cela tant pour les gestionnaires du territoire que pour ArcelorMittal;
2. Développer des outils facilitant l'intégration des données dans un environnement SIG afin de faciliter la gestion de larges territoires;
3. Valoriser les modèles numériques de terrain haute résolution;
4. Fournir un exemple de développement stratégique, associé à la gestion sécuritaire d'infrastructures, et dont la diffusion sera assurée aux différentes collectivités par les publications et présentations qui y seront reliées;
5. Augmenter la sécurité du réseau ferroviaire et diminuer les pertes économiques engendrées par des arrêts non planifiés en lien avec les chutes de pierres;
6. Évaluer l'utilité des drones pour la photogrammétrie et lors de situations d'urgences;
7. Étudier l'impact potentiel des changements climatiques sur les mouvements de terrain (ceci sera présenté dans un rapport séparé).

2.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques du projet de recherche, brièvement annotés selon le cas, sont :

8. Établir la base de données géoscientifiques;
9. Réaliser l'analyse cinématique semi-automatisée des différentes instabilités rocheuses à l'aide des données structurales analysées avec Coltop 3D et des données provenant du modèle numérique d'élévation;
10. Produire la carte morphostructurale;
11. Adapter les logiciels Rockyfor3D et Rock Fall Analyst 3D au contexte québécois comme outil d'évaluation de l'aléa chutes de pierres le long des infrastructures ferroviaires et routières du Québec. Après évaluation, seul le logiciel Rockyfor3D a été utilisé (Noel 2016);
12. Développer l'utilisation des drones à l'analyse des falaises rocheuses et lors d'interventions en situation d'urgence;
13. Développer une approche québécoise du Rockfall Hazard Rating System (RHRS) pour mettre au point la Méthode d'Évaluation du Danger de Chutes de Pierres (MEDCP);
14. Intégrer la classification du danger associé aux chutes de pierres (MEDCP-SIG) à celle de l'aléa défini par trajectométrie afin de produire des cartes de susceptibilité aux chutes de pierres le long des tracés linéaires. Au final, nous avons plutôt intégré les trajectoires à l'évaluation MEDCP.

3. Retombées

Le projet de recherche proposé apporte des bénéfices permanents à l'ensemble des partenaires (ArcelorMittal Infrastructure, le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports et l'Université Laval), ainsi qu'à la société en général. À cet effet les bénéfices et retombées obtenus par la réalisation du projet *ParaChute* sont les suivants :

- Les résultats du projet *ParaChute* fournissent une opportunité de développement d'un partenariat stratégique de gestion du risque associé aux mouvements de terrain entre l'industrie, le gouvernement et les universités;
- Les outils, et le MEDCP en particulier, vont permettre d'augmenter la sécurité le long des infrastructures routières et ferroviaires;
- L'utilisation du MEDCP, par l'identification des classe prioritaires d'intervention, devrait permettre la réduction du nombre de chutes de pierres imprévues le long des infrastructures routières et ferroviaires par une meilleure reconnaissance des instabilités des talus rocheux bordant les infrastructures ainsi que les falaises éloignées pertinentes;
- Le MEDCP, comme un des outils de gestion de chutes de pierres, a été conçu pour être utilisable dans les diverses régions territoriales concernées;
- L'utilisation des divers outils cartographies, dont les levés LiDAR aéroportés, ont démontré leur fort potentiel d'utilisation même en territoire couverts par une forêt dense composée principalement de résineux de telle sorte que la cartographie des mouvements de terrain en région nordique en sera d'autant aidée;
- Le projet *ParaChute* a permis la rédaction d'un rapport soulignant l'importance d'évaluer nos besoins d'adaptation des outils d'évaluation des aléas mouvements de terrain pour la prise en compte des effets potentiels des changements climatiques;
- La réalisation d'un projet sur un aussi grand territoire orienté nord-sud a permis de démontrer l'intérêt d'intégrer les divers outils utilisés dans le projet *ParaChute* pour l'aide à la planification d'infrastructures linéaires en régions nordiques;
- Le projet *ParaChute* a été une première occasion de démontrer au Québec l'utilisation de drones pour l'auscultation de falaises rocheuses et dont l'usage vient augmenter substantiellement la sécurité des personnes normalement responsables de telles études;
- Dans le cadre du projet *ParaChute*, pour la mise à disposition des résultats de la recherche, il a été jugé plus à propos de rendre accessibles les résultats de la recherche par le biais de divers articles scientifiques et par la participation à divers colloques canadiens ou québécois, dont ceux de l'AQTr;
- Le projet *ParaChute* a permis la création, avec l'aide de ses collaborateurs, d'une méthode d'évaluation du danger de chutes de pierres (MEDCP), une adaptation québécoise du Rockfall Hazard Rating System (RHRS);
- La réalisation du projet *ParaChute* a fourni une occasion exceptionnelle de formation de personnel hautement qualifié valorisant la profession d'ingénieur et cela avec la participation de C. Cloutier et D. Turmel, la réalisation de deux projets de maîtrise (M. Mayers et F. Noël) et la participation de plusieurs stagiaires de recherche (A. Jasmin, A. Paré, B. McFadyen et F. Tremblay-Auger).

- Le projet *ParaChute* a fourni une première occasion au Québec de prendre en considération les impacts possibles des changements climatiques sur les mouvements de terrain. Cet effort a culminé avec la tenue du 1^{er} Atelier sur les effets potentiels des changements climatiques sur les mouvements gravitaires au Québec tenu le 31 janvier 2017 avec plus de 50 participants.

La réalisation du projet de recherche *ParaChute* a divers bénéfices pour ArcelorMittal, pour qui les frais de transport représentent environ 40% des coûts de production du minerai. Les bénéfices les plus importants sont les suivants :

- Le projet *ParaChute* fournit une vision intégrée de l'infrastructure ferroviaire par l'acquisition de données géographiques, topographiques et géologiques du secteur fournissant ainsi une meilleure connaissance du territoire et l'établissement d'un référentiel permettant de mieux comprendre et doser les interventions en cours et à venir;
- Le projet *ParaChute* devrait permettre une réduction des coûts engendrés par les chutes de pierres en réduisant les événements imprévisibles;
- Avec le MEDCP développé sur le territoire de la compagnie, il est donc possible de prioriser les secteurs d'intervention en se basant sur des données scientifiques acquises avec des méthodes qui permettent de réduire les incertitudes;
- L'utilisation de la base de données acquises pour ArcelorMittal dans le cadre du projet *ParaChute* devrait permettre une conception préliminaire des méthodes d'intervention et leur optimisation grâce à une connaissance accrue des caractéristiques des massifs rocheux concernés;
- Dans le cadre du projet, une base de référence a été établie. Cette base de données pourra donc servir de référentiel à partir duquel la performance des interventions (mitigations) futures pourront être évaluées;
- *ParaChute* a mis en place une banque de données impressionnante dans un environnement numérique de style SIG et qui va seulement nécessiter une mise à jour pour en maintenir tout son potentiel. Il s'agit d'une base données évolutive qui n'a donc pas à être recommencée à chaque nouveau cas d'étude;
- La mise en place de la base de données dans un environnement SIG permet aussi des interventions plus rapides et efficaces avec un accès direct à toutes les informations techniques disponible pour les 425 coupes de roc et 73 falaises éloignées retenues aux fins du projet;
- Le MEDCP et la banque de données associée devrait permettre une augmentation tant de la rapidité des interventions que de leur qualité;
- Les résultats du projet *ParaChute* fournissent un outil d'aide à la planification des infrastructures ferroviaires et d'une accessibilité directe à toute les données du modèle de terrain couvrant le territoire de la voie ferrée;
- Par le biais des diverses rencontres avec le personnel d'ArcelorMittal, la formation du personnel technique aux outils de gestion des données générées par le projet a pu être réalisée;
- Nous avons noté, dès notre rencontre de juin 2016 à Port-Cartier, que les employés de la compagnie appréciaient beaucoup le projet qui venait valoriser leur travail par l'assurance que des actions sont entreprises afin réduire le risque pour les employés ainsi que la perte de productivité;

- La réalisation du projet *ParaChute* a permis à la ArcelorMittal de valoriser son profil d'entreprise par sa participation à un projet utile non seulement à elle-même, mais aussi à la société en général concrétisée par sa participation au financement et au développement d'un outil d'intérêt public, i.e. le MEDCP.

Les bénéfices pour le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports sont les suivants :

- En collaboration avec le projet *ParaChute*, il a rendu possible la réalisation de la méthode MEDCP comme outil de cartographie du danger associé aux chutes de pierres pour des ouvrages linéaires;
- Le MEDCP développé dans le cadre du projet *ParaChute* est transférable à divers projets linéaires existants ou en gestation, dont les divers chemins de fer et les routes sous la juridiction du Québec;
- Les divers outils et méthodes utilisés dans le cadre du projet *ParaChute* viennent augmenter la capacité d'analyse du personnel responsable de la cartographie du danger associé aux mouvements de terrain, dont les chutes de pierres, par l'intégration de méthodes avancées d'analyse spatiale du terrain et des processus gravitaires;
- Le projet *ParaChute* a démontré le potentiel de l'utilisation du drone pour l'imagerie des parois rocheuses ainsi que pour les glissements de terrain en général. Cela vient surtout en soutien à l'application de la photogrammétrie à l'auscultation des bassins versants et des sinistres liés aux mouvements de terrain, dont le cas du glissement récent à Saint-Luc-de-Vincennes;
- Finalement, la diffusion publique des résultats lors des ateliers, publications et conférences publiques réalisé au cours du projet *ParaChute*, et à venir, vient assurer une visibilité et une valorisation publique des activités du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec en appui à la sécurité du public et à la performance accrue et sécuritaire des infrastructures.

4. Méthodologie

Ce chapitre du rapport décrit les processus méthodologiques finaux permettant d'obtenir les résultats présentés au chapitre 7. Ce chapitre est très détaillé, car le développement du MEDCP est d'abord et avant tout un développement méthodologique intégrant plusieurs éléments. Certaines parties du travail se retrouvent aussi dans les quatre rapports techniques du projet, énumérés ci-dessous :

Rapport technique 01 : Données antérieures et récentes (Cloutier et al. 2014);

Rapport technique 02 : Planifications des travaux de terrain 2015 (Cloutier et Locat, 2015a)

Rapport technique 03 : Travaux de terrain réalisés à l'été 2015 (Cloutier et Locat, 2015b)

Rapport technique 04 : Utilisation du drone et photogrammétrie en terrain rocheux (Cloutier et al. 2016).

Le chapitre 4 sur la *Méthodologie* débute par la description des données de télédétections acquises au cours du projet. Il s'agit des levés au scanner laser ainsi que des photographies prises par avion et par hélicoptère. Ces données composent l'assise de la base de données et sont essentielles à la réalisation du projet. Puis, le chapitre enchaîne avec l'explication de la théorie de la photogrammétrie et la génération des modèles réalisés dans le cadre du projet *ParaChute*. Une version plus détaillée a été rédigée dans le Rapport technique 04 (Cloutier et al. 2016). La section 4.3 explique comment est créée la carte morphostructurale et sa signification. Puis, la méthodologie développée dans le cadre des travaux de maîtrise de François Noël (Noël, 2016) permettant de réaliser des simulations de trajectoires de chutes de pierres systématiquement sur tout le territoire à l'étude est décrite. De plus amples détails sur le fonctionnement de l'outil numérique se trouvent dans Noël (2016). Les sections 4.5 et 4.6 expliquent les travaux pré-terrain réalisés au bureau et permettent de générer un inventaire des coupes de roc, leur classification préliminaire et l'évaluation de leur structure. La méthodologie poursuit avec une explication des travaux réalisés lors des visites terrain. Puis, les analyses possibles sur nuages de points sont détaillées. Enfin, la section 4.9 décrit la méthodologie développée pour l'application et l'obtention du classement du MEDCP-SIG. Rappelons que toutes les étapes décrites préalablement dans le chapitre 4 *Méthodologie* sont nécessaires au développement ou à l'application du MEDCP-SIG.

4.1. Acquisition de données de télédétection

Les données de télédétection sont essentielles à la réalisation du projet *ParaChute*. De plus, elles s'avèrent utiles à notre partenaire, ArcelorMittal, pour la planification de travaux, pour effectuer un suivi de leur infrastructure, comme archives et possiblement lors d'opérations courantes. Ces données sont utilisées à toutes les étapes du projet et possiblement dans des projets futurs qui seront reliés à d'autres types de mouvements de terrain comme les coulées de débris. L'acquisition et le traitement d'une partie des données de télédétection a été réalisée par un sous-contractant. Il s'agit des levés suivants :

- un levé LiDAR aéroporté de 1244 km², son traitement et la classification des points;
- un levé LiDAR mobile de 158 km sur la voie ferrée et son traitement;
- des photographies aériennes couleur et infra-rouge couvrant un territoire de 1244 km² et leur traitement pour obtenir une mosaïque orthorectifiée (ortho-photos).

Un processus d'appel d'offres a été réalisé selon les normes en vigueur à l'Université Laval et a été amorcé au printemps 2014. La publication de l'appel d'offres a eu lieu le 11 juillet. L'ouverture des soumissions s'est déroulée le 5 août 2014 et le prestataire de services retenu fut Groupe Info Consult.

Les levés LiDAR aéroportés ont été réalisés les 27 et 29 septembre ainsi que les 1, 2 et 3 octobre 2014 par le sous-contractant Airborne Imaging. Les levés LiDAR mobile faits à partir d'un véhicule Hi-Rail se sont déroulés du 4 au 9 octobre et ont été réalisés par le sous-contractant Airborne Imaging. Des scans ont été faits à l'aller et au retour. Groupe Info Consult a sous-contracté la compagnie Xeos pour effectuer la prise de photographies aériennes. Le traitement des photographies et l'ortho-rectification a été fait par Groupe Info Consult. L'acquisition s'est déroulée lors de trois journées : 2, 3 et 22 octobre 2014, soit les journées où les conditions météorologiques requises étaient rencontrées. À cause de la période de l'année et parce que le secteur est situé en région nordique, le soleil est bas dans le ciel ce qui a occasionné de l'ombre dans les photographies, et ce, malgré qu'elles aient été prises autour de midi. Une partie des photographies aériennes prises dans le secteur des Monts Groulx ont été acquises en présence de neige au sol. Ainsi, il avait été convenu avec le prestataire de services, Groupe Info Consult, que ces photographies seraient reprises, à leur frais, à l'été 2015. Elles ont été reprises le 24 août 2015. Les métadonnées des trois types de levés sont disponibles à l'annexe numérique «Metadonnees.pdf».

Les données ont été livrées en cinq étapes respectant l'entente. Le rapport final rédigé par Groupe Info Consult et remis le 29 janvier 2015, puis modifié le 4 février 2015 à notre demande est disponible à l'annexe numérique «Rapport-GIC-ParaChute-7581_V2.pdf». Les cinq étapes sont les suivantes :

1. Le 22 décembre 2014: Toutes les photographies aériennes, incluant celles avec neige, et leurs fichiers de localisation (*.par*) et les levés LiDAR aéroporté sur un disque dur externe;
2. Le 16 janvier 2015: Les ortho-photographies et une partie du levé LiDAR mobile, sur un disque dur externe;
3. Le 29 janvier 2015 : Le reste des levés LiDAR mobile et les versions finales des photographies aériennes et des photographies dans le proche infra-rouge et le rapport final, sur un disque dur externe;
4. Le 13 février 2015 : À notre demande, une nouvelle version des fichiers *LAS* et *ascii* des nuages de points à l'intérieur des tunnels a été transférée via le site ftp de Groupe Info Consult. Dans cette version, les points acquis lors d'un seul passage sont conservés et les points classés végétation sont ceux exportés vers le format *ascii*. En fait, les parois des tunnels ont été classées comme étant de la végétation, c'est pour cette raison que la classe végétation est celle exportée au format *ascii*. Une erreur d'alignement était apparente entre les nuages des premier et deuxième passages ce qui rendait les données inutilisables pour étudier la structure rocheuse, d'où l'intérêt d'avoir les données acquises lors d'un seul passage;
5. Les photographies aériennes acquises à l'été 2015 traitées ont été livrées le 24 septembre 2015.

La taille des principales données livrées est présentée dans le tableau 4.1. Le rapport, les métadonnées, les fichiers *shapefile*, les points de contrôle et les rapports de calibration ne sont pas comptabilisés dans ce tableau, mais ces données sont de tailles négligeables comparativement à celles présentées dans le tableau.

Le levé LiDAR aéroporté a permis la création d'un modèle numérique de terrain (MNT) avec des pixels de 1 m², qui, couplé à des photographies aériennes, permet d'établir une carte morphostructurale du secteur

d'étude. Le MNT permet aussi de faire des simulations de chutes de pierres et d'évaluer plusieurs paramètres de la classification MEDCP-SIG, tels que la hauteur des coupes et la distance de vision. Les données structurales des parois rocheuses situées à proximité de la voie ferrée sont extraites des levés LiDAR mobiles réalisés à partir du véhicule Hi-Rail.

Tableau 4-1. Taille des données de télédétection telles que livrées par Groupe Info Consult.

Type de donnée	Format	Taille
LiDAR aéroporté	LAS	357 Go
LiDAR aéroporté	Image intensité (tif)	6.45 Go
LiDAR mobile	LAS	512 Go
LiDAR mobile (classé sol)	Ascii (xyz)	55.4 Go
Photographie aérienne	RGB (tif)	215 Go
Photographie aérienne	Proche infra-rouge (tif)	245 Go
Ortho-photographie	ecw	18.4 Go
Ortho-photographie	GeoTiff	425 Go
Modèle photos	par	21.8 Mo

Deux séries de photographies par hélicoptère ont été acquises, l'une en juin 2014 dans la phase de planification du projet *ParaChute* et la seconde le 3 juin 2015. Celle-ci ciblait certaines parois rocheuses, soit celles dont les chutes de pierre ont le potentiel d'atteindre la voie ferrée, selon les résultats de la simulation préliminaire de trajectoires des chutes de pierres réalisée à l'hiver et au printemps 2015 (voir section 4.4). Les photographies ont été réalisées afin de pouvoir construire des modèles 3D avec l'objectif de caractériser la structure rocheuse des falaises. Un total de 32 Go de photographies a été acquis à cette occasion avec l'appareil Nikon D7000 doté d'une lentille ajustable de 16 à 85 mm AF-S NIKKOR. La position GPS des photographies a été acquise en même temps.

Enfin, aux données de télédétections acquises particulièrement pour le projet, s'ajoute un MNT datant de 2010 et des photographies aériennes fournies par ArcelorMittal et datant de 2005. Le territoire couvert sur ces deux jeux de données se limite à un corridor de 200 m de largeur centré sur la voie ferrée. Toutes ces données sont accessibles sur le SIG du projet.

4.2. Photogrammétrie

En plus de données acquises par télédétection présentées à la section 4.1, des données de télédétection ont aussi été acquises par l'équipe lors des travaux de terrain. Principalement, notons les données acquises de scans laser terrestre, ainsi que des données photographiques, acquises soit le long de la voie ferrée, par drone, ou d'un hélicoptère. Cette section traite principalement de ces données photographiques.

L'un des défis liés à la caractérisation d'une paroi rocheuse est l'accès physique à cette dernière. Premièrement, dans la majorité des cas, seuls les cinq mètres au pied de la paroi sont accessibles pour relever des mesures structurales, par exemple. Deuxièmement, lorsque les parois possèdent des paliers ou sont tout simplement assez hautes, il est souvent impossible d'avoir un point de vue de l'ensemble de la paroi. Troisièmement, sur le territoire d'ArcelorMittal, le temps de travail sur la voie ferrée est limité par le trafic ferroviaire intense, ce qui restreint la possibilité de mesurer manuellement les orientations des discontinuités, opération qui peut requérir quelques heures. Finalement, pour des raisons de sécurité, la

présence directement au pied des parois devrait être réduite au minimum. Pour l'ensemble de ces raisons, il a été suggéré, pour le projet *ParaChute*, d'optimiser l'utilisation des modèles numériques de terrain générés à partir de scans laser et de photogrammétrie digitale pour étudier les discontinuités du massif rocheux. La photogrammétrie est une technique, expliquée dans cette section, permettant la génération de tels modèles numériques de terrain à partir de photographies. L'utilisation du drone et de l'hélicoptère permet quant à elle de prendre les photographies des parois qui ne sont peu ou pas visibles à partir de la voie ferrée, ou qui en sont trop éloignées. Cette section débutera par une brève exposition des principes de la photogrammétrie digitale. Par la suite, les méthodes d'acquisition de données utilisées dans le cadre de ce projet seront abordées, et finalement, certains types d'analyses réalisés sur ces données seront revus. Le lecteur est référé à Cloutier et al. (2016) pour de plus amples renseignements.

4.2.1. Principes

Un modèle photogrammétrique est un nuage de points, dont une position x,y,z et une valeur r,b,g , sont associés à chacun des points. Pour parvenir à générer un tel modèle, il faut analyser des photographies. Traditionnellement, les photographies utilisées en photogrammétrie étaient des photographies aériennes, acquises par avion. Ces images étaient traitées de manière stéréoscopiques, soit deux à la fois, et étaient utilisées afin d'établir des modèles numériques d'élévation. L'avènement de la photographie numérique ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs a favorisé le développement d'algorithmes permettant l'analyse simultanée de plusieurs photographies. Dans le cadre du projet *ParaChute*, les modèles photogrammétriques visent à pouvoir effectuer des études géomécaniques de parois rocheuses, de manière virtuelle.

Deux grandes étapes sont nécessaires afin d'obtenir un modèle photogrammétrique. La première étape consiste à trouver, de manière numérique, la géométrie d'acquisition des images, étape appelée *orientation externe*. Pour ce faire, il faut aussi être capable d'enlever la distorsion dans les images, donc connaître *l'orientation interne* des images. Une fois la géométrie d'acquisition établie, il faut générer le modèle photogrammétrique lui-même, ainsi que le géoréférencer.

L'orientation externe réfère à la position de chacune des photos, de manière relative, par rapport à un objet. Établir l'orientation externe implique d'établir la relation entre l'image elle-même et l'objet dans l'espace, ainsi qu'entre cette image et les autres images. Cette étape équivaut donc à déterminer la position de la caméra dans les coordonnées de l'objet lui-même (Schenk 2005). Cette position est déterminée par des coordonnées X_0 , Y_0 et Z_0 et par trois angles indépendants. La position de chacune des images est donc définie par six paramètres différents. Afin d'établir l'orientation externe, il est nécessaire d'avoir au moins une paire de photographies ayant des points communs. Deux options s'offrent alors : soit il y a des points où la position de l'objet est connue dans un système référentiel connu, un tel point est appelé point d'appui, ou il n'y en a pas. Dans le premier cas, l'orientation externe sera absolue tandis que dans le deuxième, cette orientation sera relative à un facteur d'échelle et une translation près de l'orientation absolue. C'est-à-dire que les dimensions, l'orientation et la localisation réels de l'objet sont inconnus. C'est cette technique que nous utilisons.

L'orientation interne quant à elle réfère à la distorsion sur les photographies. Deux types de caméra peuvent être utilisés pour faire de la photogrammétrie, soit les caméras métriques et les caméras non-métriques. Les premières sont celles dont les paramètres d'orientation interne, soit la distance focale, le point principal et les distorsions causées par les lentilles sont connues a priori. Ces caméras métriques sont conçues

uniquement pour la photogrammétrie. Les caméras grand public, quant à elles, sont des caméras non métriques, en ce sens que ces informations ne sont pas directement disponibles et changent dans le temps. C'est ce type de caméra qui est utilisé dans le projet *ParaChute*. À titre d'exemple, si l'on fait le focus (autofocus) avec une caméra, la distance entre les lentilles varie légèrement, ce qui engendre des différences dans la distorsion causée par les lentilles. Sur les focales non fixes, par exemple les *zooms*, la distance focale peut être changée entre chacune des prises de vue. Dans ce cas, les paramètres d'orientation interne de la caméra sont différents pour chacune des photographies prises à une focale différente. Il est important de pouvoir corriger ces déformations en photogrammétrie, afin de pouvoir produire un modèle qui est représentatif de la réalité.

Tel que décrit précédemment, afin de pouvoir faire de la photogrammétrie, il faut des points de correspondance entre les images. Une bonne identification de ces points est une étape cruciale dans la reconstruction d'un modèle 3D. Dans le logiciel ci-après exposé, la méthode SIFT (Scale Invariant Feature Transform) est utilisée pour trouver, sur chacune des photos, des points d'intérêt. L'intérêt de la méthode SIFT est que ces points sont insensibles à l'échelle et l'orientation, en plus d'être peu sensibles aux variations d'éclairage. Cette insensibilité à l'échelle fait en sorte que les images peuvent être prises de manière plus ou moins rapprochée, ce qui laisse plus de latitude au photographe pour ses prises de vue.

Dans le cadre du projet, les techniques développées en vision par ordinateur, appelées méthode SFM (Structure from Motion) sont utilisées via trois logiciels gratuits, appelés VisualSFM, Colmap et CMVS/PMVS. Le logiciel VisualSFM et Colmap permettent, avec la méthode SIFT, de localiser les points d'intérêts dans chacune des photos, de comparer les points d'intérêts entre les photos pour trouver des correspondances, ainsi que d'établir les orientations externes et internes. Le produit final de VisualSFM est un modèle photogrammétrique peu dense. Ce modèle, avec les informations sur l'orientation interne et externe, sont ensuite mis comme paramètre d'entrée de CMVS/PMVS, qui traite les photographies pour obtenir un modèle photogrammétrique dense, i.e. avec beaucoup de points.

Une fois le modèle obtenu, il faut mettre à l'échelle le modèle et le géoréférencer. Pour ce faire, deux méthodes ont été utilisées dans le cadre du projet. La première méthode consiste à géoréférencer le nuage de points en se servant, comme source d'information, de la position de prise de vue des différentes photographies utilisées pour établir le modèle photogrammétrique. En d'autres termes, au lieu d'avoir une orientation externe relative, nous pouvons utiliser une orientation externe absolue. Pour ce faire, il faut associer une coordonnée obtenue d'un système de positionnement tel un GPS à l'emplacement de l'appareil lors de la prise de chacune des photos.

La deuxième méthode consiste à aligner le nuage de points sur un autre nuage de points, qui lui est géoréférencé. Par exemple, les scans laser obtenus des levés mobiles sur rail ou aéroporté peuvent être utilisés. Dans le projet, nous utilisons ces deux techniques, parfois séparément et parfois ensemble. Selon les besoins de l'analyse qui sera réalisée sur le nuage de points, l'étape de géoréférencement est plus ou moins cruciale. Pour certaines applications, la précision du géoréférencement déterminera en partie la qualité de l'analyse qui pourra être effectuée.

En effet, la qualité de l'analyse qui peut être faite sur un nuage de points dépend en partie de son exactitude et de sa résolution, qui sont variables d'un nuage à l'autre. D'abord, la densité du nuage de points, qui est la quantité de points par unité de surface, détermine la grosseur du plus petit élément qui pourra y être représenté. Un nuage peu dense, avec, par exemple, 1 point par mètre carré (1 pts/m²) ne

permettra pas de distinguer les rails et les fossés ne seront pas bien représentés. Un nuage avec une densité d'un point par 25 cm² permet de distinguer les rails et un nuage d'un point par cm² permettra de bien représenter la forme des rails. Aussi, la densité de points d'un modèle n'est pas constante. Il peut y avoir des effets d'ombre, c'est-à-dire que des secteurs n'apparaissent pas sur les photographies, par exemple derrière un arbre ou le dessous d'un surplomb. À ces endroits, la densité de points diminue et peut être nulle ce qui limite les analyses possibles. Ces phénomènes touchent aussi les nuages de points obtenus de scans laser (fig. 4.1).

Ensuite, l'exactitude du modèle dépend de la reconstruction de l'orientation externe du modèle, c'est-à-dire du positionnement des photographies les unes par rapport aux autres. Une erreur d'orientation externe affecte la géométrie résultante du modèle, par exemple, une ligne droite reconstruite comme une courbe. Ceci ne survient pas dans les scans laser, car la position des points par rapport au scanneur est connue au moment de l'acquisition. Toutefois, dans les scans laser, il peut y avoir des erreurs d'alignement lorsque deux ou plusieurs scans sont alignés pour couvrir un plus grand secteur.

Enfin, les modèles photogrammétriques comportent un certain bruit, qui est en général plus grand que celui des nuages obtenus de scans laser. Ce bruit peut se présenter comme une surface rugueuse alors qu'elle est lisse en réalité (fig. 4.2). L'épaisseur de la surface est aussi une bonne indication du bruit et donc de la déviation de la position des points par rapport à la position réelle de l'objet. La photogrammétrie génère aussi son lot de points aberrants, par exemple, des points situés derrière une paroi rocheuse. Les points aberrants peuvent facilement être retirés du nuage, mais ce n'est pas le cas du bruit. Des filtres lissant peuvent être appliqués aux modèles pour améliorer son rendu (fig. 4.2).

Pour un traitement plus en profondeur de la photogrammétrie, le lecteur est référé au Rapport technique 04 de ce projet, portant exclusivement sur la photogrammétrie et sur l'utilisation d'un drone à cette fin.

4.2.2. Méthodes d'acquisition

Des photographies ont été acquises de trois façons en vue de réaliser des modèles photogrammétriques des parois rocheuses. Dans un premier temps, la très grande majorité des coupes de roc visitées à l'été 2015 et 2016 ont été photographiées systématiquement en vue de pouvoir produire, au besoin seulement, des modèles photogrammétriques (Cloutier et Locat 2015 et 2016). Ces photographies ont été réalisées à pied à partir de la voie ferrée. Conséquemment, les parties supérieures des coupes de plus de 17 m sont en général pas ou peu visibles. De plus, puisque toutes les photographies sont prises de la même élévation certains modèles présentent une distorsion (l'orientation externe n'est pas représentative) et les zones d'ombres sont fréquentes. Nous n'avons généré que quelques modèles à partir de l'acquisition terrestre. Dans un second temps, une acquisition à partir d'un hélicoptère a été réalisée à l'été 2015 visant particulièrement les parois éloignées (Cloutier et Locat 2016). Des modèles ont été générés pour chacun des 25 secteurs éloignés photographiés en plus de certaines coupes de roc. La qualité des modèles est variable et elle a été évaluée visuellement lors de l'étape de mise à l'échelle et de géoréférencement. La plupart des modèles sont jugés satisfaisants.

Finalement, la troisième source d'informations est les photographies prises par drone. Les hautes coupes de roc qui n'ont pas été photographiées en hélicoptère et dont la partie supérieure n'est pas visible de la voie ferrée ont été ciblées pour la caractérisation par drone. De plus, les parois éloignées n'ayant pas de modèles photogrammétriques ou incomplets ont été visées. Les secteurs visés ont aussi été déterminés en

fonction de leur localisation (contraintes terrain liées au temps d'accès) et de leur faisabilité, e.g., certaines parois ont été éliminées à cause de la présence de fils électriques dans les zones de décollage ou parce qu'elles sont trop loin pour le drone. Des vidéos ont été acquises conjointement aux photographies par drone.

Étant donné les réglementations en vigueur sur l'utilisation des drones au Canada (voir Cloutier et al. 2016), nous avons opté, pour ce projet, pour l'utilisation d'un drone de moins de 2 kg. Au final, nous avons acquis trois drones pour ce projet. Le premier est un drone commercial, peu coûteux (300\$) qui ne vient pas équipé d'une caméra. Il a été acheté pour servir de drone d'entraînement. Il s'agit du Phantom 1 de la compagnie DJI. Nous y avons fixé une caméra « GoPro », disponible en location au département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval. Le deuxième drone, que nous avons nommé le Lernoptère, a été fait sur mesure pour répondre à nos exigences, qui en 2015 ne pouvaient pas être comblées par un drone commercial. Nous avons pris possession de cet appareil à l'automne 2015 et il s'est brisé lors d'un atterrissage hors contrôle en juillet 2016. Le diagnostic de DroneXperts (le constructeur du drone) pointe vers un dérèglement du contrôleur (PixHawk) qui aurait causé la perte de contrôle. Le drone n'a pas été réparé, puisque nous avons opté pour acquérir un drone commercial disponible depuis mars 2016: le Phantom 4 de la compagnie DJI. Ce drone est équipé d'une caméra 12 mégapixels monté sur une nacelle stabilisatrice. Il permet de faire de la photogrammétrie et a été acquis en août 2016. Il s'agit du drone que nous avons utilisé pour les travaux de terrain du mois d'août 2016. Ce troisième drone répond mieux à nos besoins et nous avons abandonné l'utilisation du Lernoptère.

Deux périodes de terrain utilisant le drone ont été réalisées à l'été 2016 : en juin et en août. Lors de la première période, nous avons faits des tests avec le Phantom 1, le drone d'entraînement. Ces tests ont été utiles pour mettre au point notre méthodologie (Cloutier et al. 2016). Premièrement, dans le secteur des Monts Groulx (Jig), un système de localisation utilisant uniquement le système GPS est insuffisant. Effectivement, fréquemment le drone ne captait pas suffisamment de satellites pour pouvoir voler avec l'aide de la localisation. Le Lernoptère et le Phantom 4 sont équipés d'antennes compatibles avec les constellations satellites GPS et GLONASS, ce qui augmente la quantité de satellites et conséquemment réduit les périodes et les secteurs sans ou avec peu de réception. Le positionnement par satellite permet au drone de demeurer en mode stationnaire lorsqu'aucune commande n'est activée. Lorsque le vol assisté du positionnement par satellites n'est pas activé, le drone dérive au lieu de demeurer sur place ce qui force le pilote à corriger constamment sa position. De plus, si la communication entre la télécommande et le drone est perdue, le drone vient se positionner au-dessus de son point de départ et atterrit de lui-même. Toutefois, si la réception du signal satellite est mauvaise, le drone ne pourra pas retourner à son point de départ et pourrait, dans le pire des cas, se diriger ailleurs, par exemple à un point situé à plusieurs kilomètres ou directement sur une falaise. Cette situation est dangereuse et nous préférons ne pas effectuer de vol lorsque le signal satellite est de mauvaise qualité. Les vols sans aide de positionnement et la récupération du drone lors d'une perte de communication ont été pratiqués en entraînement.

Deuxièmement, les tests avec le Phantom 1 nous ont fait réaliser que l'environnement du chemin de fer laisse peu de place à des zones de décollage et d'atterrissage appropriées, i.e. un terrain plat de bonne dimension (environ un dégagement de 8 m²) et sans obstacles à proximité. Souvent, il n'y avait tout simplement aucun secteur plat, ou alors il était enclavé avec d'un côté la voie ferrée qui est surélevée et de l'autre de la végétation. Ceci oblige à faire un décollage et un atterrissage complètement vertical et laisse peu de place pour manœuvrer en cas de rafale ou de problème. Ainsi, nous avons construit une piste

d'atterrissage qui s'installe sur les rails pour les travaux du mois d'août. Il s'agit simplement de deux feuilles de contre-plaqué attachées ensemble par des pentures et déposées sur la voie ferrée. Cette solution s'est avérée efficace.

Différents patrons de vol peuvent être suivis afin d'acquérir la couverture nécessaire pour créer un modèle photogrammétrique d'une paroi rocheuse ou de tout autre élément. Les photographies doivent avoir un recouvrement de 60%. Lorsque les techniques SFM sont utilisées pour reconstruire le modèle, notre expérience nous montre que la génération est facilitée lorsque les photos sont prises de plusieurs points de vue et à différentes altitudes. Quelques photos générales de la paroi sont aussi très utiles car cela semble faciliter la reconstruction de l'orientation externe.

Le patron de vol adopté est choisi sur place avant le vol et dépend principalement de la géométrie de la paroi, de la visibilité qu'a le pilote de l'appareil, de la paroi et de la localisation des éléments de danger. Accessoirement, les conditions météo, le temps disponible et la résolution du modèle recherché pourront aussi influencer le choix du patron de vol.

4.3. Carte morphostructurale

Pour les projets couvrant de grands territoires, il devient très utile de procéder à une analyse organisée du terrain. Une telle analyse cherche à diviser le territoire en unités qui représentent des formes, des teintes et un type de drainage semblables. Ces unités, appelées motifs, représentent le modèle de base du terrain (ou territoire). Étant donné que nous intégrons dans les motifs autant le terrain meuble que rocheux, nous utilisons donc le terme de carte morphostructurale pour décrire l'ensemble des résultats d'une telle cartographie. Cette carte est un document produit en amont du cheminement d'un projet, car elle peut contribuer à la solution de divers problèmes tels que l'identification des zones d'éboulis, la recherche de bancs d'emprunt de sable et de gravier, l'identification des zones sensibles par rapport à la contamination de nappes souterraines, ou encore l'identification des sources de matériaux pouvant alimenter les coulées de débris lors de pluies torrentielles. Ainsi, la carte morphostructurale servira non seulement au projet *ParaChute*, mais aussi à tout autre projet lié aux risques naturels ou à l'aménagement du territoire. Cette même carte est aussi évolutive et son insertion dans un système d'information géographique (SIG) et l'utilisation d'attributs rend son adaptation facile à une évolution continue de la connaissance du territoire concerné. Le projet *ParaChute* étant un projet linéaire, les bassins versants alimentant directement la voie ferrée ont été considérés aux fins de la délimitation du territoire qui est visé par la cartographie morphostructurale. C'est pour cette raison que nous avons décidé de couvrir les bassins versants par LiDAR aéroporté et par photographies aériennes. Ceci a pour effet d'avoir une carte aux formes variables le long de la voie ferrée.

La méthodologie utilisée dans le cadre du projet *ParaChute*, pour établir la carte morphostructurale du terrain, a été établie initialement dans le cadre du projet Charlevoix (Locat et al. 2013a, Locat et al. 2013b). L'approche initiale de Cruden et Thomson (1987) a été établie pour des travaux réalisés à partir de photographies aériennes en noir et blanc. Par contre, comme pour le projet Charlevoix, le secteur couvert par le projet *ParaChute* possède souvent un couvert forestier important ce qui limite la détermination des teintes et des formes à partir des photographies aériennes. La couverture LiDAR à haute résolution offre, après avoir enlevé le couvert forestier, un détail très fin de la morphologie et du réseau de drainage (échelle

du pixel de l'ordre du mètre carré). De plus, le même territoire a été levé à l'aide de photographies aériennes couleurs à haute résolution (1 pixel = ~ 10 cm), une résolution supérieure à celle du LiDAR. La méthode de Cruden et Thomson (1987) a donc été modifiée pour s'adapter à ces nouvelles technologies de définition de modèle de terrain. De ce fait, la nouvelle méthode d'élaboration des motifs est ramenée principalement à deux composantes : le drainage et la forme. Les photographies aériennes sont utilisées pour préciser certaines interprétations ou constater l'occupation du territoire. Ces photographies aériennes peuvent être visualisées en 3D directement à l'ordinateur à l'aide de logiciels spécialisés (e.g. Summit Evolution), ou en 2D dans le SIG par l'entremise d'orthophotographies.

Dans le cadre du projet *ParaChute*, nous disposons aussi d'une cartographie des dépôts de surface (1 :50000) (MRNF, 2004) laquelle avait été principalement établie à partir d'analyse de photographies aériennes en teinte de gris (noir et blanc) à une échelle d'environ 1 :40 000. Cette cartographie correspond à une couche d'information qui peut être interrogée dans le SIG permettant une comparaison avec nos observations.

La méthodologie est présentée ici en trois parties : le drainage, les motifs et la carte morphostructurale.

4.3.1. Le drainage

Le tracé d'un réseau de drainage précis constitue probablement l'étape la plus importante de l'analyse. À cet effet, nous disposons aussi de cartes topographiques dont les couches pouvaient être extraites de telle sorte que le réseau de drainage de base apparaissant sur ces cartes a pu être intégré directement au modèle de base du terrain, réduisant d'autant le travail d'analyse du drainage. Le réseau a été augmenté à partir de l'analyse fine du levé LiDAR aéroporté, à l'aide entre autres de protocoles intégrés au logiciel ArcMAP permettant, de manière semi-automatisée, de calculer le réseau de drainage.

Dans le cadre de la cartographie morphostructurale, nous considérons le drainage comme étant le tracé que pourrait suivre l'écoulement de l'eau sur un terrain donné, même s'il n'y a pas de ruisseaux présents (intermittents ou non). Dans des terrains rocheux, une telle approche fait bien ressortir les linéaments. Cette partie du travail, qui se doit d'être méticuleuse, permet donc de s'approprier la morphologie du terrain. D'un bon réseau de drainage découle une mise en évidence plus aisée des différents motifs. Il existe de nombreux types de drainage, mais les principaux retrouvés dans la zone d'étude sont du type: angulaire, penné, parallèle et dendritique (fig. 4.3). Il y a aussi des indices sur la nature des terrains, lorsque le drainage est dit interne, i.e. que le réseau est faiblement développé (cas de terrasses fluvioglaciales) et que l'infiltration domine sur le ruissellement.

À titre d'exemple retrouvé sur le territoire du projet *ParaChute* on peut noter un drainage anguleux très caractéristique des terrains métamorphiques (fig. 4.4). On note aussi très fréquemment un drainage parallèle aussi dans des terrains rocheux mais présentant des pentes plus régulières (fig. 4.5). Dans les dépôts quaternaires (till et fluvioglaciale) on retrouve souvent un réseau penné typique de sols granulaires (sable et gravier) lesquels sont souvent associés à des ravins (fig. 4.6).

4.3.2. Le système de classification des motifs (adapté de Cruden et Thomson 1987)

Le système de classification des motifs, adapté de Cruden et Thomson (1987), est présenté à la figure 4.7. Le motif comprend différentes composantes illustrées à la figure 4.7b: matériel génétique, descripteurs de l'activité des processus ayant été à l'origine de la forme observée, l'expression en surface, un processus

modificateur et un indicateur stratigraphique. Selon la situation, ce ne sont pas tous les éléments qui sont inclus dans un motif donné, mais celui-ci doit inclure au moins le matériel génétique. Le critère de base de la détermination d'un motif est que si l'un des éléments de base, le drainage ou la forme, change, alors, il s'agit d'un autre motif.

Pour expliquer la nomenclature utilisée, un exemple de motif est présenté à la figure 4.7b. Il correspond à un dépôt fluvioglaciaire (F(G)) qui se présente en terrasse (t) et creusé par des chenaux (E(G)), mais dont le processus était actif lors de la mise en place de ce dépôt lequel reposerait sur du till (T).

Le matériel génétique comprend la roche en place et les dépôts (environnement fluvial, tourbière, marin, etc.). Selon le cas, on pourra être en mesure d'estimer la nature du matériel génétique sous-jacent, par exemple, le till (T) sur la roche en place (R). Ce terme génétique sera alors placé sous l'indicateur stratigraphique. Dans l'exemple de la figure 4.7b, on considère un dépôt fluvioglaciaire (F(G)) reposant sur du till (T).

Le matériel génétique n'est pas toujours actif, i.e. en processus de formation. On vient donc préciser, si possible, par un qualificatif descriptif, si le processus ayant été à l'origine du matériel génétique est actif ou non (A ou I) ou ancien, e. g. en période glaciaire (G). La plupart du temps, nous allons surtout indiquer si le matériel génétique a été mis en place en période glaciaire. L'absence du «G» indique que le processus est actif ou récent. Dans l'exemple présenté ici, il s'agit d'un dépôt mis en place en période glaciaire (G).

L'expression en surface du matériel génétique est un autre élément majeur de l'identification d'un motif (fig. 4.7b). Cet élément est représenté par une lettre en minuscule et couvre diverses formes allant d'un talus (a) à un placage (v). Ici, le dépôt se présente en terrasses (t).

Le processus modificateur placé après le tiret est ajouté s'il est possible d'en identifier un. Dans l'exemple, le dépôt présente des chenaux qui datent vraisemblablement de la période où les eaux de fonte glaciaire érodaient ces dépôts. On utilise donc ici le symbole « E ». On peut aussi ajouter ici, comme pour le matériel génétique, un qualificatif descriptif de l'activité du processus. Dans le cas des chenaux observés, le qualificatif descriptif «G» est utilisé pour indiquer que ce processus modificateur est associé à la période de déglaciation du territoire.

4.3.3. L'assemblage des motifs : la carte morphostructurale

La carte morphostructurale du territoire est constituée de motifs, dont chacun de ces motifs est considéré comme le reflet de la nature du sol sous-jacent et de sa structure. Dans le cadre du projet *ParaChute*, cette carte couvre en principe l'ensemble du bassin versant longeant la voie ferrée. Ici, les limites entre les motifs ont aussi été ajustées avec l'aide des photographies aériennes ainsi qu'avec certaines observations de terrain. Hormis pour le canton Dog qui a été fait en premier, pour l'ensemble du territoire, deux types de limites ont été définis entre les motifs adjacents, soit des limites certaines et incertaines. Les limites incertaines sont marquées lorsque la séparation entre deux motifs est graduelle.

L'ensemble de la délimitation des motifs est fait dans un SIG et tous les éléments composant la description d'un motif sont considérés comme des attributs dans une base de données (fig. 4.8). Les différents éléments de description des motifs sont établis à partir d'une classification mettant en relief les éléments pouvant composer un motif.

La figure 4.8 présente un exemple pour un motif dans la zone d'étude. L'ensemble de la caractérisation du territoire est présenté séparément sous la forme d'un atlas (Mayers et al. 2017). Il est important de rappeler ici que l'identification des motifs, bien qu'encadrée avec divers critères, demeure un exercice d'interprétation basé sur un minimum de contrôle sur le terrain et pourrait être bonifié au besoin si des études plus détaillées étaient nécessaires.

La confection de la carte morphostructurale et la représentation des motifs se fait dans un SIG. Ainsi, pour chaque motif correspond un code de couleur basé principalement sur le matériel génétique (fig. 4.7a). Les couleurs sont en transparence afin de conserver le relief ombragé du modèle de terrain sous-jacent présenté en teinte de gris. Lorsqu'il est possible d'estimer l'épaisseur du matériel génétique, on sépare entre moins de 1 m, et entre 1 et 25 m. On distingue aussi le réseau hydrographique (i.e. le drainage généré par l'analyse). Puisqu'à l'occasion la limite entre deux motifs peut être difficile à préciser, cette incertitude est indiquée par un trait plein (limite certaine) ou en tirets (limite incertaine).

Une fois la carte morphostructurale élaborée, on peut alors l'interroger et générer divers ensembles représentant les intérêts portant sur tel ou tel type de matériaux ou de situation qui ont généré des assemblages d'attributs. Les cartes ainsi dérivées de la carte morphostructurale sont considérées comme des cartes thématiques, i.e. que ces cartes peuvent aider à isoler des éléments correspondant à une recherche particulière, par exemple les sources possibles de matériaux (sable et gravier) pouvant alimenter des coulées de débris.

Des exemples de la carte morphostructurale obtenue ainsi que son utilisation sont présentés dans le chapitre des résultats à la section 6.1.

4.4. Inventaire, nomenclature et classification préliminaire des parois rocheuses

Nous avons procédé à un inventaire préliminaire des coupes de roc à partir du MNT de 2010 et des photographies aériennes de 2005 fournis par ArcelorMittal à l'automne 2014. Les coupes sont ainsi répertoriées dans la base de données dans un fichier de points (shp). Leur longueur et leur hauteur maximales ont été évaluées à l'aide du logiciel ArcGIS. Cet inventaire a été comparé à ceux présents dans les rapports d'inspection des coupes de roc (CANMET 1998, 2004 et Golder Associés 2009), tel que présenté dans le fichier « Nom_correspondance_consultant.xls » en annexe numérique à ce rapport. Certaines correspondances ont été difficiles à établir et ont été vérifiées lors des travaux terrain. Étant donné que l'inventaire réalisé comprenait un nombre supérieur de coupes de roc à celui disponible dans les inspections passées, un nouveau système de nomenclature a été élaboré pour nos travaux. Son fonctionnement est détaillé ci-dessous, puis quelques explications sur son évolution au cours du projet et les modifications qui ont mené à l'élaboration de la nomenclature finale sont données. Les tableaux fournis dans les rapports précédents utilisent l'ancienne nomenclature. Le tableau « Nom_Correspondance_Consultants.xls » en annexe numérique fait le lien entre les deux nomenclatures.

Les règles suivies pour l'élaboration des noms des coupes de roc sont décrites ci-dessous. Le nom d'une coupe pourrait être **A25 C E**.

1. La première lettre est associée au canton.

2. La première lettre est suivie du numéro ascendant du sud vers le nord, débutant à 1 pour la coupe la plus au sud du canton.
3. Si une lettre est présente, elle représente une section de la coupe. Les lettres sont en ordre croissante du sud vers le nord. Ces cas, qui sont rares dans la nomenclature, sont des coupes continues, mais pour lesquelles un facteur géométrique ou géotechnique change sa caractérisation en termes de chute de pierres suffisamment pour nécessiter une distinction. Elle est donc réservée à des coupes continues. Cette option permettra aussi des divisions futures de coupes, lorsque, par exemple, l'application d'une méthode de mitigation à une section de la coupe seulement changerait la catégorie d'une partie de la coupe.
4. Le nom de la coupe se termine par E ou W pour signifier qu'elle se situe du côté est ou ouest de la voie ferrée. Le côté ouest est situé à gauche de la voie ferrée pour un usager qui circule de Port-Cartier vers Fermont.
5. Lorsque l'un des deux côtés est continu, mais pas l'autre, le côté non-continu suit la nomenclature du côté continu (fig. 4.9).

Lors de l'inventaire initial, les parois naturelles et les coupes de roc étaient confondues. Certaines coupes n'ont pas été repérées lors de l'étude pré-terrain au bureau (il s'agit essentiellement de paroi de moins de 6 m de hauteur) et ainsi, certaines coupes ont été ajoutées à l'inventaire au cours des travaux de terrain. De plus, certaines coupes de roc ont été divisées en deux coupes distinctes lors des travaux, en général car leur caractéristiques variaient de façon importante. Au final, le nom des coupes a dû être ajusté en fin de projet pour inclure de manière conséquente les nouvelles coupes de roc et exclurent les parois naturelles qui seront traitées comme des parois éloignées dans le MEDCP-SIG. De plus, certaines erreurs s'étaient glissées dans la nomenclature initiale développée à l'hiver 2015. À ce moment, notre compréhension du fonctionnement des cantons était encore limitée et nous disposions que des données aéroportées. Nous avons divisé le secteur à l'étude en canton (ceux proposés par ArcelorMittal) en se fiant aux points milliaires. Pour diverses raisons, cette technique s'est avérée imprécise et les limites des cantons n'étaient pas bien positionnées (entre autre à cause des travaux d'allongement des voies d'évitement), occasionnant certaines coupes à être associées au mauvais canton. Par exemple, la coupe B1 était en réalité située au sud de l'aiguillage Baker. De plus, au cours de nos travaux, l'importance des parois éloignées a fait surface et une nomenclature a été développée spécifiquement pour les parois éloignées, i.e. les parois éloignées sont nommées d'après le point milliaire central vis-à-vis duquel est situé cette paroi. Certaines avaient initialement été incluses dans les coupes et elles ont été extraites de la liste des coupes lors de la mise à jour. Enfin, avec les travaux terrain, nous avons modifié la nomenclature pour ajouter certaines coupes manquantes et nous avons divisé d'autres coupes en deux.

Selon cet inventaire, la longueur des coupes considérées totaliserait 54 km. Lorsque la voie ferrée est encaissée entre deux parois la longueur des deux coupes est incluse à ce total. Les tranchées sont relativement communes et comptent pour approximativement 29% des coupes de cet inventaire.

Nous avons procédé à une classification préliminaire des coupes de roc recensées à l'étape précédente. Nous avons opté pour l'approche proposée dans le RockFall Hazard Rating System (RHRS, Pierson 2012) et discutée lors du premier atelier du projet *ParaChute*. Pour ce faire, nous avons adapté les paramètres de cette étape du RHRS (tableau 4.2) à la situation de la voie ferrée. Les critères adoptés pour le projet *ParaChute* sont identifiés au tableau 4.3. On pourra y noter que les nouveaux paramètres proposés pour le classement préliminaire des parois rocheuses font une utilisation des diverses données déjà disponibles à

partir des analyses de bureau réalisées en utilisant le MNT et des outils de trajectographie adaptés (présentés à la section 4.5).

Pour chaque coupe, une priorité est associée à chacun des trois critères. Puis, une priorité globale (A, B ou C) est déterminée. Dans cette nomenclature, la catégorie A indique une coupe de priorité élevée et C de priorité faible. Pour être classée A, une coupe doit avoir au moins un critère avec une priorité élevée. Pour être classée B, la coupe doit avoir au moins un critère classé modéré, mais aucun critère classé élevé. Les autres coupes sont classées C.

La pré-classification a été réalisée par l'analyse au bureau des données déjà disponibles (MNT, photographies aériennes et trajectographie systématique (section 4.5) et non lors d'une inspection visuelle sur le terrain comme le dicte la méthode initiale. Toutes les informations citées précédemment sont utilisées pour l'évaluation des coupes. Sur les 273 coupes recensées initialement (inventaire de l'automne 2014), 88 sont catégorisées A, 121 B et 73 C.

Tableau 4-2. Critères proposés dans le RHRS original pour effectuer la classification préliminaire des coupes de roc.

Critères	A	B	C
<p><u>Activité antérieure</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fréquence de chutes sur la route - Quantité de matériel - Grosseur du matériel - Fréquence de nettoyage 	Élevée	Modérée	Faible
<p><u>Potentiel estimé de roche sur la route</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Volume estimé du matériel - Volume estimé par événement - Quantité disponible - Efficacité de la fosse de captage 	Élevé	Modéré	Faible

Tableau 4-3. Paramètres de la pré-classification des coupes développés pour le Projet ParaChute

Critères	Priorités		
	Élevée	Pas suffisamment d'archives pour classer modéré	Faible
<u>Activités antérieures</u> - Activités antérieures connues - Quantité de matériel	Activité(s) connue(s)		Pas d'activité connue
<u>Inspections antérieures</u> - Cote de la dernière inspection (inclue courbure de la voie, mitigation en place, proximité de la coupe à la voie ferrée) - Cote des inspections précédentes	Élevée Cotes 3, 4 et 5 ou ayant déjà eu une cote de 4 ou 5	Modérée Cotes 2 ou a déjà eu au moins une cote 3 et est maintenant cotée 1 ou 2	Faible Coupes ignorées ou cotes 0 et 1 et aucune cotes supérieures à 2
<u>Potentiel estimé de pierres pouvant atteindre la route</u> - Trajectographie positive (hauteur de la pente, distance de la voie ferrée, fossé) - Hauteur de la pente	Élevé > 15 m ou trajectographie positive très élevée	Modéré 5 à 15 m et trajectographie positive	Faible < 5 m et/ou trajectographie négative

4.5. Identification des falaises éloignées comme sources potentielles de chutes de pierres

L'objectif de la méthode présentée ici est d'identifier toutes les falaises rocheuses qui pourraient engendrer des chutes de pierres atteignant la voie ferrée (falaises potentiellement dangereuses) et qui sont visibles ou non à partir de la voie ferrée. L'information qui découle de ces simulations permet de créer un inventaire des parois rocheuses éloignées de la voie ferrée dont des chutes de pierre pourraient atteindre la voie ferrée, ce qui est utile aussi pour la planification des travaux de terrain. Par la suite, et après avoir réalisé les travaux de terrain, les falaises finalement retenues seront évaluées à l'aide de MEDCP-SIG (section 4.9). Les détails de cette méthode ont été présentés antérieurement (Noël 2016) et sont résumés ci-après.

La méthode développée à cette étape du projet implique cinq éléments : (1) une approche pour localiser les falaises éloignées (les sources), (2) le choix d'un logiciel de simulation de trajectométrie, (3) la définition des paramètres de terrain utilisés pour les simulations de trajectométrie, (4) le découpage du territoire et (5) la façon de classer les falaises dont les chutes de pierres peuvent atteindre la voie ferrée.

4.5.1. Localisation des falaises éloignées (les sources)

Le premier défi dans une telle analyse régionale est de détecter l'ensemble des falaises rocheuses. Ceci pourrait être fait manuellement, mais dans un contexte régional, une approche semi-automatisée a été choisie. Pour ce faire, un algorithme de détection des sommets de falaise a été élaboré (Noël 2016) avec les hypothèses suivantes :

1. toute pente supérieure à 40° d'inclinaison a le potentiel de générer des chutes de pierres, et cela indépendamment de sa capacité réelle;
2. les pierres partent du sommet des falaises;

3. les sources sont placées au niveau de chaque pixel où la pente sous ce pixel est supérieure à 40°, mais dont la pente au pixel supérieure est inférieure à 40 degrés, i.e. au sommet des falaises ayant plus de 40° de pendage, et de même pour des angles pentes de 60° et de 80°.

Ces trois seuils de 40, 60 et 80° représentent respectivement, les petites parois, souvent étagées, sur talus moyenne inclinés, les parois de hauteur moyenne et modérément abruptes et les hautes parois abruptes, voire quasi-verticales. La figure 4.10 illustre les trois scénarios de sommet de falaises, avec les angles de 40, 60 et 80°.

4.5.2. Choix du logiciel de simulation de la trajectométrie 3D

Plusieurs logiciels permettant la simulation de chute de pierres existent, mais la plupart sont en deux dimensions, i.e. ils ont comme intrant un profil topographique et non un territoire. Afin de pouvoir analyser l'ensemble du secteur, un modèle tridimensionnel était donc de mise. De plus, le logiciel utilisé devait permettre d'utiliser un modèle numérique de terrain avec une résolution élevée, puisque les travaux de Crosta et al. (2015), Agliardi et Crosta (2003) et Lambert et al. (2013) ont démontré que les simulations représentent mieux la réalité lorsque la résolution du modèle numérique de terrain est augmentée. Dans ce cas-ci, le modèle numérique de terrain a une résolution de 1 m² par pixel.

Parmi les logiciels permettant de telles résolutions en trois dimensions, trois logiciels ont pu être testés au cours de ce projet et d'un projet précédent (Noël et al. 2013), soit CRSP 3D, Rockfall Analyst et Rockyfor3D. Le logiciel CRSP 3D a rapidement été mis de côté, étant donné qu'il permet de couvrir des secteurs que de 2000 m² à la fois, soit une superficie beaucoup trop petite pour les besoins du projet.

Les deux autres logiciels ont été testés et ont chacun leurs avantages et inconvénients. Par exemple, Rockfall Analyst exporte ses trajectoires sous forme vectorielle, ce qui permet de manipuler chaque trajectoire de manière individuelle, donc de mieux relier ces trajectoires à leurs sources. Par contre, les temps de simulations avec ce logiciel sont très élevés, soit environ trente minutes pour mille trajectoires (Macciotta et al. 2015).

Le logiciel Rockyfor3D a une vitesse de calcul des trajectoires très élevée, soit environ mille trajectoires par seconde. De plus, de nombreux experts ont contribué à son développement et surtout à sa validation, C'est aussi un logiciel très peu dispendieux. Chaque simulation peut aussi être effectuée sur des territoires de plusieurs kilomètres carrés, ce qui est idéal pour le projet. Par contre, les données de sortie de ce logiciel sont en format matriciel, ce qui fait en sorte que les trajectoires ne peuvent être analysées individuellement.

Au final, le logiciel Rockyfor3D a été choisi pour sa rapidité, son faible coût et sa constante mise à niveau par l'équipe d'ECORISQ (basée en Suisse). Nous verrons à la section 4.9.5 que nous avons développé une méthodologie adaptée au format matriciel pour déterminer l'évaluation du potentiel d'atteinte.

4.5.3. Paramètres nécessaires à la simulation de la trajectométrie à l'aide de Rockyfor3D

L'utilisation du logiciel Rockyfor3D demande de préciser des paramètres pour les pierres qui seront simulées, ceux du terrain sur lequel les pierres vont tomber et préciser le territoire à simuler. Les paramètres pour utiliser ce logiciel doivent être remplis dans des fichiers Excel.

Caractéristiques de la pierre simulée

Pour les pierres, il faut fournir leur taille, leur forme et leur masse volumique. Ces trois valeurs permettent de calculer la masse de chaque pierre. Cette valeur est utile pour calculer l'énergie cinétique de la pierre, mais vient aussi influencer les paramètres de terrain qui seront décrits à la prochaine section, notamment le coefficient de restitution tangentiel (R_t). Étant en amont des travaux de terrain, la taille et la forme des pierres ont été choisies arbitrairement, i.e. des pierres de formes cubiques de 30 cm de côté et ayant une masse volumique de 2800 kg/m³. Environ 10 pierres (ou simulations) seront lancées à chaque mètre linéaire des crêtes de falaises identifiées, i.e. par pixel.

Caractéristiques du terrain simulé

Pour ce qui est des paramètres du terrain, ces derniers comportent les coefficients de restitution ou leurs équivalents correspondant à leur nature, et pourraient aussi incorporer des paramètres reflétant l'effet de la végétation sur la propagation des blocs. L'effet de la végétation n'a pas été tenu en compte dans ces simulations. Pour simplifier les calculs, la plupart des logiciels de simulation de chutes de pierres utilisent le concept de coefficient de restitution, qui représente le ratio des vitesses restituées à la suite d'un impact sur celles avant impact. Ceux-ci sont représentés par la vitesse restituée normalement (R_n) et tangentiellement (R_t) à la surface d'impact. Le choix de ces paramètres est souvent subjectif et est souvent fait par ajustement à partir de simulations réelles, ou par rétro-analyse.

Le logiciel Rockyfor3D utilise des paramètres qui s'apparentent à la granulométrie en surface pour estimer les coefficients de restitution de manière plus objective. Ceux-ci sont notés sous forme de rugosités de surface, occasionnés par les particules du sol qui affleurent et forment des obstacles. La hauteur des obstacles mesurée perpendiculairement à la surface est notée en mètre comme rugosité. Ces valeurs servent ensuite à déterminer la valeur du coefficient de restitution R_t , qui est fonction de la taille des blocs, et de leurs vitesses d'impact dans le modèle. Les valeurs de R_n sont quant à elles fonction des types de terrain rencontrés.

Dans le cadre de ce projet, il n'a pas été possible d'utiliser la carte morphostructurale pour aider à définir les caractéristiques du terrain, étant donné que cette étape du projet a été faite avant que la cartographie morphostructurale n'ait été complétée et parce qu'elle est faite à une échelle ne permettant pas de discerner les petites et moyennes falaises ainsi que certains talus d'éboulis. Ainsi une méthode a dû être développée pour caractériser, de manière régionale, les paramètres du terrain afin de comparer les valeurs de rugosité avec les valeurs de coefficient de restitution qui sont plus souvent utilisés en pratique (Noël 2016).

L'approche utilisée consiste à utiliser la carte des pentes afin de déterminer les paramètres de terrain pour les simulations dans Rockyfor3D (fig. 4.11). Cette approche part de l'hypothèse que la pente représente souvent le type de matériel qui la constitue. Par exemple, les endroits dont la pente est proche de la verticale seront généralement constitués de roc. Les portions de territoire dont les pentes sont entre 25 et 45° correspondent généralement à des parois peu inclinées, à des talus d'éboulis ou à des pentes recouvertes d'une certaine quantité de dépôts meubles.

Le choix initial des classes de pentes a été fait en observant les variations de pentes pour les différents types de dépôts cartographiés d'un projet précédent, dont ceux au Cap Tourmente. Ces classes ont par la suite été appliquées aux terrains du projet ParaChute, et les limites ont été validées visuellement pour

quelques sites en observant les dépôts de surface. Ainsi, cinq classes de pente ont été retenues, limitées par les seuils de pente de 0, 2, 7, 45 et 90 degrés (fig. 4.11).

Le choix des paramètres de terrain à associer à ces classes de pentes a été fait en premier lieu en se basant sur les types de terrain proposés dans la documentation du logiciel Rockyfor3D, qui correspondent aux dépôts rocheux et morainiques des terrains du projet ParaChute. Les paramètres ont par ailleurs été choisis pour être conservateurs. Les paramètres, tels qu'ils sont décrits par Noël (2016), ont aussi été calibrés à partir de levés de terrain au Cap Tourmente, dans la région de Charlevoix. À cet endroit, le long d'une falaise, le site avait été parcouru à pied et tous les blocs avaient été localisés. En se basant sur ces observations, les propriétés du terrain ont pu être raffinées (fig. 4.12).

Sur le territoire couvert par le projet ParaChute, ces classes de pente ont pu être cartographiées et les paramètres de terrain ont alors pu être appliqués. La figure 4.13 montre un exemple de cette application au secteur du PM 50, qui est aussi visible sur une photographie aérienne oblique.

Découpage du territoire simulé

Le recensement des sources ainsi que la définition des paramètres de terrain ne se fait pas de manière manuelle, mais de manière semi-automatisée. Il n'est pas possible de traiter l'ensemble du territoire en une seule simulation, le territoire a donc dû être séparé en 137 parties. Cette segmentation fait en sorte que les manipulations nécessaires pour produire les différentes couches d'information doivent être répétées de nombreuses fois, particulièrement lorsque différents scénarios doivent être considérés. Afin de remédier à ces simulations, différents outils ont été développés pour produire les différentes couches d'informations de manière automatisée (Noël 2016). De plus, ces outils permettent d'opérer automatiquement le logiciel Rockyfor3D, ainsi que de gérer les fichiers de sortie.

Ainsi, les manipulations réalisées manuellement se limitent à découper le modèle numérique de terrain pour ne conserver que les secteurs d'intérêts, de les exporter dans le format de fichier nécessaire, d'ajuster les paramètres nécessaires pour la création des différentes couches dans des fichiers Excel, et finalement, de lancer les divers outils en spécifiant les répertoires à traiter. L'ensemble se fait par la suite de manière automatisée.

4.5.4. Reconnaissance et classement des falaises potentiellement dangereuses

Les résultats obtenus sont par la suite mis en carte, en utilisant un schéma de couleur permettant de bien voir les contrastes entre les résultats. Sur ces cartes, le tracé du chemin de fer ainsi que la position de départ des sources sont aussi affichés. Une fois les résultats des simulations mis en carte, il est possible d'évaluer le potentiel que l'infrastructure soit atteinte, et ce pour les trois différents scénarios d'emplacement des sources. Il est essentiel ici de rappeler que l'on ne connaît pas et que l'on ne peut pas estimer, à cette étape, l'activité de la paroi, impliquant donc que le potentiel ici évalué ne représente pas un potentiel réel, mais un potentiel hypothétique. À partir des cartes produites, il est possible d'extraire le nombre de trajectoires croisant l'ouvrage et de mettre ces résultats en graphique, ce qui donne un aperçu des endroits qui sont le plus croisés par des trajectoires.

Dans l'optique où l'on souhaite utiliser les résultats pour mieux planifier les travaux d'inspection des parois rocheuses, l'intérêt n'est pas seulement de savoir où la voie ferrée a le plus de chances d'être atteinte, mais surtout de savoir si une source peut ou non atteindre la voie ferrée. Étant donné le format matriciel des

résultats provenant de Rockyfor3D, cette tâche a dû être effectuée manuellement, en observant les résultats et en tentant de lier les trajectoires à leurs sources. Une fois que les sources engendrant des trajectoires qui atteignent la voie ferrée sont identifiées, celles-ci peuvent être classées par degré d'atteinte de l'ouvrage. Les secteurs comportant de nombreuses crêtes de parois avec le potentiel d'atteindre la voie ferrée ont ensuite été analysés en détail et en 3D à partir des données LiDAR aéroportées brutes pour visualiser la maturité de la végétation et d'éventuels signes d'instabilité, tel que des blocs dans la forêt, des talus d'éboulis, des fractures ouvertes, des arbres cassés, etc.

Les cartes des scénarios avec les sources placées au sommet des parois avec les seuils de 60° et 80° ont été analysées pour faire la classification des parois dont les sources ont le potentiel d'atteindre l'ouvrage. Le scénario avec les sources au sommet des parois avec seuil de 40° n'a pas été analysé, car le nombre de parois identifiées est trop important et celles-ci ne semblent pas correspondre aux parois d'intérêts pour la majorité des secteurs couverts.

Pentes à 60°

La classification des parois identifiées avec un seuil à 60° a été fixée arbitrairement de manière à séparer quatre situations souvent rencontrées et jugées de gravité variable. La première classe (1) est rencontrée lorsqu'une paroi produit des trajectoires atteignant en majorité l'ouvrage, avec des densités de trajectoires au niveau de celui-ci de plus de 50 trajectoires par pixel. La seconde classe (2) est rencontrée lorsqu'une paroi produit des trajectoires atteignant l'ouvrage régulièrement avec secteurs traversés par une forte densité de trajectoires (20-50). La troisième classe (3) est rencontrée lorsqu'une paroi engendre des trajectoires qui atteignent régulièrement l'ouvrage, mais avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel ne dépassant pas 20 trajectoires. La quatrième classe (4) correspond aux parois produisant quelques rares trajectoires uniques qui atteignent l'ouvrage exceptionnellement. Sur les cartes, l'ouvrage n'est pas masqué par les trajectoires, seules quelques-unes l'atteignent en des endroits différents.

Pentes à 80°

La classification des parois identifiées avec un seuil à 80° a aussi été fixée arbitrairement, mais n'utilise pas les mêmes classes que pour l'autre scénario abordé, car les trajectoires simulées sont moins nombreuses. Le choix des classes a aussi été établi dans le but de séparer quatre situations souvent rencontrées. La première classe (1) est rencontrée lorsqu'une paroi produit des trajectoires atteignant en majorité l'ouvrage, avec des densités de trajectoires au niveau de celui-ci de plus de 30 trajectoires par pixel. La seconde classe (2) est rencontrée lorsqu'une paroi produit des trajectoires atteignant l'ouvrage régulièrement avec secteurs traversés par une forte densité de trajectoires (10-30). La troisième classe (3) est rencontrée lorsqu'une paroi engendre des trajectoires qui atteignent régulièrement l'ouvrage, avec une densité au niveau de ce dernier ne dépassant pas dix trajectoires par pixel. La dernière classe (4) est identifiée selon les mêmes critères que pour celle du scénario avec le seuil de 60°.

Les classes sont par la suite reportées sur carte, et les parois ont été colorées, pour visualisation, selon la classe. Elles sont colorées en vert pour la quatrième catégorie, en jaune pour la troisième, en orange pour la deuxième et en rouge pour la première. Finalement, l'épaisseur des traits utilisés pour tracer le sommet des parois est épais dans le cas du scénario avec sommets identifiés pour un seuil de 80°, et mince pour le seuil de 60° (fig. 4.14).

Tel qu'il sera présenté dans la section résultats, ces parois éloignées ont été regroupées en 74 secteurs, bordant la voie ferrée sur une longueur d'environ 30 km (19 milles). Ce regroupement en secteur est

effectué en rassemblant les sommets de parois relativement semblables et rapprochés. Un nouveau secteur débute lorsque de nouvelles parois éloignées sont rencontrées après qu'une grande distance soit parcourue le long de la voie ferrée sans en rencontrer, ou lorsqu'il y a un changement important dans la configuration des parois, ou encore pour subdiviser un long secteur comportant de nombreuses parois éloignées. Le point milliaire central du secteur est le nom du secteur, précédé par la première lettre du canton dans lequel il se trouve, par exemple, J PM 154.3 est un secteur regroupant des parois éloignées situées de part et d'autre du PM 154.3 situé dans le canton Jig.

4.6. Analyses des parois rocheuses sur nuages de points

Deux principaux types de données de télédétection ont été acquis pour ce projet, soit des données vectorielles et des données matricielles. Les photographies aériennes, par exemple, sont des données matricielles, i.e. que les données sont représentées sur une matrice, avec une seule donnée par case de la matrice. Les données produites par photogrammétrie, ou les données LiDAR aéroportées ou mobiles, sont des données vectorielles, en ce sens que ce sont des points, ayant une coordonnée x,y,z et différents attributs. Les analyses pouvant être effectuées sur données matricielles et vectorielles ne sont pas les mêmes. Dans le cas des parois rocheuses, les données obtenues via les levés LiDAR ou via photogrammétrie ont été analysés en grande partie en conservant les propriétés vectorielles, donc analysées directement sur les nuages de points.

Les nuages de points peuvent aussi être transformés en format matriciel (raster) pour devenir un modèle numérique de terrain et être ouverts avec des logiciels de systèmes à référence spatiale (SIG), tels qu'ArcGIS ou QGIS. Pour les nuages de points représentant des parois rocheuses, le format matriciel est peu utile car il s'agit d'une représentation en 2.5D de l'information et non pas en 3D. Il s'agit d'une vue en plan, auquel une seule valeur d'élévation est associée à chacun des pixels. Les surfaces abruptes y sont sous représentées et il est rare que cette option soit utilisée. Ceci est illustré à la figure 4.15. Dans le cadre du projet, l'évaluation de la distance de visibilité présentée plus loin se fait avec des données matricielles.

La majorité des opérations décrites dans cette section nécessitent le calcul de vecteurs normaux aux points. Un vecteur normal est un vecteur unitaire perpendiculaire à une surface et à partir duquel on peut reconstruire ledit plan, ou mesurer l'angle entre deux plans. Les vecteurs normaux, aussi nommés les normales, permettent d'orienter le nuage de points en indiquant le dessus et le dessous de la surface. Évidemment, un point n'est pas une surface et on ne peut pas y associer directement un vecteur normal. Différents artifices permettent d'y arriver. Par exemple, le point est associé à ses voisins et la normale calculée est celle de la surface déterminée par cet ensemble de points. Une autre technique est de procéder par triangulation et d'associer le vecteur normal au triangle résultant. Cette opération peut demander plusieurs itérations avant d'avoir un résultat satisfaisant. Le problème le plus fréquent est l'inversion de sections de la surface, i.e., certains vecteurs pointent vers l'intérieur de la paroi rocheuse plutôt que vers l'extérieur. Ceci occasionnera des problèmes lors de certaines analyses. Les outils des logiciels CloudCompare, Coltop 3D et Polyworks sont utilisés pour calculer les normales.

4.6.1. Caractérisation géométrique d'une surface

Les distances et les angles entre des éléments du nuage de points peuvent être mesurés. Ainsi, l'analyse des parois rocheuses débute en général par la caractérisation géométrique de celles-ci. Par exemple, des paramètres tels que la hauteur, l'inclinaison, l'irrégularité de la face et les dimensions de la fosse de captage peuvent être évalués. Un protocole permettant de mesurer avec précision et à partir d'un nuage de points les dimensions des fosses de captage en utilisant les outils du logiciel CloudCompare a par exemple été développé dans le cadre de ce projet (voir l'annexe 2 de Cloutier et al. 2016). Ces analyses permettent d'obtenir la moyenne de la largeur du fossé, ainsi que les valeurs minimales, maximales et l'écart-type du fossé le long d'une coupe de roc. Ces valeurs sont utilisées, entres autres, dans l'évaluation du potentiel d'atteinte pour les coupes de roc.

Les coordonnées d'une partie des points formant un nuage peuvent aussi être extraites pour obtenir des profils topographiques. Les profils topographiques sont utiles à diverses applications telles que les simulations de trajectoires de chutes de pierres en 2D (fig.4.16). Un profil détaillé augmente le réalisme et la qualité des simulations et des analyses en découlant, telles que la conception d'un mur de protection.

4.6.2. Caractérisations géomécaniques des massifs rocheux

Caractérisation des discontinuités

La connaissance des discontinuités, c'est-à-dire des fractures, des joints, de la foliation et des failles qui découpent le massif rocheux, est pertinente et essentielle puisqu'elle permet de déterminer quels mécanismes de rupture sont géométriquement possibles. Traditionnellement, les paramètres de direction et de pendage des discontinuités et autres structures rocheuses sont mesurés à l'aide d'une boussole. L'information contenue dans un nuage de points dont les normales sont calculées permet de mesurer l'orientation et le pendage des discontinuités qui peuvent être distinguées dans le nuage de points. Nous effectuons la reconnaissance des familles de discontinuités à l'aide du logiciel Coltop 3D (Jaboyedoff et al. 2009).

Ce logiciel attribue une couleur à chaque point correspondant à l'orientation de sa normale (direction et pendage), selon la charte de couleur présentée à la figure 4.17. Ce procédé permet de mettre en évidence la structure de la formation rocheuse et donc d'identifier les familles de discontinuités présentes dans le massif (fig. 4.17). Une surface de la discontinuité doit être visible dans le nuage, car ce sont les surfaces qui sont échantillonnées. Les points d'une surface sont sélectionnés manuellement, puis la direction et le pendage moyen du groupe de points sélectionnés sont calculés automatiquement. Bien que les sélections manuelles requièrent du temps et doivent être faites par un personnel expérimenté et formé, ces mesures sont plus rapides que celles sur le terrain et offrent la possibilité d'échantillonner des discontinuités situées en hauteur. Ceci est un élément de sécurité important pour quiconque travaille au pied d'un talus rocheux. Toutefois, certaines géométries de discontinuités peuvent être difficiles à échantillonner sur un nuage de points, c'est pourquoi à ce jour, le travail de terrain demeure nécessaire et complémentaire aux analyses Coltop. Finalement, le logiciel Dips (Rocscience, 2016) est utilisé pour représenter les données structurales sur un stéréonet.

Les discontinuités sont caractérisées par d'autres paramètres que leur orientation et pendage, tels que l'espacement, la persistance, la rugosité, l'ouverture et le remplissage. L'espacement et la persistance peuvent être évalués sur nuages de points, mais pas encore de manière automatique et efficace (Abellán et

al. 2014). La difficulté liée à l'évaluation de la persistance est intrinsèque à sa nature et à l'orientation des affleurements disponibles. L'évaluation de la rugosité peut être réalisée sur nuage de points, mais nécessite que la densité et l'exactitude du nuage s'accorde à la taille de la rugosité à mesurer. Par exemple, pour mesurer des déviations de la surface de quelques millimètres, le nuage de points devra avoir une densité supérieure à 1 pt/mm² et un bruit significativement inférieur à la rugosité. De plus, une surface de discontinuité doit être visible dans le nuage de points. L'ouverture s'avère difficile à mesurer dans les nuages de points, car souvent les zones d'ombres sont confondues avec les ouvertures. Le remplissage d'une fissure ne peut pas être évalué sur nuage de points.

Analyse cinématique

La majorité des ruptures dans le roc, dépendamment du type et du degré de contrôle de la géologie structurale, peuvent se classer dans l'une des quatre catégories suivantes : planaire, en dièdre, par basculement et circulaire (fig.4.18) (Wyllie et Mah 2004). La rupture planaire est contrôlée par un plan unique voyant le jour dans la pente (fig.4.18a). La rupture en dièdre implique la rupture d'une masse définie par l'intersection linéaire de deux discontinuités inclinées vers le bas de la pente (fig.4.18b). La rupture par basculement implique des tranches ou des colonnes de roc définies par des discontinuités fortement inclinées vers l'intérieur de la pente (fig. 4.18c). La rupture circulaire survient dans des massifs rocheux qui sont hautement fracturés ou composés de matériel avec une faible résistance intacte (fig. 4.18d), on dit de ces ruptures qu'elles ne sont pas contrôlées structuralement.

Les tests cinématiques sont une méthode commune d'évaluer la faisabilité de certains mécanismes de rupture (Hoek et Bray 1981; Norrish et Wyllie 1996)(fig. 4.19). Ils sont communément réalisés sur un stéréonet, où sont affichées les familles de discontinuités et les failles (si présentes) découpant le massif rocheux, en plus de la pente moyenne de la paroi rocheuse. Ces tests indiquent comment les masses pourraient se détacher d'une paroi, s'il y a lieu, et cela sans considérer le volume rocheux impliqué. Les paramètres d'entrée de ces tests sont essentiellement géométriques tels que (fig. 4.19) :

- pendage et direction de pendage moyens d'une famille de discontinuités;
- pendage et direction de pendage moyens de la paroi rocheuse à l'étude;
- critère de tolérance sur les différences entre les directions de pendage de la pente et de la discontinuité ou de la ligne d'intersection d'un dièdre;
- angle de frottement sur la discontinuité qui forme la surface de rupture.

4.6.3. Évaluation des modes de ruptures sur nuages de points (travaux de maîtrise de Mélanie Mayers)

Dans le cadre de ce projet, une méthodologie a été élaborée afin d'identifier les sources potentielles de chutes pierres à partir d'une représentation 3D d'une paroi rocheuse sous forme de nuage de points. L'identification des secteurs propices à cet événement se base sur des calculs de susceptibilité. La méthodologie comporte trois étapes : (1) la caractérisation structurale de la paroi, (2) l'analyse cinématique sur chacun des points composant la paroi et (3) l'évaluation de la susceptibilité pour chacun des modes de ruptures possibles.

L'évaluation de la susceptibilité nécessite un nuage de points dont les vecteurs normaux ont été calculés. Un nuage de points dont les vecteurs normaux sont calculés permet l'identification des plans sous forme de pendage et direction du pendage, qui sont caractéristiques d'une paroi rocheuse. L'identification de ces

plans permet d'une part d'effectuer la caractérisation des discontinuités et d'une autre de caractériser précisément les orientations d'une paroi. La caractérisation des discontinuités est essentielle. En effet, la susceptibilité, telle qu'elle est définie dans cette section, se base sur l'hypothèse que les blocs qui proviennent d'une paroi rocheuse et qui sont impliqués dans une chute de pierres sont issus de modes de ruptures contrôlés par les discontinuités. Les discontinuités doivent d'abord être regroupées entre elles sur la base de leur orientation et de leur pendage. Elles forment ainsi ce qu'on appelle des familles de discontinuités. Les quatre paramètres caractéristiques des familles de discontinuités qui permettent le calcul de la susceptibilité sont les valeurs moyennes de pendage, de direction du pendage, d'espacement et de persistance.

Le pendage et la direction de pendage permettent d'effectuer une analyse cinématique. L'analyse cinématique tel que vu à la section 4.6.2 traite de l'approche sur stéréonet. L'approche sur stéréonet permet pour la pente moyenne d'une paroi d'identifier les discontinuités dont les paramètres géométriques sont favorables aux trois modes de ruptures: le glissement planaire, le glissement dièdre et la rupture par basculement. L'apport du nuage de points permet une analyse cinématique plus complète. L'information que contient chaque point sur le pendage et la direction du pendage du plan qu'il représente peut être la valeur d'entrée de l'analyse cinématique. Cela entraîne des milliers d'analyses qui doivent être traités dans un logiciel, dans ce cas-ci programmé sous Matlab. Le résultat d'une telle analyse renvoie une information booléenne sur les secteurs où un ou des modes de ruptures sont probables. La figure 4.20 illustre une représentation 3D d'une paroi rocheuse où les points de coloration bleue sont des secteurs où la rupture planaire peut se produire.

De plus, l'approche sur nuage de points implique d'effectuer l'analyse cinématique sur des plans en surplomb. Le stéréonet ne permet pas d'effectuer de telles analyses cinématiques. Les critères de ruptures pour les glissements planaires et dièdres en surplomb avaient déjà été traités par Matasci (2015) et ont pu être intégrés à l'analyse. Toutefois, suite à des réflexions un troisième mode de rupture a été intégré et cela lors de ces travaux. Il a été nommé les ruptures par décrochements. Ces ruptures peuvent se distinguer en deux types soit un décrochement suivant un plan, ou suivant l'intersection de deux plans sous forme de dièdre. Les modes de ruptures traités dans ces travaux sont présentés à la figure 4.21.

La susceptibilité est évaluée afin de raffiner l'information issue de l'analyse des modes de rupture. Les équations de susceptibilité telles qu'elles ont été développées par Matasci (2015) prennent trois paramètres en compte, (1) le mode de rupture, (2) la densité de fracturation et (3) un facteur de stabilité. L'équation se résume en :

$$\text{Rupture } X \xrightarrow{\text{oui}} S_x = \frac{A}{L T} \frac{1}{F.S.} \quad [4.1]$$

où X est l'un des cinq modes de ruptures, S_x est la susceptibilité au mode de rupture X, A est l'aire d'observation, L est l'espacement, T est la persistance et F.S. est un facteur de stabilité. La densité de fracturation correspond au premier terme de l'équation où l'aire d'observation (A) est divisée par le produit de l'espacement (L) et de la persistance (T). Effectivement, il a été remarqué que lorsque les valeurs de persistance et d'espacement sont faibles, la densité de fracturation est élevée. Dans le cas où des discontinuités présenteraient des persistances plus grandes que dix mètres et permettrait un ou plusieurs modes de ruptures, un avertissement est soulevé. Cette procédure averti l'utilisateur qu'il y a un potentiel de grande rupture. Une grande rupture présente une plus faible probabilité d'occurrence, mais des

conséquences qui sont potentiellement plus importantes. Les modes de ruptures par décrochement n'étant pas traités dans les travaux de Matasci (2015) ont fait l'objet d'une analyse plus poussée afin de définir leurs équations de susceptibilité.

La susceptibilité permet de distinguer des secteurs problématiques à même une paroi. En effet, l'analyse cinématique effectuée sur l'ensemble d'une paroi, intégrant tous les modes de rupture et toutes les familles de discontinuités ne permet pas de faire ressortir les secteurs les plus problématiques (fig. 4.22a). La figure 4.22b illustre le résultat d'une analyse cinématique complétée des équations de susceptibilité. On remarque que les secteurs en rouge présentent une plus grande susceptibilité à la rupture. Cette information peut être utile à la priorisation des travaux de mitigation lorsque nécessaire.

Éventuellement, cette méthode de déterminer une susceptibilité pourrait permettre de comparer les parois rocheuses entre elles. La comparaison entre les parois nécessite l'obtention d'une valeur unique de susceptibilité caractéristique de la paroi, ce qui nécessite l'intégration des résultats obtenus sur chacun des points. En ajoutant ce facteur à ceux du MEDCP (e.g. eau, végétation, etc) et à la qualité de la paroi basée sur le jugement d'expert, il serait possible d'obtenir un classement final de la dangerosité d'une paroi rocheuse.

4.6.4. Caractérisation visuelle

Les modèles tridimensionnels, les vidéos haute-résolution et les photographies acquises par drone sont des outils exceptionnels pour comprendre et analyser les parois rocheuses. Ils s'avèrent très utiles lors de réunions pour appuyer la communication entre les intervenants. Par exemple, une vidéo permet d'illustrer rapidement une situation à des intervenants n'ayant pas la possibilité de se déplacer sur le terrain. Les photographies et les modèles 3D permettent d'accroître l'efficacité des échanges lors de discussions concernant la planification de travaux, puisque, entre autres, les intervenants peuvent pointer et localiser exactement les volumes rocheux dont il est question. Le matériel obtenu de drones permet aussi d'appuyer les inspections réalisées au sol et s'avère utile dans le cadre d'inspection de filets ou de grillages situés en hauteur. Évidemment, le drone permet uniquement d'acquérir du matériel visuel et ne peut pas être utile pour juger, par exemple, de la solidité d'ancrages.

4.6.5. Extraction de profil et calcul de volumes

Les représentations 3D des parois rocheuses peuvent être utilisées pour évaluer des volumes. Pour ce faire, il faut créer des entités, comme des plans, pour définir une surface fermée. Ensuite, le volume situé à l'intérieur de cet espace fermé peut être calculé numériquement. Une telle évaluation repose sur l'interprétation de la continuité des structures telles que les fractures et leur extrapolation à l'intérieur du massif rocheux. La paroi du PM150, sur laquelle des scans laser terrestres et un modèle photogrammétrique par drone ont été réalisés est utilisée en exemple.

L'interprétation de la fracturation de la paroi du PM150 suggère un potentiel de rupture par basculement d'un secteur délimité par des fractures ouvertes subverticales (figures 4.23a, b et c). D'ailleurs, ce potentiel a été reconnu puisque la paroi est équipée d'un système d'alerte constitué de câbles électriques. Une rupture par basculement d'une partie de la paroi entraînerait le bris des câbles ce qui déclencherait un signal d'alarme. De plus, la voie ferrée a été déplacée pour l'éloigner de la paroi. Les nuages de points sont utilisés pour évaluer le volume qui pourrait être impliqué dans un tel basculement. Dans un premier temps,

trois fractures ouvertes semi-parallèles sont reconnues. Conséquemment, trois scénarios de rupture sont définis et illustrés à la figure 4.23. Des plans sont ajustés à ces fractures ouvertes. Plusieurs tentatives sont réalisées, puis le plan qui est jugé le mieux ajusté est conservé pour la suite. Cet ajustement permet de vérifier si l'ouverture de part et d'autre des volumes est alignée. C'est le cas pour les plans ajustés aux deux premières fractures, mais pour la troisième et plus profonde l'ajustement est moins bon. Un bon ajustement est une indication que la fracture est planaire et suit probablement une surface persistante. Toutefois, ceci ne nous indique pas s'il reste des ponts rocheux, donc des sections où la roche n'a pas été fracturée, à l'intérieur. Ces plans permettent de fermer la surface représentée par le nuage de points. Il est donc possible de calculer les volumes en remplissant l'espace de prismes rectangulaires, dans cet exemple, ils mesurent 0.25 m de côté (figures 4.23d et e). Les volumes mesurés sont de 220, 2200 et 6000 m³ et le travail pourrait être raffiné afin de réduire les incertitudes qui sont associées à la définition géométrique des blocs. L'incertitude est relativement limitée pour le premier et le deuxième volume, mais pour le plus grand volume la définition de la limite supérieure est ambiguë puisque les fissures sont obstruées par la végétation et que le nuage est moins dense et troué dans la partie supérieure. Ainsi, le volume estimé est entre 5100 et 7000 m³.

Les nuages de points obtenus des scans laser mobiles sur rail documentent aussi la géométrie actuelle des coupes. Ces données pourraient être utilisées pour documenter l'évolution d'une coupe. Par exemple, suite à des travaux d'écaillage, si les volumes retirés sont suffisants, il serait possible de déterminer les sections de la coupe qui ont été écaillées et aussi estimer le volume de matériel retiré.

4.6.6. Calcul de la distance de visibilité

La distance de visibilité peut être définie de plusieurs manières. Par exemple, la distance de visibilité d'arrêt est la somme de la distance parcourue durant le temps de perception-réaction et de la distance de freinage. (Association des Transports du Canada, 2011), ce qui implique que la vitesse et la capacité de décélération doivent être prise en compte. Dans le contexte actuel du projet, la distance de visibilité aura comme définition la distance maximale qu'un conducteur de train peut percevoir un objet (e.g. bloc) déjà tombé sur la voie ferrée, soit la définition utilisée par exemple dans le domaine du marquage routier. Cette distance n'inclut pas le temps de perception-réaction du conducteur et n'est pas non plus fonction de la vitesse du train. Cette distance correspond en fait à la distance disponible pour effectuer un freinage, car elle correspond à la distance à laquelle un conducteur de train pourrait apercevoir un bloc situé sur la voie ferrée.

La figure 4.24 illustre de manière schématique le fonctionnement du logiciel, développé dans le cadre de ce projet, qui permet de calculer la distance de visibilité en considérant un bloc de 50 cm de hauteur, placé au milieu de la voie ferrée, et un train en approche dont le conducteur est placé à 4 m de hauteur, au centre de la voie ferrée. Le script déterminera, à l'aide du modèle numérique d'élévation, quelle est la distance maximale où le train peut être perçu à partir du bloc. Pour ce faire, il fait des lignes de visée à chaque deux mètres, et regarde s'il y a un obstacle placé entre lui-même et le train. Dès qu'un obstacle est rencontré, la distance maximale est notée. Cette distance est la distance le long de la voie ferrée et non la distance linéaire entre le train et l'obstacle.

Pour un même point, la distance vers le nord et vers le sud sera différente. Le logiciel fonctionne en tenant compte que la distance sera différente dans un sens et dans l'autre, donc deux valeurs seront données par le programme.

La topographie utilisée est le MNT généré des levés Lidar aéroporté acquis en 2014 avec des pixels de 1 m². C'est donc une distance maximale de visibilité, qui ne tient compte que de la topographie. Ce script ne tient pas compte de la présence d'arbres qui pourrait ajouter aux obstacles, ni des bâtiments situés en bordure de la voie ferrée. Tel qu'illustré au Rapport 04 du présent projet, cette démarche a en partie été validée par des observations de terrain, mais de plus amples validations seraient nécessaires, selon l'application visée.

4.7. Évaluation pré-terrain

Afin de mieux planifier le terrain, une première analyse de toutes les coupes situées le long de la voie ferrée a été effectuée avant même d'aller sur le terrain. Cette première analyse a été rendue possible par l'acquisition des données LiDAR mobile, tel que présentée à la section 4.1. Principalement, deux types d'analyses ont été effectués avant d'aller sur le terrain, soit une analyse structurale ainsi qu'une analyse de la cinématique. En effet, pour l'ensemble des coupes, l'analyse structurale, telle que présentée dans la section précédente, a été effectuée. À l'aide des données générées par l'analyse structurale, l'analyse cinématique a aussi été effectuée. Pour chacune des coupes, une fiche était remplie (fig. 4.25), fiche comportant les orientations et pendage des familles de discontinuités recensées ainsi que la persistance et l'espacement de ces familles de discontinuités. Sur la fiche propre à chaque coupe était donc aussi apposé le stéréonet montrant les différentes discontinuités ainsi que les résultats des tests cinématiques. Cette analyse cinématique a par la suite pu être infirmée ou confirmée lors des travaux de terrain, par observation, par exemple, des niches d'arrachement qui pourraient être présentes sur les coupes.

4.8. Travaux de terrain

Des visites de la voie ferrée ont été réalisées en 2014, 2015 et 2016. Celle de 2014 avait comme objectif d'acquérir les connaissances de base du tronçon qui serait étudié dans le projet *ParaChute* dans le but de terminer la rédaction du devis de recherche et le développement méthodologique. La majeure partie des caractérisations terrain a été réalisée à l'été 2015 et les méthodes sont détaillées dans les sections 4.8.1 à 4.8.4. L'équipe qui a réalisé les travaux de l'été 2015 était composée de Catherine Cloutier (professionnelle de recherche), François Noël (étudiant à la maîtrise), Alexandra Jasmin et Benoît McFadyen (stagiaires). Au total, 40 jours de terrain ont été réalisés, dont six consacrés au transport entre Québec et Port-Cartier et une à des formations en santé et sécurité nécessaires pour accéder à la voie ferrée. Les travaux se sont déroulés du 2 au 18 juin, du 8 au 23 juillet et du 5 au 11 août. Les travaux effectués à l'été 2016 avaient pour but de compléter l'acquisition des données réalisées à l'été 2015 (Cloutier et Locat 2016) et de mettre en application d'autres techniques d'évaluation des parois rocheuses. Les travaux se sont déroulés en deux temps, soit du 4 au 16 juin et du 17 au 25 août 2016 par Catherine Cloutier (professionnelle de recherche), Mélanie Mayers (étudiante à la maîtrise), Frédérique Tremblay-Auger (stagiaire-finissante) et Benoît McFadyen (stagiaire). La période de terrain du mois d'août avait comme objectif d'acquérir les données nécessaires à la génération de nuages de points 3D de parois éloignées et de hautes coupes de roc à l'aide d'un drone. Les détails méthodologiques reliés aux vols de drones et les détails techniques des appareils utilisés sont décrits dans la section 4.2 du présent rapport et dans le Rapport technique 04 du projet (Cloutier et al. 2016).

4.8.1. Validation de la structure rocheuse et des modes de ruptures

Sur le terrain, le travail consistait à valider l'analyse faite à l'ordinateur (section 4.6 du présent rapport) et à compléter et corriger au besoin. Les différentes familles de discontinuités inscrites sur la fiche étaient validées sur le terrain avec un minimum de mesures à la boussole. La connaissance des structures rocheuses est essentielle puisqu'elle seule permet de caractériser les mécanismes de rupture géométriquement possibles dans une paroi rocheuse.

Puis, lors de la visite de la coupe, on indique sur la fiche les modes de rupture apparents. En général, les tests cinématiques reconnaissent plus de types de rupture que ce qui est réellement observé sur une paroi. Ceci est facilement expliqué par les considérations suivantes:

- la persistance et l'espacement des familles de discontinuités ne sont pas pris en compte dans les tests cinématiques;
- l'angle de frottement est le même pour toutes les discontinuités et la rugosité n'est pas pris en compte dans les tests cinématiques;
- et l'inclinaison de la pente est fixée entre 85 et 90° pour toutes les coupes, ce qui n'est pas l'inclinaison réelle.

4.8.2. Observations des paramètres affectant la stabilité

L'observation des parois rocheuses sur le terrain permet de caractériser certains paramètres affectant la stabilité et qui sont difficilement ou pas du tout observables sur les données LiDAR. Ces paramètres étaient notés par deux personnes, chacune utilisant une fiche différente.

La première fiche est celle présentement en élaboration au Ministère des Transports, de la Mobilité Durable et de l'Électrification des transports par l'équipe de Mécanique des roches qui collabore au projet *ParaChute*. Nous la nommerons «*Fiche MTQ*» dans la suite du rapport. L'utilisateur qui remplit cette fiche doit sélectionner parmi quatre options pour décrire 19 paramètres en lien avec la stabilité d'une paroi rocheuse (tableau 4.4). En plus de ces 19 paramètres, l'utilisateur doit évaluer le pourcentage relatif de chacun des modes de rupture par rapport aux autres (basculement, dièdre, plan et rotationnel) en plus d'estimer le volume qui pourrait être impliqué dans chaque type de rupture en se basant sur les observations visuelles des masses disponibles.

Une deuxième fiche expérimentale a été développée par le LERN. Dans celle-ci, l'utilisateur note ses observations plutôt que de catégoriser des paramètres préétablis. Pour que la prise de note soit plus rapide, des signes et des abréviations sont suggérés dans la colonne de droite (fig. 4.26). La colonne de droite et les encadrés sous-jacents servent entre autres d'aide-mémoire et rappellent à l'utilisateur d'observer certains éléments tels que: les types de rupture, les facteurs aggravants, la géométrie de la pente, les mesures de mitigations en place, les signes de ruptures passées, la présence d'éléments morphologiques aggravants, etc. À l'endos, deux matrices ont été développées pour forcer l'utilisateur à réfléchir et qualifier les instabilités potentielles d'un point de vue temporel et en fonction de la magnitude des événements possibles. En d'autres mots, est-ce que cette coupe peut produire une seule masse avec un volume important, mais dont la rupture n'est pas éminente, ou alors si la coupe peut produire fréquemment des chutes de pierres de petits volumes. Évidemment, le ou les points inscrits dans ces matrices le sont de façon très subjective et peuvent varier selon l'expérience de l'observateur, le premier objectif étant de forcer l'observateur à réfléchir à la fréquence et à la magnitude des instabilités et donc d'observer les paramètres

pertinents sur la paroi. Le deuxième objectif était de différencier les coupes par rapport à la magnitude (au volume) des ruptures potentielles et si certaines masses semblent proches ou non de l'instabilité (imminence de la rupture). En pratique, il s'est avéré très difficile de situer la coupe dans ces matrices et au final, elles n'ont pas été remplies systématiquement.

Suite à quelques jours de terrain, nous avons plutôt choisi d'attribuer subjectivement une cote à chacune des coupes. Elle porte le nom de «*Cote terrain*», dans les sections subséquentes et dans la base de données. Cette cote reflète notre jugement selon ce qui a été observé sur le terrain et est destinée à un usage interne pour aider au développement méthodologique. De plus, l'attribution de cette cote permettait aux deux personnes qui remplissaient les fiches de discuter de leurs observations, d'en faire un bilan et de débattre sur les facteurs influençant la stabilité de la coupe. Suite à cette discussion qui avait lieu lorsque possible avant de quitter l'emplacement de la coupe, on pouvait sentir le besoin de clarifier quelques éléments en retournant les observer sur le terrain ou en regardant les photographies de la coupe prises en hélicoptère ou en regardant les photographies prises lors des inspections passées (1973 à 2009), par exemple, pour voir l'évolution de la paroi. Les cotes varient de 1 à 5, avec des catégories intermédiaires (1.2, 2.1, etc.). Aux fins de représentations graphiques, les chiffres ont été transformés pour prendre des valeurs de 1 à 13 afin que les cotes intermédiaires soient incorporées correctement. La correspondance est inscrite au tableau 4.5. La description des cotes a évolué au cours de la première vague de terrain pour ensuite être stable pour les deux autres vagues de terrain. Les cotes n'ont pas été révisées, mais nous croyons qu'il y aurait peu de différence et parce que cette cote a pour but de représenter l'impression terrain et non une analyse des caractéristiques faites au bureau.

Tableau 4-4. Paramètres de la fiche en développement par l'équipe du MTQ telle qu'elle était en mai 2015 et utilisée lors des travaux de l'été 2015 par le LERN.

Pointage		3 points	9 points	27 points	81 points	
Géométrie	Hauteur	< 6 m	6 à 15 m	15 à 30 m	> 30 m	
	Tremplin	Aucun / palier adéquat	Mineurs (quelques variations)	Plusieurs (parois ondulantes)	Majeurs / palier vers la route	
	% Efficacité du fossé	> 95%	65 à 95%	30 à 65%	< 30%	
	Orientation	N	E, O, NE, NO	SE, SO	S	
	Historique de chutes route/fossé	Aucun/quelques blocs dans le fossé	Aucun/plusieurs blocs dans le fossé	Quelques-uns/Plusieurs blocs dans le fossé	Plusieurs/Plusieurs blocs dans le fossé	
	Inclinaison générale	< 45°	45 à 60° et > 85°	60 à 75°	> 75°	
	Eau	Sec	Humide	Écoulement faible	Écoulement fort/continu	
	Végétation	Forte	En bancs	Dispersée	Absente	
Géologie	Roc	% abondance d'instabilités	< 10%	10 à 20%	20 à 30%	> 30%
		Taille blocs/vol instables	< 30 cm / < 1 m ³	30 à 60 cm / 1 à 4 m ³	60 à 100 cm / 4 à 8 m ³	> 100 cm / > 8 m ³
		Forme blocs	En feuillet	tabulaire	Rectangulaire	Cubique / sub-arrondi
		Surplomb	0 à 30 cm	30 à 60 cm	60 à 100 cm	> 100 cm
		Déformation	Homogène/massif	Foliée/gneissique	Litée/rubanée	Schisteux/friable
	Discontinuités	Nbr de familles	< 3	3-4	4 à 6	> 6
		Orientation et persistance	< 3 m et entrant dans la paroi	> 3 m et entrant dans la paroi	< 3 m et sortant de la paroi	> 3 m et sortant de la paroi
		Espacement	> 2000 mm	600 à 2000 mm	200 à 600 mm	< 200 mm
		Ouverture	Fermée	< 1 mm	1 à 5 mm	> 5 mm
		Remplissage	Frais	Altéré	Partiellement remplie	remplie (argile, silt)
		Friction (micro/macro)	Rugueux/Ondulant	Lisse/Ondulant	Rugueux/planaire	Lisse/planaire

Tableau 4-5. Présentation des cote terrain telles qu'attribuées lors des travaux de terrain (première colonne) suivie des modifications numériques effectuées pour l'affichage graphique et la comparaison avec les catégories MEDCP qui seront présentées à la section 4.9.

Cote terrain	Cote terrain sur une échelle de 1 à 13 pour affichage graphique	Cote terrain sur une échelle de 1 à 5 pour comparaison avec les catégories de priorité MEDCP
1	1	1
1.2	2	1
2.1	3	2
2	4	2
2.3	5	2
3.2	6	3
3	7	3
3.4	8	3
4.3	9	4
4	10	4
4.5	11	4
5.4	12	5
5	13	5

4.8.3. Photogrammétrie

Des photographies des coupes étaient prises systématiquement, sauf pour les coupes de faible hauteur (< 6 m) où le danger lié aux chutes de pierres était jugé faible. Ces photographies devraient permettre de reconstruire un nuage de points tridimensionnel à l'aide des techniques de photogrammétrie (Westoby *et al.* 2012). L'appareil utilisé est un Nikon D7000 avec une lentille ajustable de 16 à 85 mm AF-S NIKKOR. 405 Go de photographies ont été prises lors des travaux de terrain.

La personne qui prenait les photographies portait un GPS qui enregistrerait le trajet suivi. Par la suite, une coordonnée GPS est associée aux photographies en se basant sur l'heure de prise du cliché. Les coordonnées des photographies sont disponibles dans les métadonnées et/ou dans un fichier texte dans le répertoire où se trouvent les photographies (voir la section 5 Structure de la base de données pour le classement des données). Une attention particulière était portée pour s'assurer que l'horloge de l'appareil photographique était ajustée à l'heure GPS.

De plus, tel que mentionné précédemment, le drone a été utilisé pour acquérir des photographies de près de 36 parois rocheuses, qui sont soit les parties hautes des coupes de roc, ou des parois éloignées.

4.8.4. LiDAR terrestre

Finalement, sur certains sites, des scans LiDAR terrestre ont été faits afin de parfaire le modèle LiDAR mobile. Des scans lasers terrestres ont été faits à ces sites:

- PM (point milliaire) 71.8, E20 E (scans en 2015 et 2016);
- PM 149.8, J PM149.9 (scans en 2015);
- PM 155.0, Tunnel D, portail nord (2015 et 2016);
- PM 155.13, Tunnel E, portail sud (2016);
- PM 155.34, J34 (2016);
- PM 157.15, J40 (2016).

4.8.5. Distance de visibilité

Des travaux ont aussi été effectués afin de valider les mesures de distance de visibilité déterminées de manière numérique. Pour ce faire, une personne se plaçait sur la voie ferrée, à une distance d'environ 50 cm du sol pour représenter un bloc sur la voie ferrée, et par la suite le camion monté sur rail reculait, jusqu'à la distance maximale où la personne pouvait apercevoir la lumière jaune clignotante du camion situé à environ 3 m au-dessus du sol. Ce camion représentait le train. Les deux personnes étaient en contact avec des émetteurs-récepteurs portatifs ce qui permettait de communiquer afin que le camion s'immobilise au dernier endroit où il pouvait être vu par la personne représentant le bloc. Par la suite, les coordonnées du «bloc» et du «train» étaient acquises via GPS et des jumelles télémétriques étaient utilisées afin de mesurer la distance entre le «bloc» et le «train». Pour une même coupe, cette opération était répétée à chaque 10 à 20 m, selon le temps disponible et les autres contraintes liées, par exemple, au vol du drone qui se faisait au même moment.

Cette méthode comporte quelques sources d'incertitudes, telles que la précision des GPS qui est souvent faible dans les parois en tranchée. Par contre, elle permet de prendre en compte la présence d'arbres, ce qui n'a pas été pris en compte dans l'approche numérique utilisée pour déterminer la distance de visibilité et présentée à la section 4.6.5.

4.9. Développement du MEDCP-SIG

4.9.1. Retour sur la littérature

Les systèmes de classification des parois rocheuses ont été développés pour répondre aux besoins des organismes et agences qui ont un large inventaire de coupes de roc à gérer. Ces systèmes sont un outil qui, associé au jugement d'expert, permet d'obtenir une évaluation rationnelle du niveau de dangerosité causé par les chutes de pierres en provenance d'une coupe rocheuse. Ces systèmes reposent sur des inspections visuelles et des calculs simples et doivent permettre d'obtenir de l'information comparable et reproductible afin de comparer les coupes entre elles. Ce sont des systèmes qualitatifs. Les objectifs de l'implémentation et de l'utilisation de tels systèmes sont d'augmenter la sécurité du réseau ainsi que l'efficacité des investissements en optimisant le choix des cibles et de diminuer les coûts d'entretien (Pierson 2012). Le développement du MEDCP vise les mêmes objectifs. La mise en place d'un système de classification systématique et rigoureux, si utilisé, permet de réduire la responsabilité de l'agence en cas d'accidents, puisqu'ils peuvent montrer qu'ils agissent de manière proactive afin de réduire le danger.

Les premiers développements ont été réalisés par le *Oregon Department of Transportation* entre 1984 et 1991 (Pierson et al. 1989). Leur système se nomme le *Rockfall Hazard Rating System* et nous utiliserons

l'acronyme RHRS pour référer à tous les systèmes de ce type, et RHRS de base pour référer à celui développé par Pierson et al. (1991, 1993). Le RHRS de base a été adopté par plusieurs agences, qui y ont fréquemment apporté des modifications (Ministère des transports de l'Ontario et ceux des états de New-York, Oregon, Utah, Ohio, Missouri, Tennessee et Colorado). Dans ce rapport, nous ne présenterons pas en détail tous les systèmes qui ont été développés, mais nous mettrons l'emphase sur quatre systèmes: le RHRS de base et ses dérivés, particulièrement celui du Colorado, le système de l'état de New-York (RSRP, NY-DOT 2007, Pierson et Turner 2012) et le système du CN (Pritchard et al. 2005), ainsi que son adaptation en 2015 réalisée par BGC Engineering pour l'application à la voie ferrée de QNS&L - IOC (Lato et al. 2016a et b).

Deux excellentes revues des systèmes de classifications ont été réalisées. L'une par Pierson et Turner (2012) qui traite de la situation en Amérique du Nord et l'autre par Ferrari et al. (2016) qui propose une revue de systèmes utilisés internationalement (Amérique du Nord, Autriche, Italie, Chine) et pour l'application dans des carrières et divers projets d'ingénieries.

RHRS de base et les systèmes qui en sont dérivés

Le principe du RHRS de base est que des pointages sont donnés à un certain nombre de paramètres, puis l'addition des pointages donnent le score RHRS. Plus ce score est élevé, plus la coupe de roc devrait être prioritaire. Les pointages suggérés évoluent exponentiellement et sont de 3, 9, 27 ou 81, la valeur de 81 est associée aux conditions les moins favorables à la stabilité. L'utilisateur expérimenté pourrait opter pour un pointage intermédiaire et ceci est d'ailleurs conseillé.

Les dix critères du RHRS de base sont présentés au tableau 4.6. Trois sont associés aux conséquences potentielles (*Average Vehicle Risk*, *Percent Decision Sight Distance* et le *Roadway width including paved shoulders*). Deux paramètres sont associés à la détermination du potentiel qu'une chute de pierres atteigne la route ou non (*Slope height* et *Ditch effectiveness*). Quatre sont en lien avec la susceptibilité de la paroi à générer des chutes de pierres (les deux du *Geological character*, *Climate and presence of water on slope* et *Rockfall history*). Le dernier paramètre, *Block size and volume of rockfall event*, peut affecter autant les chances que la chute de pierres atteigne la route, que la susceptibilité à générer des chutes de pierres. Puisque le score et la catégorie de priorité résultante est obtenue de l'addition des dix pointages, le RHRS de base accorde plus de poids à la susceptibilité qu'au potentiel que la chute de pierres atteigne la route. Les trois paramètres liés aux conséquences caractérisent la proportion de temps où un véhicule se trouve dans la zone, un pourcentage indiquant si la distance de freinage est adéquate et la largeur disponible pour faire des manœuvres d'évitement.

Plusieurs modifications du système RHRS conservent l'approche générale, i.e. additionner un certain nombre de pointages pour obtenir un score reflétant la dangerosité de la coupe de roc. Le système du Colorado (CRHRS) considère un grand nombre de paramètres, décrits au tableau 4.7. Une distinction est apportée entre les paramètres liés à l'aléa (au nombre de 18) et ceux liés au risque, ou en d'autres mots aux conséquences (au nombre de 3). Les paramètres des termes aléa et risque sont additionnés séparément et ils ne sont pas combinés pour obtenir une valeur finale (Pierson et Turner 2012). La méthodologie du Colorado fait donc une distinction entre l'aléa et les conséquences. Ils ont aussi apporté des modifications aux critères pour les rendre moins subjectifs, en enlevant les termes du type faible, modéré, élevé, quelque uns, plusieurs, etc (Russel et al. 2008, Santi et al. 2009). La méthodologie du

Colorado stipule que les parois subjacentes, qui n'ont pas nécessairement été modifiées par l'homme, doivent aussi être considérées lors de l'évaluation d'un secteur.

Une étude statistique réalisée sur les résultats du CRHRS appliqués à 355 coupes de lithologies cristallines a montré que l'aléa pouvait être estimé adéquatement à partir de seulement quatre des 18 paramètres (Santi et al. 2009). Les paramètres qui influençaient le moins le résultat et jugés moins importants dans leur étude étaient l'inclinaison de la pente, les cycles de gel-dégel, la présence d'eau et la rugosité le long des discontinuités. Au contraire, les paramètres sur la présence de tremplin et l'orientation de la pente étaient les plus importants selon leur étude statistique.

Tableau 4-6. Paramètres et critères du RHRS de base (Pierson 2012).

CATEGORY		RATING CRITERIA AND SCORE				
		POINTS 3	POINTS 9	POINTS 27	POINTS 81	
SLOPE HEIGHT		25 FT	50 FT	75 FT	100 FT	
DITCH EFFECTIVENESS		Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
AVERAGE VEHICLE RISK		25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time	
PERCENT OF DECISION SIGHT DISTANCE		Adequate site distance, 100% of low design value	Moderate sight distance, 80% of low design value	Limited site distance, 60% of low design value	Very limited sight distance, 40% of low design value	
ROADWAY WIDTH INCLUDING PAVED SHOULDERS		44 feet	36 feet	28 feet	20 feet	
GEOLOGIC CHARACTER	CASE 1	STRUCTURAL CONDITION	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Discontinuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
		ROCK FRICTION	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling or slickensided
	CASE 2	STRUCTURAL CONDITION	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
		DIFFERENCE IN EROSION RATES	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
BLOCK SIZE		1 FT	2 FT	3 FT	4 FT	
QUANTITY OF ROCKFALL/EVENT		3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards	
CLIMATE AND PRESENCE OF WATER ON SLOPE		Low to moderate precipitation; no freezing periods, no water on slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation and long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	
ROCKFALL HISTORY		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Tableau 4-7. Grille d'évaluation des paramètres du système du Colorado (CRHS) tirée de Pierson et Turner (2012).

Colorado Rockfall Hazard Rating Field Worksheet			
Site Information		ENGINEERING REGION	MAINTENANCE SECTION
ROUTE NO	SEGMENT ID NUMBER	END MILE POST	R/L OF CENTERLINE
COUNTY	BEGIN MILE POST		RATER
DATE			
Actual Values			
Slope Height	Ditch Depth	Major rockslide potential:	
Slope Angle	Sight Distance	Dominating rockfall mode: Block-in-matrix / Sedimentary rock / Crystalline rock	
Ditch Slope	Speed Limit	Dominating sight distance: Horizontal / Vertical	
Ditch Width	ADT	Mitigation effectiveness: A B C D F	
Rating	Cut Slope / Total Slope (Circle one)	9 Points	27 Points
		50 to 75 ft	75 to 100 ft
		1 to 2 years	Yearly, seasonal
		2 to 4	4 to 8
		Minor (< 2 ft. surface variation)	Major (> 6 ft. surface variation)
		65% to 100% / Class 1	< 30% / Class 4 / ≥ Major launching features
		< 10 inches	> 35 inches
		1 to 5	16 or more
		Dry	Running water
		N	S
		0 to 1 ft	> 4 ft
		6	1 to 2
		1 to 2 weak interbeds, < 6 in.	> 2 weak interbeds, > 6 in.
		Homogenous / massive	Schist / shear zones < 6 in.
		0 to 1 ft	2 to 4 ft
		Fresh	Slightly altered / softened
		<1 ft / <1 cy	2 to 5 ft / 3 to 10 cy
		1	> 5 ft / >10 cy
		< 10 ft and dips into slope	> 10 ft and daylight out of slope
		Closed	> 5 mm
		Fresh	Clay infilling
		Rough	Slickensided
		< 1 ft	> 5 ft
		Tabular	Rounded and smooth
		Fully vegetated	Isolated plants
Total Hazard Score:			
		60% to 80%	< 40%
		25 to 49%	75% or more
		3 to 5	9 and over
Total Risk Score:			
Additional Rater's Comments:			
Transportation Research Board Rockfall: Characterization and Control			

Approche par multiplication des paramètres (NY, CN et BGC-IOC)

Dans cette sous-section, des systèmes de classification dont l'équation générale repose sur une multiplication seront présentés. La multiplication permet de s'approcher des principes des analyses de risque (équation 4.2), où l'aléa est multiplié aux conséquences, qui sont souvent représentées par un coût.

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Coût des pertes potentielles (traduit de Fell et al. 2005).} \quad [4.2]$$

Le premier système présenté ici est celui de l'état de New York (NY-DOT 2007, Pierson et Turner 2012). Il distingue trois composantes détaillées ci-dessous, qui sont multipliées pour obtenir la valeur finale, dénommée le *Total relative risk*.

- 1) Le facteur géologique caractérise les propriétés géologiques de la paroi en fonction de sa susceptibilité à générer des ruptures. Ces paramètres sont similaires à ceux du RHRS, mais un est ajouté pour prendre en considération les parois naturelles subjacentes. Les paramètres sont présentés dans le tableau 4.8.

Tableau 4-8. Reproduction du tableau présentant les paramètres évalués pour déterminer la valeur du facteur géologique du système de classification de l'état de New York (Pierson et Turner 2012).

Score		1 point	3 points	9 points	27 points	81 points	
or	1a	Geology (crystalline)	Massive, no fractures dipping out of slope	Discontinuous fractures, random orientations	Fractures forming wedges	Discontinuous fractures dipping out of slope	Continuous fractures dipping out of slope
	1b	Geology (sedimentary)	Horizontal to slightly dipping	Raveling, occasional small blocks	Small overhangs or columns, numerous small blocks	Overhangs, some large unstable blocks, high columns	Bedding or joints dipping out of slope
and	2	Block Size	≤ 0.15 m	0.15 – 0.3 m	0.3 – 0.6 m	0.6 – 1.5 m	1.5 m +
	3	Rock Friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Smooth, slickensided	Clay, gouge filled
	4	Water/Climate	Dry	Some seepage	Moderate seepage	High seepage, brush vegetation	High seepage with long backslope and high vegetation
	5	Rockfall History	No falls (0-4 / yr)	Occasional minor falls (5-14 3 yr)	Occasional falls (15-24 / yr)	Regular falls (25-34 / yr)	Major falls / slides (35+ fall / yr)
	6	Backslope Conditions	Flat / gentle 0 – 15°	Moderate 15 – 25°	Steep 25 – 35°	Very steep > 35° or 25 – 35° with boulders	Very steep slope > 35° with backslope boulders

- 2) Le facteur de section caractérise le potentiel qu'une chute de pierres atteigne la route. Les critères de conception de Ritchie sont utilisés comme valeur de référence (Pierson et Turner 2012). La valeur est obtenue d'une équation mettant en relation la profondeur (DR) et la largeur (WR) de fossé de référence, la profondeur réelle du fossé (DA) et la distance entre le pied de la pente et l'épaulement (WA) qui peut prendre une valeur minimale de 1 m.
- 3) Le facteur lié à l'exposition humaine est obtenu de l'addition de deux paramètres divisé par 3, qui reflètent la possibilité qu'un véhicule entre en collision avec une roche arrêtée sur la route (Fa) ou la possibilité qu'un véhicule soit frappé par une roche en chute (Fb). Les paramètres nécessaires au calcul de Fa et Fb sont : le trafic journalier annuel moyen, la longueur de la coupe de roc, la distance de visibilité d'arrêt et la vitesse des véhicules.

Pour évaluer les bénéfices que pourraient apporter certains travaux de mitigation, le concept de réduction du risque est introduit dans le système de l'état de New York. La réduction du risque est la différence entre le TRR évalué avant mitigation et le TRR si la mitigation est mise en place, nommé le risque résiduel.

Le deuxième système présenté ici est celui de la compagnie ferroviaire CN, tel qu'il est présenté dans Pritchard et al. (2005). Il se nomme le CN RHRA, pour le *Rockfall hazard risk assessment rating system*. La valeur obtenue de l'équation et permettant de classer les coupes de roc est le *Rockfall Derailment Risk (DRR)* (équation 4.3) obtenu de la multiplication de l'aléa (RF), de la possibilité de déraillement causé par la présence d'un certain volume de roche sur la voie ferrée (DR), de la probabilité des pertes, qui est fonction de la vitesse du train et de la présence d'un système d'alerte (AF) et de l'importance des conséquences potentielles (CF).

$$DRR = RF \times DR \times AF \times CF \quad [4.3]$$

RF , DR , AF et CF sont calculés à partir de l'évaluation de divers paramètres. Nous débuterons par la présentation du terme RF , qui est l'évaluation de la fréquence de chutes de pierres par jugement d'expert ou par la banque de données d'événements. Les valeurs attribuées sont indiquées au tableau 4.9.

Tableau 4-9. Valeurs associées au terme RF (Reproduction du tableau 1 de Pritchard et al. 2005).

Rating Categories	Risk Calculation Scalar
< Monthly (More than 11 per year)	1.0
< Yearly (1 to 11 per year)	0.8
< 10 Yearly (1 per year to 1 per 10 years)	0.6
> 10 Yearly (<1 per 10 years)	0.6

L'évaluation du terme DR (équation 4.4) repose sur la distinction de trois classes de volume de chute de pierres. L'évaluation est faite pour chacune des classes de volumes, dont les résultats sont additionnés pour obtenir DR .

Premièrement, P_{Vn} permet d'associer la proportion relative de chute de pierres qui appartiendra à l'une des trois classes de volume suivantes :

- $V1 : < 1\text{m}^3$
- $V2 : 1 \text{ à } 3 \text{ m}^3$
- $V3 : > 3\text{m}^3$.

La somme de P_{V1} , P_{V2} et P_{V3} donne 1.

Deuxièmement, $P_T|V_n$ représente le potentiel qu'une rupture appartenant à une certaine classe de volume se produise et atteigne la voie ferrée. À partir de la documentation disponible (Pritchard et al. 2005), il n'est pas clair comment est évalué ce paramètre. Le troisième paramètre est une probabilité relative qui permet de tenir compte qu'un amas de volume X composés de petits blocs ($< 10 \text{ cm}^3$) est moins dangereux pour un train qu'un bloc massif du volume X . $P_F|V_n, P_n$ est donc la probabilité que la particule la plus large des débris d'une chute de pierres se retrouve dans l'une des trois classes de dimension suivantes :

- $P1 : < 0.3 \text{ m}$
- $P2 : 0.3 \text{ à } 1 \text{ m}$
- $P3 : > 1 \text{ m}$.

La sommation de $P1$ à $P3$ donne 1.

Le quatrième terme, $P_D|V_n, P_n$, est la probabilité qu'un déraillement se produise considérant qu'un certain volume de roche composé de particules d'un certain volume soit présent sur la voie ferrée.

L'équation se décline comme suit :

$$DR = \sum_{n=1}^3 [P_{V_n} \times (P_T|V_n) \times (P_F|V_n, P_n) \times (P_D|V_n, P_n)] \quad [4.4]$$

Le terme AF est composé de deux éléments, l'un qui tient compte de la vitesse du train et le second de la présence ou non d'un système d'alerte. Dans la documentation consultée, il n'est pas mentionné comment attribuer les valeurs aux deux paramètres. Finalement, le facteur lié aux conséquences associe des valeurs par des classes qualitatives à certains paramètres tels que la proximité d'un plan d'eau, la présence d'autres infrastructures (ponts, tunnels, route), la distance entre la voie ferrée et le haut du remblai ferroviaire et le potentiel que la marchandise atteigne une étendue d'eau.

Le dernier système présenté ici est celui mis au point récemment pour la voie ferrée de l'IOC qui est située dans la même région que celle étudiée dans le projet *ParaChute*. Ce système a été dérivé de l'approche du CN. Le système a une portée plus large, car il vise la caractérisation de plusieurs risques associés à la stabilité des pentes, et non seulement aux chutes de pierres. De plus, des seuils d'alerte basés sur le niveau de la rivière Moisie, les précipitations et les cycles de gel-dégel sont intégrés aux systèmes de gestion qui est développé sur une interface de type SIG. Ici, nous nous concentrerons sur la portion portant sur l'évaluation et la catégorisation des coupes de roc, telle que présentée dans Lato et al. (2016a et b). L'équation générale du système est :

$$Risk (R) = Hazard (H) \times Consequence (C) \quad [4.5]$$

$$R = (P_{gh} \times L_{it}) \times (L_d \times V \times E) \quad [4.6]$$

Où, R est la probabilité annuelle qu'un déraillement survienne suite à l'occurrence d'un risque naturel

H est la probabilité annuelle que la voie ferrée soit non-opérationnelle suite à l'occurrence d'un risque naturel, évalué séparément pour les mêmes trois classes de volume que dans le CN-RHRA et composée de :

$P_{gh-vn} = PF_{vn} \times S_{vn}$, où le PF_{vn} est la probabilité annuelle qu'une chute de pierres de volume $V1$, $V2$ ou $V3$ se produise et S_{vn} est la probabilité que le volume Vn atteigne la voie ferrée.

Lit : Le potentiel que la voie ferrée soit non-opérationnelle est une constante attribuée par classe de volume. $Lit-V1 = 0.03$; $Lit-V2 = 0.3$ et $Lit-V3 = 0.93$. Ceci reflète le fait qu'une rupture de plus gros volume a plus de chance de causer un déraillement, alors qu'un petit volume n'entraînera pas nécessairement de déraillement, e.g. il pourrait être tassé par la locomotive ou passer en dessous de cette dernière.

Le terme C est le potentiel qu'un déraillement soit causé par la condition de voie ferrée non-opérationnelle, et n'est pas discuté dans Lato et al (2016a). Le terme C est défini par

L_d : le potentiel de déraillement

V : vulnérabilité

E : le nombre de personnes exposés au risque de mort dans l'éventualité d'un déraillement.

Le terme S_{vn} est évalué à partir des tableaux fournis dans Pierson et al. (2001). Il est corrigé lorsque des méthodes de mitigation réduisent la propagation des blocs, ou lorsque la pente est inférieure à 6 m et que les fossés font plus de 3 m de largeur. Il n'est pas mentionné si une méthode particulière est appliquée aux coupes de roc de plus de 24.4 m de hauteur, qui est la plus haute coupe de roc étudiée par Pierson et al. (2001).

PF_{vn} est obtenu d'une équation associant une probabilité annuelle estimée sur le terrain par le jugement et multiplié par la proportion des chutes de pierres des trois classes de volume.

La vulnérabilité des personnes dans l'éventualité d'un déraillement est évaluée de six paramètres découlant de la topographie (Lato et al. 2016b), comme c'est le cas dans le système du CN, soit :

- « 1. *Track adjacent to waterbody or river (very likely).*
2. *Track in a tunnel (very likely).*
3. *Track adjacent to steep slope (>25°) that does not flatten out within 25 vertical m of railway (very likely).*
4. *Track adjacent to steep slope (>25°) that flattens out with 25 vertical m of railway (likely).*
5. *Track adjacent to gentle slope (<25°) (likely).*
6. *Track adjacent to flat ground (unlikely). »*

Implications pour le MEDCP

On peut conclure de ce court retour sur les systèmes existants, que chaque organisation doit adapter le système à son territoire pour bien représenter les conditions des coupes de roc rencontrées et le type de corridor de transport étudié. Le MEDCP a été développé pour la voie ferrée d'ArcelorMittal et conjointement avec le MTMDet qui développe une approche pour les routes québécoises. Il s'agit en quelque sorte d'une adaptation du RHRS au territoire québécois. Le MEDCP vise à

- diminuer l'incertitude sur certains paramètres;
- intégrer la méthodologie à un SIG;
- valoriser les données du MNT, par exemple, en prenant en compte des sources potentielles en dehors de l'emprise de la voie ferrée;
- améliorer la reconnaissance des mécanismes de rupture;
- et intégrer les simulations de trajectoires de chutes de pierres dans le système de caractérisation des parois rocheuses.

4.9.2. Objectifs et approche adoptée du MEDCP-SIG

Les objectifs du projet ParaChute pertinents au développement de la Méthode d'Évaluation du Danger Chutes de Pierres (MEDCP) soulignés dans le devis sont les suivants :

1. développer une approche québécoise du *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS) pour mettre au point la Méthode d'Évaluation du Danger de Chutes de Pierres (MEDCP);
2. intégrer la classification du danger associé aux chutes de pierres (MEDCP-SIG) à celle de l'aléa défini par trajectométrie afin de produire des cartes de susceptibilité aux chutes de pierres le long des tracés linéaires (section 4.9.3).

Le premier objectif est atteint par le développement du MEDCP pour les coupes de roc. Le second est atteint de deux manières. Premièrement, par la reconnaissance des secteurs de parois éloignées par des simulations de trajectoires de chutes de pierres régionales (sections 4.5 et 6.2) et, deuxièmement, le développement et l'application d'un système de classification des secteurs de parois éloignées, nommé le MEDCP pour secteurs éloignés.

La notion de danger est définie à partir de ce qui est convenu par le *ISSMGE TC32 - Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms – Version 1, (July 2004)*. Ainsi, le danger est défini comme un phénomène naturel qui peut causer des dommages, décrit en termes de sa géométrie et de ses caractéristiques mécaniques et autres. Le danger peut exister (comme une pente qui flue) ou être potentiel (comme une chute de pierres). La caractérisation du danger ou d'une menace n'inclut pas sa prédiction, cela n'implique donc pas de notions temporelles.

La méthode d'évaluation du danger associé aux chutes de pierres (MEDCP) se veut être un outil d'aide à la gestion des coupes de roc et des falaises naturelles. Cette méthode permet de caractériser les coupes de roc et les parois éloignées afin d'obtenir un classement du danger qu'elles représentent et qui est donc utile au gestionnaire lors de la prise de décisions en lien avec la priorisation des travaux de caractérisation et de mitigation. La méthode n'implique pas une analyse du risque, mais s'inspire de ces concepts pour en élaborer la structure. D'autres systèmes de type *RHRS* s'en inspirent aussi. La méthode part donc de l'équation générale du risque qui peut s'écrire comme suit :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Coût des pertes potentielles} \quad (\text{traduit de Fell et al. 2005}) \quad [4.7]$$

L'aléa est défini comme la probabilité d'occurrence d'un danger au cours d'une période de temps donnée. Le coût des pertes potentielles est une façon d'exprimer la grandeur des conséquences possibles en lien avec l'aléa. Ces définitions peuvent autant être utilisées dans le cadre d'une analyse qualitative que quantitative.

L'aléa est aussi considéré comme une condition pouvant conduire à des conséquences indésirables. De telles conditions sont vues comme celles correspondant à la possibilité de survenance d'une chute de pierres et qu'elle atteigne la voie ferrée. Cette définition est pertinente pour le projet ParaChute, car il n'y a pas suffisamment de données pour déterminer une fréquence des chutes de pierres. Ainsi, il y a donc deux éléments à considérer pour évaluer le danger (**D**) : la susceptibilité d'une paroi à générer des chutes de pierres (**S**) et le potentiel que ces chutes de pierres atteignent la voie ferrée (**A**). En termes pratiques, cela signifie que l'équation du risque sera réduite à celle du danger et exprimée de la façon suivante :

$$\text{Danger MEDCP } (D_{\text{MEDCP}}) = \text{Potentiel de rupture}(S) \times \text{Potentiel d'atteinte}(A) \quad [4.8]$$

Les deux termes de l'équation 4.8 et son résultat peuvent prendre théoriquement une valeur entre 0 et 1. Le concept derrière le MEDCP propose aussi d'inclure dans cette évaluation un terme qui ferait état des conséquences potentielles qui pourraient découler de l'occurrence d'une chute de pierres à un endroit donné. Ce terme permettrait de différencier deux coupes identiques, mais situées à des endroits différents. Par exemple, l'une pourrait être dans une courbe et l'autre dans une ligne droite, diminuant la capacité à apercevoir des roches tombées sur la voie ferrée et donc, diminuant la capacité de l'opérateur d'arrêter le train avant l'impact. À ce moment, l'équation devient :

$$\text{MEDCP} = \text{Potentiel de rupture } (S) \times \text{Potentiel d'atteinte}(A) \\ \times \text{Conséquences et vulnérabilité } (C\&V) \quad [4.9]$$

Dans l'approche du MEDCP, nous proposons de présenter le résultat de la multiplication du *Potentiel d'atteinte (A)* et du *Potentiel de rupture (S)* séparément du terme *Conséquences et vulnérabilité (C&V)*. Étant donné que la possibilité de déraillement du train causé par la présence de pierres sur la voie est indépendante, pour un événement similaire, de sa localisation, la prise en compte de cette conséquence ne devrait pas changer le danger associé à une coupe ou une falaise éloignée. La priorité associée à une certaine paroi devrait donc être liée uniquement au danger, puis, le terme **C&V** devrait être utilisé pour discerner les parois se situant à l'intérieur d'une même catégorie de priorité. L'approche générale du MEDCP est illustrée à la figure 4.27.

Dans le cadre des travaux présentés dans ce rapport, le terme se rapportant aux conséquences et à la vulnérabilité ne sera pas évalué, mais il sera discuté. Effectivement, ce terme doit être mis en forme par les gestionnaires eux-mêmes qui sont les seuls à pouvoir déterminer adéquatement quelles sont les conséquences qui pourraient justifier qu'un secteur soit plus à prioriser qu'un autre. Notre expertise se situe au niveau de l'aléa, i.e. la susceptibilité à la rupture et le potentiel d'atteinte.

Les potentiels d'atteinte et de rupture peuvent être réduits par des travaux d'entretien et de mitigation. Par exemple, l'agrandissement d'une fosse de captage ou la mise en place de barrières pour capter les chutes de pierres sont des interventions qui réduisent le potentiel d'atteinte. Le potentiel de rupture quant à lui peut être réduit par de l'écaillage et la mise en place d'ancrages. Lorsque de telles interventions sont faites sur une paroi, il faut que la valeur du *Danger MEDCP* (D_{MEDCP}) puisse être réduite. Pour ce faire, une distinction est apportée entre le *Danger MEDCP de base* (D_{MEDCP}^b) et le *Danger MEDCP résiduel* (D_{MEDCP}^r). Le premier est le résultat de l'évaluation en ne considérant pas les méthodes de mitigation en place. Le second est le danger qui reste après avoir appliqué des méthodes de mitigation. La formulation du *Danger MEDCP résiduel* intègre le terme *Mitigation (M)* qui représente l'efficacité des protections en place et se présente ainsi :

$$D_{MEDCP}^r = D_{MEDCP}^b \times (1 - M) \quad [4.10]$$

Le *Danger de base* et le *Danger résiduel* s'égalent lorsqu'il n'y a pas de mitigation en place. Le terme *Mitigation (M)* a alors une valeur de 0. Plus les mitigations en place sont efficaces et couvrent l'ensemble de la paroi, plus la valeur de *M* s'approche de 1 et le *Danger MEDCP résiduel (D_{MEDCP}^r)* de zéro.

Sur les parois étudiées dans le projet *ParaChute*, de telles interventions ont été réalisées à bien des endroits et naturellement dans les secteurs actifs. Des résultats illustrant le *Danger MEDCP résiduel (D_{MEDCP}^r)* seront présentés dans ce rapport, mais à titre illustratif seulement. Bien que les moyens de mitigation en place aient été notés, il n'est pas de notre ressort d'évaluer la performance de ces diverses mesures quant à leur capacité à réduire ou à éliminer le danger. Ainsi, nous ferons quelques démonstrations en utilisant des valeurs fixées par rapport à la présence ou non de moyens de mitigation. Aux fins de gestion et selon les circonstances, il serait bénéfique d'évaluer *M* afin que le *Danger MEDCP* représente mieux la réalité.

Le *Danger MEDCP (D_{MEDCP})* est évalué pour les secteurs de parois éloignés et pour les coupes de roc en utilisant des méthodes distinctes (fig. 4.27). Les parois éloignées ne sont pas visitées lors des travaux de terrain et leur évaluation repose essentiellement sur les données acquises par télédétection, incluant des images acquises par drone. L'évaluation du *Potentiel de rupture* des coupes de roc nécessite quant à elle une visite terrain. Les méthodes d'évaluation de ces termes sont détaillées dans les prochaines sections (4.9.3 à 4.9.6). Toutefois, les équations et les plages de valeurs des deux évaluations sont similaires. L'indice *SE* est utilisé pour représenter les secteurs de parois éloignées. L'indice *CR* se rapporte aux évaluations des coupes de roc. Les termes *Potentiel de rupture (S)* et *Potentiel d'atteinte (A)* sont définis ci-dessous.

- 1) **Potentiel de rupture (S)**: Il s'agit de la susceptibilité d'une paroi rocheuse naturelle ou anthropique à générer des chutes de pierres. Cette susceptibilité est évaluée en qualifiant des paramètres tels que la densité de fissuration du massif rocheux, la présence de surplombs, son altération, la présence de blocs détachés et leur volume, la présence d'écoulement d'eau, l'orientation géographique de la paroi rocheuse, la présence de signes indiquant des ruptures passées, etc. En un certain sens, il s'agit d'une indication de l'activité de la paroi en termes de détachement rocheux.

La valeur numérique associée à **S** est le résultat de la sommation d'un nombre *i* de 1 à *n* de paramètres (*P_i*) divisé par la valeur maximale théorique de la somme du numérateur (*P_{i,max}*). Une valeur proche de l'unité signifie que des conditions défavorables pour la stabilité de la paroi sont présentes. Le *Potentiel de rupture (S)* est sans dimension et obtenu d'une équation de la forme suivante :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n P_{i,max}} \times \text{Pondération en fonction de la dimension de la paroi} \quad [4.11]$$

- 2) **Potentiel d'atteinte (A)**: Le *Potentiel d'atteinte* est une indication de la possibilité qu'un bloc qui tombe de la paroi atteigne l'élément à risque, qui dans le cadre du projet *ParaChute*, est la voie ferrée.

Pour les secteurs de parois éloignées, il est évalué par trajectométrie et obtenu de l'équation suivante :

$$A_{SE} = \frac{\text{nombre de trajectoires simulées atteignant la voie ferrée}}{\text{nombre de trajectoires simulées}} \quad [4.12]$$

Pour les coupes de roc, le potentiel d'atteinte est obtenu de l'amalgame de trois paramètres: l'efficacité des fossés, la présence de tremplin et la taille de blocs pouvant se détacher.

$$A_{CR} = \left(1 - \frac{\text{Efficacité du fossé (\%)}}{100}\right) \times 0.9 + \left(\frac{P_{Tremplin} + P_{Taille\&Vol}}{2 \times 81}\right) \times 0.1 \quad [4.13]$$

L'évaluation de **S** et **A** est semi-quantitative, car elle utilise en partie des critères qualitatifs pour associer des pointages aux divers paramètres. Le pointage attribué aux termes doit permettre d'étaler les résultats numériques pour permettre le regroupement des parois en catégorie. Pour ce faire, l'évaluation des paramètres se fait en utilisant un pointage qui évolue exponentiellement. Le RHRS utilise un tel système de pointage, et il a été utilisé dans le MEDCP. Les valeurs de 3, 9, 27 et 81 sont attribuées aux critères d'évaluation des divers paramètres. Les analyses de risques utilisent des systèmes exponentiels pour associer des termes qualitatifs à des valeurs (tableau 4.10). La pondération en fonction de la dimension des parois et le facteur **M** concernant l'efficacité des mesures de mitigation s'inspireront de ces valeurs. Par exemple, un **M** de 0.01 serait associé à des méthodes de mitigation inadéquates et ne couvrant pas l'ensemble des secteurs potentiellement instables d'une paroi. Un **M** de 0.5 pourrait être associé aux parois dont l'efficacité de la mitigation est incertaine, alors qu'une valeur de 0.99 serait réservée aux stabilisations très efficaces s'appliquant à l'entièreté d'une coupe de roc.

L'évaluation du *Potentiel de rupture* (**S_{CR}**), tel qu'effectué ici, vise à la caractérisation des parois et non pas à leur inspection. En d'autres termes, son but n'est pas de différencier des coupes de roc par rapport à l'imminence d'une rupture d'un bloc particulier. L'objectifs est de regrouper et de reconnaître les parois les plus susceptibles de générer des chutes de pierres pouvant atteindre la voie ferrée en évaluant des caractéristiques à la fois de la masse rocheuse et de la géométrie de la paroi. La présence de blocs précaires était observée et notée et aura probablement une influence sur les pointages attribués aux divers paramètres. Toutefois, le but de la caractérisation n'est pas directement de les cerner, contrairement à une inspection qui aura comme objectif de cerner des blocs précaires. Ainsi, les résultats du MEDCP seront utiles pour aider les inspecteurs à cibler leurs travaux. Pour se préparer et réaliser les diverses inspection, la personne en charge disposera d'un arsenal important d'informations (e.g. photographies, modèle numérique de terrain précis, données structurales, observations MEDCP, etc...), ce qui lui permettra d'optimiser ses travaux de terrain et ses analyse subséquentes. L'efficacité du travail s'en trouvera grandement augmentée.

Le **D_{MEDCP}** qui est une valeur numérique, peut ensuite être associé à une priorité d'intervention décrite qualitativement. Les valeurs les plus élevées sont associées aux catégories de priorité élevée. Cette cotation permet de comparer relativement entre elles des coupes de roc ou des parois éloignées situées le long d'une infrastructure linéaire en termes du danger qu'elles représentent pour cette dernière. Dans ce cas, les autres mouvements gravitaires, tels que les chutes de glace, les coulées de débris et les glissements de terrain ne sont pas considérés.

Les catégories de priorité sont déterminées de la manière suivante :

Priorité élevée: 0.1 à 1 (catégorie 1)

Priorité modérée : 0.01 à 0.1 (catégorie 2)

Priorité faible: 0.01 à 0.001 (catégorie 3)

Priorité très faible (faible) : 0.001 à 0.0001 (catégorie 4)

Priorité nulle (très faible à nulle) : < 0.0001 (catégorie 5)

La classe de priorité 5 regroupe les coupes et les parois de faible superficie avec de très faibles **S** et **A**. Ces coupes et ces parois présentent très peu, voir aucun danger pour la voie ferrée et ses utilisateurs. Il pourrait être envisagé de les retirer de la liste des parois à inspecter et même de l'inventaire des coupes de roc. La classe de priorité 4 regroupe des coupes et des parois avec de très faibles valeurs de **S** et **A** et il est peu probable qu'une rupture survenant sur l'une de ces parois atteigne la voie ferrée. Il n'est pas nécessaire de les inspecter de manière routinière, mais il n'est pas conseillé de les enlever de l'inventaire.

Les parois des classes de priorité 2 et 3 peuvent avoir des **A** et **S** de valeur modérée ou alors, l'un des deux est élevé alors que l'autre est faible. En général, ces parois présentent des caractéristiques les prédisposant aux chutes de pierres et donc, l'inspection est nécessaire pour suivre leur évolution. Il est possible que des chutes de pierres surviennent sur ces parois.

La classe de priorité 1 regroupe les coupes et les parois avec le plus de facteurs les prédisposant à la rupture et dont il est probable que les chutes de pierres qui s'en détachent atteignent la voie ferrée. Pour être dans cette catégorie, les deux termes, **S** et **A**, doivent avoir des valeurs relativement élevées afin que le D_{MEDCP} soit supérieur à 0.1. Ces parois devraient être inspectées en priorité lors des inspections quinquennales et il est probable que des méthodes de mitigation soient à envisager.

La comparaison entre les D_{MEDCP} des parois éloignées et des coupes de roc doit se faire avec précaution, parce que leur évaluation ne repose pas sur les mêmes paramètres, ni les mêmes données. Toutefois, puisque les équations et les valeurs des paramètres sont similaires et varient sur les mêmes plages, la comparaison est possible. Dans ce rapport, les résultats seront d'abord présentés séparément, puis ils seront mis en relation.

Au final, l'information est façonnée pour être consultée dans un système d'informations géographiques, tels que QGIS ou ArcGIS. Les résultats sont présentés sous formes tabulaire, graphique et cartographique. Les figures 4.28 et 4.29 illustre les diverses étapes et données utilisées dans l'évaluation des D_{MEDCP} des parois éloignées et des coupes de roc.

Tableau 4-10. Un exemple de pointages (Lacasse 2008) associés à des mots permettant de qualifier la probabilité d'occurrence d'un certain scénario, par exemple, l'occurrence d'une chute de pierres de 5 m³ sur une certaine coupe de roc sur une période de 50 ans.

Description de l'incertitude	Probabilité d'occurrence
Presque impossible	0.001
Très improbable	0.01
Improbable	0.10
Incertain	0.50
Probable	0.90
Très probable	0.99
Presque certain	0.999

4.9.3. Évaluation du potentiel d'atteinte attribué aux secteurs de parois éloignées (A_{SE})

À la section 4.4 du présent rapport, nous avons présenté la méthodologie utilisée pour repérer, en utilisant des paramètres conservateurs, les parois éloignées dont des blocs qui s'en détacheraient, pourraient se rendre jusqu'à l'infrastructure. Tel qu'il sera présenté dans la section 6.2, ces parois éloignées ont été regroupées en 74 secteurs bordant la voie ferrée.

Cette identification préliminaire des secteurs potentiellement problématiques ne nous renseigne pas sur la probabilité d'atteinte, mais uniquement s'il y a possibilité d'atteinte. Afin de déterminer une probabilité d'atteinte, un raffinement de la méthode présentée à la section 4.4 a dû être effectué. Ce raffinement a touché tant au MNT utilisé, qu'à la définition des sources, qu'au traitement des résultats. Encore une fois, il est bon de mentionner ici que l'objectif de ces simulations est de déterminer une probabilité d'atteinte, advenant qu'un bloc se détache. Ces simulations ne tiennent pas compte si des blocs peuvent réellement se détacher de la paroi. De plus, une quantité énorme de chutes de pierres est simulée dans chaque simulation. Cela ne représente pas la réalité, mais bien une manière statistiquement valable d'évaluer le potentiel d'atteinte. Dans une analyse du risque, ce potentiel d'atteinte pourrait aussi correspondre à une probabilité spatiale d'atteinte de l'infrastructure.

Les simulations préliminaires ont été effectuées sur un MNT avec des pixels de 1 m², pour avoir un bon réalisme des trajectoires simulées, mais en s'assurant d'avoir un temps de calcul raisonnable pour la grandeur du territoire à couvrir. Pour l'évaluation du potentiel d'atteinte, étant donné le territoire plus restreint à couvrir, l'analyse a pu être faite avec des pixels de 0.5 m de côté, soit des pixels de 0.25 m². Cette nouvelle définition amène, en particulier, une meilleure représentation des pentes. La pente calculée pour un pixel sur terrain abrupt, par exemple à 80°, pouvait auparavant nécessiter près de 100 m² de terrain, ce qui engendrait un lissage important des pentes calculées. Pour de tels terrains, la surface nécessaire pour l'estimation de la pente avec la nouvelle résolution des MNT est réduite à près de 5 m². Ainsi, les pentes calculées à partir du MNT, nécessaires aux simulations, devraient mieux représenter les terrains lorsqu'il y a des changements locaux d'élévation, par exemple pour les fossés ou les terrains abrupts (fig. 4.30). Un comparatif entre les deux résolutions est montré à la figure 4.31.

La géométrie des sources est la même qu'à la première étape, soit des cubes de 0.3 m de côté. De plus, étant donné que l'utilisation du seuil à 60° a donné les meilleurs résultats lors de l'analyse préliminaire, ce

seuil a été celui conservé pour cette étape. Pour limiter l'étendue de l'analyse qu'aux parois d'intérêts, des polygones ont été générés dans ArcMap à partir des polygones des parois potentiellement problématiques en appliquant automatiquement une bande (*buffer*) de 5 m autour de ces dernières. Ces polygones ont ensuite été modifiés manuellement afin de ne couvrir que les sommets d'escarpements naturels (par exemple ceux illustrés en rouge [type d] sur la figure 4.32). Les polygones correspondant ou empiétant sur les sommets de coupes et de paliers ont systématiquement été retirés ou tronqués (par exemple ceux illustrés en jaune et en vert [type a et b] sur la figure 4.32). Lorsqu'il est difficile d'évaluer à partir du relief ombragé si le prolongement d'une coupe est naturel ou artificiel (par exemple les sommets illustrés en bleu [type c] sur la figure 4.32, les photographies obliques prises par hélicoptère en 2014 et 2015 ont été examinées. Dans le cas de l'exemple de la figure 4.32, seul le sommet ambigu (en bleu, type c) le plus élevé des quatre a été conservé (avec ceux en rouge, type d), car ils semblent correspondre à une structure naturelle.

Cette analyse a été répétée de manière à couvrir toutes les parois éloignées des 74 secteurs. L'un des secteurs a d'ailleurs été éliminé à cette étape, car il ne comportait finalement pas d'escarpement naturel visible. Les polygones ont ensuite été scindés par secteur et exportés avec la même dénomination que celles des tuiles respectives du MNT. Après conversion en raster, les valeurs des pixels ont été reclassées de manière à ce que celles correspondant aux polygones prennent comme valeur 1 et les autres 0. Cette binarisation permet, avec les outils automatisés, de ne sélectionner que les sources détectées dont la valeur du nouveau raster est de 1. De plus, tout comme pour l'analyse préliminaire, 10 simulations par sources ont été lancées, sauf pour trois secteurs où le nombre de trajectoires par source a dû être réduit pour respecter les limites du logiciel, soit aux PM 52 ouest, 89.5 ouest et 152 ouest, où la densité a été réduite à 5, 5 et 8 trajectoires par source respectivement.

Les paramètres de terrain utilisés sont les mêmes que ceux utilisés dans l'analyse préliminaire. La seule différence est qu'il y a une meilleure différenciation spatiale des pentes étant donné que la résolution du MNT est plus élevée

Comme il n'est pas possible, avec le logiciel Rockyfor3D, d'analyser les trajectoires ponctuellement, l'évaluation précise de l'atteinte est déterminée indirectement. Deux approches, appelées ci-après « méthode par pixel » et « méthode par trajectoire », sont utilisées. La méthode par trajectoire, utilisée sur seulement cinq secteurs, est moins précise, mais est nécessaire lorsque les sources sont situées de part et d'autre de la voie ferrée, par exemple aux entrées et sorties des tunnels.

Méthode par pixel

Pour appliquer la méthode par pixel, il faut isoler les trajectoires qui ont atteint ou dépassé la voie ferrée. Pour ce faire, 73 polygones englobant les MNT de chaque secteur ont été tracés. Ils ont ensuite été manuellement segmentés au niveau de l'épaulement du chemin de fer se trouvant du côté des parois. Ainsi, un segment du polygone se trouve du côté des trajectoires qui se terminent dans le fossé ou entre celui-ci et les parois. L'autre segment du polygone englobe les trajectoires qui se sont terminées sur la voie ferrée ou au-delà de celle-ci, donc celles qui atteignent l'infrastructure. Les polygones de chaque secteur ont ensuite été exportés, puis rastérisés en lot. Les pixels correspondant aux segments de polygone du côté des parois et de l'autre côté ont respectivement été reclassés pour avoir des valeurs de 0 ou 1. En multipliant en lot ces couches par celles des positions terminales des trajectoires, seules celles ayant atteint ou dépassé la voie ferrée sont conservées.

Un script d'automatisation a été développé pour traiter en lot l'ensemble des couches ne contenant que les positions d'arrêt des trajectoires atteignant la voie ferrée. Celui-ci détecte l'ensemble des couches à traiter contenues dans un dossier. Il les importe et retire les valeurs correspondant aux pixels vides. Il fait ensuite la somme des pixels pour déterminer le nombre de blocs problématiques qu'il enregistre avec le nom du secteur correspondant dans un fichier Excel. En ayant le nombre de trajectoires simulées par sources et le nombre ayant atteint l'infrastructure, il est alors possible de calculer une probabilité d'atteinte pour un secteur en utilisant l'équation 4.14. Il est à noter qu'afin d'obtenir des simulations statistiquement valables, le nombre de trajectoires simulées est très élevé.

$$A_{SE} = \frac{\text{nombre de trajectoires simulées atteignant la voie ferrée}}{\text{nombre de trajectoires simulées}} \quad [4.14]$$

Méthode par trajectoires

Comme la méthode par pixel ne peut pas être utilisée lorsque les sources sont situées de part et d'autre de la voie ferrée, une méthode alternative, dite par trajectoire, a été utilisée pour évaluer l'atteinte des quelques secteurs où la première méthode n'a pu être utilisée. Celle-ci consiste à évaluer le nombre de trajectoires qui croisent la voie ferrée. Pour ce faire, le centre de la voie ferrée a été découpé pour chaque secteur à partir du tracé géoréférencé fourni par ArcelorMittal. Les différents segments de voie ferrée ont ensuite été exportés par secteur puis convertis au format matriciel avec des pixels de 0.25 m² (50 cm de côté). Les pixels correspondant à la voie ferrée ont été reclassés pour avoir une valeur de 1 et les autres une valeur nulle.

En multipliant les couches matricielles reclassées de la voie ferrée par celles du nombre de trajectoires, seules celles croisant la voie ferrée sont conservées. Le script d'automatisation développé pour faire la somme des pixels restants a été utilisée sur les couches après la multiplication. Les valeurs obtenues ont ensuite été corrigées en fonction de l'orientation du chemin de fer par rapport à l'orientation de la grille des données matricielles, puis pondérées pour correspondre aux valeurs d'atteintes obtenues avec la méthode par pixel. L'approche est expliquée ci-après.

L'orientation de la grille par rapport à celle du chemin de fer a un effet sur le nombre de pixels générés (fig. 4.33). En général, si la voie ferrée est en diagonale par rapport à l'orientation de la grille, le nombre de pixel sera maximal. Le nombre de pixels de voie ferrée pour chaque secteur a été corrigé de manière à avoir la même valeur de deux pixels par mètre de voie ferrée pour l'ensemble des secteurs. D'abord, la longueur de voie ferrée et le nombre de pixel correspondants ont été notés pour chaque secteur. Puis, la pondération propre à chaque secteur pour corriger l'effet de l'orientation de la grille a ensuite été appliquée au nombre de trajectoires notées.

Une correction similaire aurait dû être appliquée en fonction de l'orientation des trajectoires lorsqu'elles croisent la voie ferrée, mais elle aurait été trop difficile à évaluer et à appliquer à cause des orientations variables des trajectoires: chacune des trajectoires auraient dû être analysés de manière individuelle. À la place, les trajectoires corrigées pour l'ensemble des secteurs ont été également pondérées en les multipliant par 0.88 de manière à ce que la moyenne des rapports entre les atteintes évaluées avec la méthode par trajectoire et celles de la méthode par pixel soit égale à 1, et donc que l'écart entre les deux méthodes soit faible (fig. 4.34).

Sur la figure 4.34, l'atteinte extraite avec la méthode par trajectoire non pondérée (en rouge) est en général surestimée par rapport aux valeurs obtenues avec la méthode par pixel. En effet, les rapports entre les 138 valeurs comparables de la méthode par trajectoire et celles de la méthode par pixel sont en moyenne de 1.40. Les valeurs de la méthode par trajectoire corrigée pour l'orientation de la grille (en bleu) s'approchent de celles de la méthode par pixel, avec une moyenne des rapports de 1.15 au lieu du précédent 1.40. Finalement, les valeurs corrigées et pondérées de 0.88 (en vert) se superposent aux valeurs de la méthode par pixel et ont une moyenne des rapports de 1, indiquant que les valeurs des deux méthodes sont en moyenne équivalentes.

Avec les corrections pour l'orientation de la voie par rapport à la grille et la pondération, les atteintes obtenues avec la méthode par trajectoire pour les deux séries de 69 secteurs comparables approchent celles obtenues avec la méthode par pixel, avec un écart type correspondant à 3 % de probabilité d'atteinte autour des valeurs de la méthode par pixel. Les valeurs ainsi obtenues avec la méthode par trajectoire, corrigées et pondérées, peuvent être utilisées pour les cinq secteurs où la méthode par pixel ne permet pas d'obtenir des valeurs d'atteinte précises.

Au final, les informations concernant les résultats des simulations de chutes de pierres sont intégrées dans le fichier *shapefile* comportant les informations sur les parois éloignées. Celles-ci sont constituées du nombre de points de départ situés aux sommets des parois, du nombre de trajectoires simulées par point de départ et du pourcentage qui atteignent ou dépassent la voie ferrée.

4.9.4. Évaluation du potentiel de rupture attribué aux secteurs de parois éloignées (S_{SE})

Tout comme pour l'évaluation du potentiel d'atteinte (A_{SE}) des secteurs de parois éloignées, l'évaluation de leur potentiel de rupture (S_{SE}) est effectuée au bureau et repose entièrement sur les données de télédétection. Les photographies aériennes et celles acquises par hélicoptère, drone ou des travaux de terrain sont utilisées pour évaluer les critères menant à la détermination du potentiel de rupture. À l'inverse du potentiel d'atteinte qui est obtenu d'un calcul et qui dépend peu de l'évaluateur, le potentiel de rupture est évalué visuellement et repose donc en grande partie sur le jugement de l'évaluateur. Ainsi, cet évaluateur doit être formé et qualifié. Étant donné que l'objectif est de comparer les secteurs de parois éloignées entre eux, il est primordial que l'évaluation du potentiel de rupture soit faite de la même manière et en utilisant un barème constant. Il est donc préférable que l'évaluation soit entièrement effectuée par un évaluateur ou deux évaluateurs conjointement. Si l'évaluation est faite que par un utilisateur, il est recommandé qu'elle soit vérifiée par un autre opérateur.

L'évaluation se fait au bureau à l'ordinateur, en utilisant un logiciel SIG (e.g. ArcGIS, QGIS), un logiciel permettant de visualiser les MNT en trois dimensions (e.g. ArcScene, CloudCompare) et un logiciel permettant de visualiser des photographies numériques.

Les données disponibles pour l'évaluation du potentiel de rupture des secteurs de parois éloignées dans le cadre du projet *ParaChute* sont :

- le relief ombragé du MNT visualisé en 3D, avec la localisation des sources de trajectoires et les trajectoires (fig. 4.12);
- le MNT visualisé en 2D avec les informations dérivées suivantes :
 - o inclinaison;

- orientation des pentes;
- relief ombragé;
- les orthophotographies aériennes de 2005 et 2014;
- les photographies en hélicoptère 2014 (disponibles pour 56 des 73 secteurs), 2015 (disponibles pour 35 des 73 secteurs) et par drone (disponibles pour 17 des 73 secteurs)(pour certains secteurs aucune photo n'est disponible);
- les archives d'éboulements rocheux;
- les commentaires sur les signes d'instabilités ou leur absence faits lors de l'observation des données brutes du LiDAR aéroporté en 3D (les LAS) des secteurs éloignés (disponibles pour 70 des 73 secteurs);
- les informations disponibles dans le fichier créé lors de la reconnaissance des secteurs de parois éloignées :
 - dénivelé maximum entre un sommet et la voie ferrée;
 - distances minimale et maximale entre les escarpements et la voie ferrée;
 - l'inclinaison générale du secteur, obtenue de l'équation suivante :

$$\text{inclinaison } (^{\circ}) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{dénivelé } (m)}{\text{distance horizontale de la paroi } (m)} \right];$$
 - orientation géographique des parois;
 - densité de sources par mètre de voie ferrée

$$\text{densité des sources} = \frac{\text{nombre de pixels identifiés comme des sources}}{\text{longueur de voie ferrée dans le secteur (PMnord-PMsud)};'$$
 - hauteurs minimale et maximale des parois d'où sont générées les trajectoires.

Une série de huit paramètres doit être évaluée par l'opérateur. Pour ce faire, il faut sélectionner parmi quatre critères auxquels sont associés un pointage de 3, 9, 27 ou 81. Un pointage faible est attribué aux critères les moins susceptibles de mener à la rupture. Suite à l'évaluation des paramètres et à l'observation des diverses sources d'informations, l'utilisateur rédige une courte description du secteur et des incertitudes liées à son évaluation. Seulement cinq des huit paramètres ont été retenus pour l'évaluation du potentiel de rupture (S_{SE}) qui sera présentée après la description des paramètres et de leurs critères d'évaluation.

P_A. La présence de débris de chutes de pierres ou d'un talus d'éboulis

Ce paramètre évalue l'historique des chutes de pierres. L'opérateur cherche des blocs tombés, des débris de chutes de pierres ou d'éboulis rocheux.

3: Il n'y a pas de blocs en pied de pente ou de talus d'éboulis;

9: Il y a quelques blocs, amas de blocs ou talus d'éboulis qui n'atteignent pas la voie ferrée;

27: Un talus d'éboulis est présent et atteint la voie ferrée ou un ou des événements de rupture sont connus;

81: La voie ferrée traverse le talus d'éboulis ou des événements de chutes de pierres qui ont atteint la voie ferrée sont connus.

P_B. État de la végétation pouvant indiquer des événements de chutes de pierres

Ce paramètre évalue l'historique des chutes de pierres. L'opérateur cherche des signes dans la végétation qui pourraient indiquer d'anciennes ruptures. La classification se base sur l'hypothèse que les feuillus repeupleront une pente plus rapidement que les conifères après qu'une chute de pierres ait abîmé les arbres. Il faut toutefois se méfier, car les feuillus peuvent aussi former des couloirs lorsqu'ils poussent en

bordure d'un ruisseau. Il faut aussi considérer la possibilité que les couloirs observés puissent être formés par des avalanches de neige. Ces classes sont valides uniquement pour un territoire majoritairement constitué de conifères, comme c'est le cas pour le territoire du projet *ParaChute*.

3: Aucun ou peu d'arbres cassés ou morts sont observés, et, s'il y en a, ils sont dispersés et ne forment pas de couloir;

9: Présence d'arbres cassés ou morts concentrés aux pieds des parois;

27: Présence d'un ou de plusieurs couloirs de feuillus, d'amas d'arbres morts concentrés en bas des parois et la forêt clairsemée est au pied des parois;

81: Présence d'un ou de couloirs d'arbres cassés frais (en général, il faut une photo oblique pour l'observer), la forêt est clairsemée et ce sont des feuillus en pied de talus plutôt que des conifères.

Pc. Fissuration du massif rocheux / Disponibilité des volumes à la rupture

Ce paramètre évalue la disponibilité de blocs rocheux potentiellement susceptibles à la rupture en observant la fissuration du massif rocheux, la présence de fractures ouvertes et de blocs libres.

3: Paroi d'apparence peu ou pas fissurée, sans surplomb et aucun bloc libre n'est discernable;

9: Des familles de discontinuités sont discernables dans les escarpements. Il peut y avoir des fractures ouvertes, mais aucun volume complètement découpé par des fractures ne doit être discernable. La fracturation peut être plus intense par endroit, mais sur moins de 10% de la surface visible des escarpements;

27 : Des familles de discontinuités sont discernables et des fractures ouvertes et des surplombs ont été observés. Un bloc ou quelques blocs sont délimités par des fractures ouvertures et peuvent être discernés;

81 : La paroi rocheuse est découpée par des familles de discontinuités et plusieurs fractures ouvertes sont présentes. Des blocs délimités par des fractures sont reconnus et leur stabilité pourrait être précaire. Des cicatrices de ruptures contrôlées par les familles de discontinuités pourraient être visibles. Des volumes potentiellement instables sont discernés à plusieurs endroits sur les parois. La différence entre la cote de 27 et de 81 repose surtout sur l'évaluation qu'on fera de l'intensité de la fracturation, de la précarité des masses et de leur densité sur la paroi rocheuse.

Pd. Potentiel de gros volumes

Ce paramètre vise à évaluer s'il existe une probabilité qu'une rupture impliquant un volume de plus de 20 m³ soit générée. Une telle rupture est considérée lorsque l'observateur voit des éléments favorables à des ruptures telles que des ruptures planaire, de dièdre ou de basculement. Dans ce cas la rupture n'est pas une chute de pierres comme tel, la distance séparant le lieu du glissement de l'infrastructure est considérée suffisante pour que la masse se fragmente et qu'il y ait des interactions entre les fragments. Il est tout de même très pertinent de noter leur présence, car de tels volumes, s'ils atteignent l'infrastructure, causeront vraisemblablement des dommages. Les plus petits volumes ne vont pas nécessairement briser l'infrastructure et se propagent en général moins loin. Ainsi, une rupture de plus grand volume a plus de potentiel d'atteindre l'infrastructure qu'une de moindre volume et, si elle le fait, les dommages seront probablement plus importants si le volume est plus gros. L'évaluation du volume est très approximative, car il n'est pas possible de mesurer adéquatement des dimensions sur les photographies utilisées sauf lorsque des arbres peuvent aider à approximer l'échelle.

- 3: Aucun potentiel de blocs ayant un volume de 20 m³ et plus n'a été observé;
- 9: Quelques signes indiquent la possibilité d'une rupture impliquant un volume de plus de 20 m³, mais cela est incertain et aucun signe précurseur d'une telle rupture n'est observé. Ces signes pourraient être un déchaussement du pied du volume de plus de 20 m³, une fissuration plus intense qu'ailleurs sur la paroi, des signes d'une rupture récente de volume moindre au pourtour du bloc, etc;
- 27: Un potentiel de rupture dépassant le 20 m³ est reconnu, soit parce que les blocs peuvent être identifiés, car ils sont délimités par des fractures ou parce qu'une rupture passée de plus de 20 m³ y a été répertoriée ou identifiée;
- 81: Des volumes de plus de 20 m³ sont reconnaissables et des signes précurseurs (fractures ouvertes, blocs se détachant à la base, écoulement d'eau à la base, évidences de ruptures passées de même amplitude) sont observés.

Pe. Présence de végétation dans les fractures et son rôle comme facteur prédisposant à la rupture

Ce paramètre évalue l'impact que pourrait avoir la présence de racines dans les fractures d'une paroi rocheuse. Les racines peuvent contribuer à l'élargissement des fractures et à leur remplissage avec du matériel de plus faible résistance au frottement.

- 3 : Aucune végétation sur la paroi ou dans des fractures;
- 9 : Peu de végétation sur la paroi ou petits arbustes uniquement dans peu de fractures ou aucun visuel sur la paroi;
- 27 : Présence de végétation mature sur la paroi, au-dessus de surplombs ou derrière le sommet d'escarpements fracturés;
- 81 : Présence d'arbres dans les fractures ouvertes délimitant des masses qui semblent précaires.

Pf. Influence de la végétation sur la propagation des blocs

Ce paramètre n'influence pas le potentiel de rupture, mais il est tout de même évalué pour forcer l'opérateur à observer la végétation au pied du talus. Aussi, ce critère pourrait être utilisé pour pondérer le potentiel d'atteinte des chutes de pierres. Actuellement, les simulations effectuées dans le cadre du projet *ParaChute* ne tiennent pas compte de la présence de la végétation sur la propagation des pierres.

- 3 : Forêt dense, arbres matures qui contribueront à freiner les chutes de pierres;
- 9 : Forêt dense, arbres matures qui contribueront légèrement à freiner les chutes de pierres;
- 27 : Forêt clairsemé ou de petits arbres qui contribueront peu à freiner les chutes de pierres;
- 81 : Aucune forêt, ou arbres très clairsemés qui n'influenceront pas la propagation des chutes de pierres.

Pg. Degré d'incertitude

Après avoir caractérisé la paroi et rédigé la description de celle-ci, l'opérateur attribue un pointage à l'incertitude liée à l'évaluation des paramètres. La classe dépendra de la qualité et de la quantité d'informations disponibles et du visuel des parois. Dans certains cas, la paroi est masquée par la végétation ce qui rend l'observation de sa fracturation difficile, voire impossible. Dans ce cas, l'incertitude serait élevée.

Toutefois, si pour la même paroi cachée par la végétation, de nombreux autres critères indiquent que la paroi produit de nombreuses chutes de pierres, même une amélioration de l'information ne changerait pas les classes, dans ce cas, l'incertitude sera qualifiée de modérée ou de faible.

- 3: très faible;
- 9: faible;
- 27: modérée;
- 81: élevée.

$F_{DENSITÉ}$. Densité des parois

Ce paramètre qualifie la densité des escarpements rocheux à l'intérieur d'un secteur de parois éloignées. Il est évalué en observant les sources identifiées avec le seuil à 60° pour les simulations de chutes de pierres (fig. 4.35).

- 3 : escarpement non-continu et il n'y a pas deux paliers;
- 9 : escarpement non-continu et présence de quelques parois étagées;
- 27 : escarpement continu avec quelques parois étagées ou non continu avec plusieurs niveaux de parois étagées;
- 81 : escarpement continu et plusieurs niveaux de parois étagées.

L'équation qui permet de déterminer la valeur du potentiel de rupture (S_{SE}) est présentée ci-dessous :

$$S_{SE} = Y_{SE} \times F_{DENSITÉ} \tag{4.15}$$

$$Y_{SE} = \left[\frac{(P_A + P_B + P_D) \times 0.2 + P_C \times 0.4}{81} \right] \tag{4.16}$$

La pondération est attribuée en fonction de la densité des sources de trajectoires dans le secteur éloigné ($F_{DENSITÉ}$), selon les pointages suivants :

Tableau 4-11. Relation entre le pointage de la densité des sources et le coefficient de pondération utilisé.

Pointage de la densité des sources ($F_{DENSITÉ}$)	Pondération
3	0.01
9	0.1
27	0.5
81	1

Les quatre paramètres P_A , P_B , P_C et P_D n'ont pas tous la même pondération dans l'équation. Effectivement, il a été jugé que le critère P_C (Fissuration du massif rocheux et disponibilité des volumes à la rupture) était

celui qui représentait le mieux le potentiel de rupture futur d'une paroi éloignée, son poids dans l'équation a donc été augmenté.

Une fois le potentiel de rupture (S_{SE}) obtenu, il est multiplié par le potentiel d'atteinte (A_{SE}) pour obtenir le Danger MEDCP des parois éloignées ($D_{MEDCP, SE}$). Cette valeur permet de classer les parois en catégories décrivant le danger potentiel qu'elles représentent.

Au cours du développement du MEDCP, différentes équations permettant d'obtenir le potentiel de rupture ont été testées. Celle retenue favorise l'étalement des résultats numériques et permet de faire ressortir les parois jugées les plus susceptibles aux chutes de pierres. La pondération pour la densité permet entre autre d'éviter que des secteurs avec uniquement un ou deux petits escarpements de hauteur de moins de 10 m se retrouvent dans une catégorie de priorités 1 ou 2, ce qui ne serait pas représentatif du secteur.

4.9.5. Évaluation du potentiel d'atteinte attribué aux coupes de roc (A_{CR})

L'évaluation du potentiel d'atteinte combine des paramètres évalués sur le terrain avec l'estimation de l'efficacité des fossés à partir de dimensions mesurées de données de télédétection. Les visites terrain permettent d'estimer un pointage pour la présence de trempins ainsi que de la taille et du volume de pierres disponibles. Ces deux paramètres sont évalués avec la fiche de terrain MTQ, détaillée à la section 4.8.2.

Évaluer l'efficacité d'un fossé est une tâche complexe, car elle dépend de plusieurs paramètres en lien avec la paroi (hauteur, inclinaison et irrégularité de son profil), avec les pierres (volume et forme), avec la localisation de la zone de départ des chutes de pierres, avec la géométrie du fossé (profondeur, largeur, inclinaison et matériel du fossé) et avec la présence de végétation. L'approche proposée pour le MEDCP évalue l'efficacité des fossés différemment selon que les coupes soient : 1) de moins de 6 m de haut, 2) de 6 à 26 m de haut, ou 3) de plus de 26 m de haut. La limite à 26 m est fixée par le fait qu'elle correspond à la limite supérieure de l'abaque de Pierson et al. (2001). Les portails de tunnel sont des parois rocheuses situées au-travers de la voie ferrée, il n'y a donc aucun fossé. Ils constituent un cas spécial et seront traités plus loin dans cette section.

La méthodologie proposée est suffisamment simple pour être appliquée à de grands territoires, tout en considérant plusieurs paramètres dans l'évaluation de manière à être représentatif et comparer les parois entre-elles. L'efficacité des fossés aura une grande importance dans la valeur $D_{MEDCP, CR}$ d'une coupe de roc, puisque le potentiel d'atteinte (A_{CR}) vient multiplier le potentiel de rupture (S_{CR}). Ceci reflète le fait que si la pierre n'atteint pas la voie ferrée, par exemple, parce que le fossé est suffisamment large et profond pour capter la très grande majorité des blocs, le danger en sera d'autant plus faible et les conséquences pour la voie ferrée seront mineures ou nulles.

Coupes de moins de 6 m de hauteur

Pour la première catégorie de coupes de roc, soit celles de moins de 6 m de haut, l'efficacité du fossé est fixée à 99.9%. Les blocs se détachant des coupes de roc de moins de 6 m ont peu d'énergie potentielle, et donc, gagneront peu d'énergie cinétique au cours de leur chute. Leurs rebonds seront de faible hauteur. Aussi, puisque les blocs arriveront avec peu d'énergie cinétique, il est peu probable que les blocs causent une déformation de la fondation de la voie ferrée ou des rails. Les coupes de moins de 6 m de hauteur forment près de 22.5% de celles répertoriées dans la base de données du projet.

Coupe de 6 à 26 m de hauteur (abaques de Pierson)

Pour la seconde catégorie de hauteurs, soit celles entre 6 et 26 m de haut (68.5% des coupes), les abaques de Pierson et al. (2001) sont utilisés. Ces abaques ont été créés à partir des résultats de tests, grandeur nature de chutes de pierres. Effectivement, elles ont été calibrées par des tests réalisés en lançant des pierres de volumes connus du haut de coupes de roc de diverses inclinaisons et hauteurs et cela pour trois géométries de fosses de captage. Les géométries des coupes de roc et des fosses de captage testés sont indiquées à la figure 4.36. Les abaques permettent d'estimer l'efficacité des fossés pour des blocs de volumes similaires à ceux testés par Pierson et al. (2001) (entre 0.3 et 0.9 m de diamètre), pour les géométries de paroi et de fossé décrits. Les abaques sont des graphiques mettant en relation le pourcentage de blocs captés en fonction de la largeur du fossé. Par exemple, l'abaque présenté à la figure 4.37 est valide pour les parois de 24.4 m de haut et de 76° d'inclinaison. Les trois courbes sont associées à une géométrie de fosse de captage, e.g. de 1V:6H.

Lorsque la géométrie de la coupe ou du fossé ne correspond pas directement aux paramètres d'un des abaques, il faut sélectionner l'abaque qui s'en approche le plus. Évidemment, l'exactitude de l'efficacité obtenue sera moindre, mais l'estimation restera tout de même utilisable dans le cadre d'un usage tel que celui fait dans le MEDCP, où les fossés sont comparés de manière relative les uns par rapport aux autres. Certaines règles sont suggérées de façon à rendre le choix de l'abaque systématique et limiter les différences entre les opérateurs. Ces règles sont détaillées plus loin dans cette section.

La plus haute coupe étudiée par Pierson et al (2001) et pour laquelle un abaque est disponible fait 24.4 m de hauteur. Ainsi, pour toutes les coupes de plus de 24.4 m, l'efficacité des fossés serait surévaluée. Cela est vrai, si l'on fait l'hypothèse que pour des coupes de hauteur supérieure à 24.4 m, les blocs se propageront à une plus grande distance que ceux tombant d'une coupe de 24.4 m de haut. Cette hypothèse est très réaliste. Les courbes pour des parois plus hautes devraient se tasser vers la droite sur le graphique (fig. 4.38), telles que celles des abaques de Pierson et al. (2001). Nous avons jugé que l'on pouvait utiliser l'abaque jusqu'à une hauteur de 26 m. Il est bon de rappeler ici que de tels abaques sont souvent utilisés en pratique pour dimensionner des fossés en vue de réduire le potentiel d'atteinte lors de chutes de pierres, ce qui n'a vraisemblablement pas pu être le cas ici pour toutes les coupes de roc.

Coupes de plus de 26 m de hauteur

Neuf pourcent (9%) des coupes présentes dans la base de données du projet *ParaChute* font plus de 26 m de hauteur. La largeur moyenne des fossés de ces coupes est illustrée par un histogramme sur l'abaque de 24.4 m et 76° d'inclinaison (fig. 4.37). La largeur moyenne maximale mesurée est de 9 m. Cette figure indique que l'efficacité des fossés de ces parois devrait être de moins de 75%, si l'on suppose qu'ils ont une géométrie de 1V:6H. Pour évaluer l'efficacité des fossés pour cette troisième catégorie de hauteurs de coupes, une modification des abaques de Pierson et al. (2001) a été élaborée tel qu'indiqué ci-après.

Dans un premier temps, nous avons travaillé à reproduire les abaques de Pierson et al. (2001) par simulation de chutes de pierres, à l'aide du logiciel RockFall (RocScience, 2016). Le but était de générer des abaques pour des parois plus hautes à partir de simulations numériques. Les abaques existants permettraient de calibrer les paramètres du modèle, un peu à la façon des travaux d'Alejano et al. (2007) qui a utilisé cette méthode pour adapter les abaques pour des carrières. Toutefois, les résultats ne se sont pas avérés satisfaisants dans la portion de la courbe la plus représentative des géométries de fossés rencontrées sur le territoire du projet *ParaChute*. Il s'agit de la portion de la courbe la plus abrupte et présentée en grisée à la figure 4.37. C'est pourquoi une autre approche a été adoptée, qui utilise le principe

des lignes d'énergie (e.g. Dorren, 2003). Celle-ci rend les abaques partiellement indépendants de la hauteur des parois, les rendant ainsi utilisables pour toutes sortes de hauteurs.

Les lignes d'énergie relient le haut d'une paroi à la position d'arrêt des pierres s'en étant décrochées. L'angle de la ligne d'énergie, symbolisé ici par θ , est celui entre l'horizontal et la ligne d'énergie. L'étude des lignes d'énergie est une méthode statistique qui est utilisée pour déterminer si un secteur peut être atteint par une éventuelle chute de pierres (Dorren 2003; Jaboyedoff et Labiouse 2011) (fig. 4.39). Les terrains figurant à l'intérieur des cônes sont considérés comme pouvant être atteints par des chutes de pierres (Evans et Hungr, 1993). Lorsqu'un même angle de ligne d'énergie est appliqué sur deux parois de différentes hauteurs mais de même inclinaison, la distance de propagation prédite sera plus grande pour les pierres provenant du sommet de la plus haute des deux parois. Ceci est illustré à la figure 4.40. C'est ce principe qui sera utilisé pour déterminer l'efficacité des fossés de coupes de roc de plus de 26 m de hauteur.

Les lignes d'énergie calculées pour les distances de propagation maximales mesurées par Pierson et al. (2001) et correspondant à 99% de rétention sont indiquées dans le 4.12. Elles sont obtenues à partir de l'équation 4.17, dont les paramètres sont illustrés dans la figure 4.40. Ainsi, h est la hauteur de la paroi, L_1 est la distance horizontale entre le haut et le bas de la paroi tandis que L_2 est la distance de propagation pour une certaine efficacité de fossé.

$$\tan \theta = \frac{h}{L_1 + L_2} \quad [4.17]$$

La valeur minimale est de 22° et celle maximale est de 76° . Cette plage est plus étendue que les valeurs mentionnées dans la littérature, qui se situent entre 27° et 35° (Evans et Hungr, 1993). Ces valeurs sont obtenues de cas dans des milieux alpins avec présence de talus d'éboulis à la base des parois, similaires à celui de la figure 4.39. Puisque le changement de pente en bas d'une coupe de roc est prononcé (par exemple, il passe de 76° à 0°), ceci contribue à diminuer la propagation des blocs et donc à augmenter l'angle de la ligne d'énergie (Wyllie 2014). Aussi, la hauteur des parois étudiées par Pierson et al. (2001) se limitaient à 24.4 m, ce qui est inférieur aux parois des milieux alpins, un autre facteur limitant la distance de propagation et augmentant l'angle θ .

Au tableau 4.12, pour une coupe inclinée à 76° , les angles des lignes d'énergie diminuent au fur et à mesure que la hauteur de la paroi augmente. Cette diminution de l'angle signifie que les pierres se propagent plus loin pour les hautes parois. Le taux de réduction de l'angle de la ligne d'énergie n'est pas constant pour les trois géométries de fossés. La variation de l'angle n'est pas homogène pour les autres inclinaisons de coupes. Par exemple, pour le fossé 1V:6H et une coupe inclinée à 45° , l'angle de la ligne d'énergie demeure constant pour toutes les hauteurs de pente. Ces différences sont causées par le fait que l'inclinaison de la pente influence le mode de propagation des pierres, qui sont principalement de trois types: le roulement, le rebond et la chute libre. L'angle incident de la pierre au moment de son impact dans le fossé aura aussi une influence sur la quantité d'énergie qui y sera absorbée (Wyllie 2014).

Les abaques des parois de 24.4 m de haut ont été transformés en utilisant l'équation 4.17. Pour un même abaque, h est constant et correspond à la hauteur de la coupe, soit 24.4 m. L_2 est la largeur du fossé, *i.e.* la valeur en abscisse de la courbe. Puis, l'axe des abscisses devient la différence entre l'angle de la ligne d'énergie (θ) et l'inclinaison de la coupe de roc (α). L'inclinaison de la coupe de roc (α) est constante pour un même abaque de Pierson et al. (2001). L'angle de la ligne d'énergie doit toujours être inférieur à celui de

l'inclinaison de la paroi. Lorsque cette différence s'agrandit, cela signifie que le fossé s'élargit. Les courbes obtenues, pour les géométries de fossés de 1V:6H sont illustrées à la figure 4.41a et pour les fossés plats à la figure 4.41b.

L'utilisation de la différence entre θ et α s'est avérée nécessaire pour permettre d'utiliser l'abaque de l'inclinaison la plus rapprochés de celle de la coupe de roc. Par exemple, pour une inclinaison (α) de 77° , l'abaque de 76° est utilisé. Si l'abscisse était l'angle de la ligne d'énergie directement, ceci ne serait pas possible. Il faudrait utiliser l'abaque supérieur, qui est certainement moins représentatif dans cet exemple. Plus de détails sur l'application de l'approche aux coupes rocheuses du projet *ParaChute* sont donnés plus loin dans cette section.

Tableau 4-12. Angles des lignes d'énergie calculées à partir des résultats des abaques de Pierson et al. (2001) pour les trois géométries de fossés et les cinq inclinaisons de coupes de roc. La distance de propagation correspondant à une efficacité de 99% a été utilisé. La valeur minimale est de 22° , celle maximale de 76° .

Inclinaison coupe de roc					
Fossé plat	90°	76°	63°	53°	45°
12.2	54	44	31	28	22
15.2	59	38	31	28	24
18.3	64	35	32	29	25
21.3	67	37	34	30	26
24.4	70	39	36	32	27
1V:6H					
12.2	67	57	42	40	29
15.2	70	53	43	38	31
18.3	73	51	44	37	32
21.3	75	50	45	37	32
24.4	76	49	47	36	32
1V:4H					
12.2	68	57	48	41	36
15.2	71	56	48	39	35
18.3	73	55	49	38	34
21.3	75	54	49	39	34
24.4	76	53	50	39	35

Détermination du potentiel d'atteinte

Le potentiel d'atteinte d'une coupe de roc (A_{CR}) est déterminé par l'équation suivante :

$$A_{CR} = \left(1 - \frac{\text{Efficacité du fossé (\%)}}{100}\right) \times 0.9 + \left(\frac{P_{Tremplin} + P_{Taille\&Vol}}{2 \times 81}\right) \times 0.1 \quad [4.18]$$

L'équation illustre le fait que la fosse de captage joue un rôle de première défense contre les chutes de pierres et est le facteur principal déterminant le potentiel d'atteinte (A_{CR}). De plus, il y a une correction qui

est appliquée en fonction de la présence de trempins et du volume des pierres. En effet, s'il y a présence de trempins, la distance de parcours des pierres pourrait être plus grande, donc le potentiel d'atteinte sera lui aussi plus élevé. De plus, un plus gros volume pourrait avoir comme conséquence une augmentation de la distance de parcours, et donc, une augmentation du potentiel d'atteinte. L'effet du volume pourrait être réduit s'il y a fragmentation de la pierre initiale lors d'un impact le long du trajet. Par contre, cet effet n'est pas considéré ici.

Les portails des tunnels représentent un cas particulier, car il n'y a pas de fossé. Une efficacité de fossé fictive de 1% est attribuée aux portails de tunnels de façon à pouvoir leur attribuer un potentiel d'atteinte (A_{CR}) qui sera nécessairement élevé.

Protocole d'évaluation de l'efficacité des fossés pour les coupes de roc de 6 à 26 m de hauteur

Le protocole permettant d'évaluer l'efficacité d'un fossé en utilisant les abaques de Pierson et al. (2001) est décrit ci-dessous :

1. Choisir l'abaque qui correspond à la géométrie de la coupe en utilisant la matrice de décision (fig. 4.42) en se déplaçant vers la droite sur le graphique de l'inclinaison en fonction de la hauteur, mais en restant dans le même rectangle de couleur. Cette matrice utilise les règles suivantes pour le choix de l'abaque:
 - $> 85^\circ$, abaque vertical,
 - $> 66^\circ$ mais $\leq 85^\circ$, abaque de 76° ,
 - $> 60^\circ$ mais $\leq 66^\circ$, abaque de 63° ,
 - $> 50^\circ$ mais $\leq 60^\circ$, abaque de 53° ,
 - $< 50^\circ$, abaque de 45° .

Les coupes de roc des expérimentations de Pierson et al. (2001) ont un profil régulier, car elles ont été prédécoupées. Par contre, les coupes de roc le long du chemin de fer d'ArcelorMittal sont irrégulières ce qui contribue à la projection des pierres. Ainsi, on optera pour interpoler vers l'abaque donnant l'efficacité la moins élevée. À cette fin, l'estimation de l'efficacité du fossé sera faite de manière conservatrice lors du choix de l'abaque, les gammes d'inclinaisons qui renvoient vers les abaques de 76° , 53° et 45° seront choisies parce qu'elles sont plus grandes que celles des inclinaisons de 63° et 90° . Ceci est dû au fait que les abaques de 63° et 90° indiquent que les pierres se propagent moins (fig. 4.38 et tableau 4.12). Choisir la courbe qui représente la géométrie du fossé (plat, 1V:6H ou 1V:4H).

2. Utiliser le ratio Profondeur/Largeur pour déterminer la forme du fossé. Quelques critères sont ajoutés afin de ne pas utiliser la géométrie 4H:1V lorsque la profondeur du fossé est faible, car ceci résulterait en une surestimation de l'efficacité du fossé.
 - Si la profondeur du fossé est égale ou inférieure à 0.75 m, ne pas utiliser le 1V:4H, même si le ratio est inférieur à 4. Les abaques utilisés seront soit celui 1V:6H ou fossé plat.
 - Si la profondeur du fossé est égale ou inférieure de 0.50 m, utiliser la courbe du fossé plat.

Les dimensions de fossés utilisées sont les valeurs moyennes mesurées sur les scans MLS.

3. Atteindre l'abscisse correspondant à la largeur du fossé sur l'abaque.
4. Se déplacer verticalement le long de l'abscisse de la largeur du fossé jusqu'à ce que la courbe correspondant à la géométrie du fossé soit interceptée.
5. L'efficacité du fossé est la valeur de l'axe des ordonnées correspondant, exprimée en pourcentage.

Protocole d'évaluation de l'efficacité des fossés pour les coupes de roc de plus de 26 m de hauteur

1. Déterminer l'inclinaison générale de la coupe de roc (α) et l'angle de ligne d'énergie (θ) à partir de profils extraits du MNT. Pour l'utilisation des abaques, l'angle de la ligne d'énergie est évalué comme l'angle reliant le sommet de la paroi et la fin du fossé près de la voie ferrée. Quelques exemples de profils sont illustrés à la figure 4.43.
2. Soustraire l'inclinaison de la coupe de roc (α) à l'angle de ligne d'énergie (θ).
3. Choisir l'inclinaison de l'abaque qui correspond à la géométrie de la coupe en utilisant la matrice de décision (fig. 4.42).
 - $> 85^\circ$, abaque vertical,
 - $> 66^\circ$ mais $\leq 85^\circ$, abaque de 76° ,
 - $> 60^\circ$ mais $\leq 66^\circ$, abaque de 63° ,
 - $> 50^\circ$ mais $\leq 60^\circ$, abaque de 53° ,
 - $< 50^\circ$, abaque de 45° .
4. Sélectionner la géométrie du fossé entre 1V:6H et fossé plat en utilisant les critères de décisions suivants :
 - si le ratio est de 6 et moins utiliser 1V:6H;
 - si le ratio est supérieur à 6 utiliser fossé plat;
 - si la profondeur du fossé est inférieure à 0.75 m, utiliser fossé plat.

Il a été choisi de ne pas utiliser les fossés de géométrie 1V:4H, car l'énergie des pierres est supérieure à celle des expérimentations de Pierson et al. (2001) à cause de la hauteur des parois.

4.9.6. Évaluation du potentiel de rupture attribué aux coupes de roc (S_{CR})

Le potentiel de rupture des coupes de roc (S_{CR}) est déterminé par l'évaluation sur le terrain d'une série de paramètres. Chacun des paramètres est décrit par quatre critères et celui correspondant le mieux à la situation de la coupe est sélectionné (section 4.8.2). Un pointage d'une valeur de 3, 9, 27, ou 81 est associé à chacun des critères. Le potentiel de rupture est obtenu de la sommation des pointages pondérée par un facteur déterminé en fonction de la dimension de la coupe de roc (F_{SUP}), tel que présenté dans les équations 4.19 et 4.20 ci-dessous :

$$S_{CR} = Y_{CR} \times F_{SUP} \quad [4.19]$$

$$Y_{CR} = \frac{\sum_i^n P_i}{n \times 81} \quad [4.20]$$

La forme que prend l'équation permet d'ajouter ou d'enlever des paramètres et de les modifier pour les adapter au territoire étudié. La plage de valeurs que peut prendre le terme (Y_{CR}) varie entre 0.0371 et 1, et ce, peu importe le nombre de paramètres considérés. Cette adaptabilité est particulièrement utile dans le cadre d'applications comme celle visée par le MTMDET qui couvre des territoires aux lithologies et morphologies diverses. Elle permet aussi de modifier les critères, lors d'une mise à jour du système, sans avoir à changer les catégories ou rendre caduques les évaluations effectuées sur les autres coupes, car la plage de valeurs demeurera la même. Ainsi, une éventuelle mise à jour pourrait être appliquée progressivement.

La pondération en fonction de la dimension permet de considérer la grandeur des coupes. Pour deux coupes situées sur un même territoire et ayant un même Y_{CR} , celle de plus grande superficie a, en théorie, une probabilité supérieure de générer une chute de pierres.

Les données recueillies au cours des travaux de terrain sont nombreuses. Parmi les paramètres de la fiche MTQ (présentée à la section 4.8.2), seuls ceux pertinents à l'évaluation du potentiel de rupture (S_{CR}) sont retenus. Les modes de rupture évalués au bureau (section 4.7) n'entrent pas dans le calcul de la valeur numérique de S_{CR} , mais ils sont utiles lors de l'évaluation terrain afin de guider l'observation et la recherche de volumes potentiellement découpés par des discontinuités. Aussi, l'un des paramètres de la fiche MTQ évalue les modes de rupture et donc la connaissance des discontinuités présentes aide à sélectionner le critère adéquat. Toutes les données recueillies, telles que les photographies systématiques permettent de faire des vérifications et des ajustements de retour au bureau, après les travaux de terrain.

Dix-neuf paramètres sont intégrés à la fiche MTQ (section 4.8.2). De ceux-là, cinq sont en lien avec le potentiel qu'un bloc qui se détache atteigne la voie ferrée et ils sont écartés de l'évaluation du potentiel de rupture. Celui attribuant un pointage à la hauteur de la paroi est aussi écarté, étant donné que la hauteur est déjà considérée dans le potentiel d'atteinte (A_{CR}) et dans la pondération en fonction de la dimension de la coupe (F_{SUP}). Il reste donc treize paramètres en lien avec la susceptibilité à générer des ruptures. La figure 4.44 illustre pour chacun des paramètres la répartition du pointage en indiquant combien de coupes ont un pointage de 3, 9, 27, ou 81. Les treize paramètres sont énumérés ci-dessous et le nom abrégé utilisé dans cette section et dans les figures est inscrit entre parenthèses:

- Orientation de la paroi par rapport au nord (orientation);
- Historique de chutes de pierres ayant atteint la voie ferrée et le fossé (historique de rupture);
- Présence d'eau (présence d'eau);
- % d'abondance d'instabilités (abondance d'instabilités);
- Taille des blocs et volume instable (taille et volume);
- Présence et dimension des surplombs (surplombs);
- Déformation lithologique e.g. massif, rubanée, foliée, ... (déformation);
- Nombre de familles de discontinuités (nombre familles);
- Orientation et persistance des discontinuités causant des ruptures (orientation des familles);
- Espacement entre les fractures (espacement);
- Ouverture des fractures (ouverture);
- Remplissage des fractures (remplissage);
- Friction macro et micro des surfaces de discontinuités sur lesquelles peuvent se produire le glissement (rugosité).

Seulement dix de ces treize paramètres ont été retenus pour l'évaluation du *Potentiel de rupture* (S_{CR}). Toutefois, des tests de catégorisation des coupes de roc ont été effectués en utilisant douze, dix, neuf et huit paramètres. Le format de la base de données permet d'effectuer rapidement un calcul du terme Y_{CR} en incorporant plus au moins de paramètres parmi les treize disponibles.

La figure 4.45 présente pour chacun des treize paramètres un graphique avec deux histogrammes pour illustrer l'existence ou non d'une relation entre son pointage et les cotes terrain (Cloutier et Locat, 2016 et section 4.8.2). Les cotes terrain sont un chiffre de 1 à 13 donné aux coupes de roc suite à leur évaluation sur le terrain. La cote terrain est entièrement basée sur le jugement et a été attribuée en considérant autant la susceptibilité à la rupture que l'atteinte. Elle représente un niveau de dangerosité plus élevé pour les cotes terrain de 1 à 5 et un niveau de dangerosité faible pour les cotes terrain de 11 à 13. Sur la figure 4.45, les barres grises des graphiques sont les pointages des coupes de roc jugées les plus prioritaires (de 1 à 5), alors que les barres noires présentent les pointages des coupes jugées non-prioritaires (de 11 à 13). Si le paramètre reflète bien la susceptibilité à la rupture d'une coupe de roc, il devrait y avoir une proportion plus importante de valeurs de 27 et de 81 dans les histogrammes en barres grises.

Ces histogrammes indiquent que les cinq paramètres suivants montrent une corrélation certaine avec la cote terrain : *historique de rupture, présence d'eau, abondance d'instabilités, taille et volume et surplombs*. Les quatre paramètres suivants ne montrent peu ou pas de corrélation : *orientation, déformation, remplissage et espacement*. Les autres paramètres montrent des corrélations intermédiaires : *ouverture, rugosité, orientation des familles et nombre de familles*.

Ainsi, trois paramètres ont été abandonnés pour l'évaluation du *Potentiel de rupture* (S_{CR}), il s'agit de : *déformation, remplissage et espacement*. L'*orientation* a été conservée, principalement puisqu'elle peut être mesurée avec précision et au bureau et est directement en lien avec la possibilité cinématique de la rupture. L'*orientation* de la paroi est liée aux nombres de cycles de gel-dégel que subira la paroi. Une paroi orientée vers le sud en subira plus. Il a été démontré que l'intensité et le nombre de cycles de gel et de dégel ont un impact sur la génération de chutes de pierres par une action de dégradation du massif rocheux (D'Amato et al. 2016). Par contre, étant donné que la majorité des coupes (315 coupes sur un total de 425) obtient un pointage de 9 à ce paramètre, il influence peu les résultats.

Le potentiel de rupture (S_{CR}) est aussi fonction de la dimension de la coupe de roc. La relation entre la cote terrain et la hauteur des parois est forte et les histogrammes de la figure 4.46a l'illustre. La relation avec la longueur existe aussi, mais est moins marquée (fig. 4.46b). La superficie de la paroi est estimée à partir des valeurs de sa longueur (L) et de sa hauteur maximale (H) en calculant son aire comme celle d'un triangle, *i.e.* en utilisant l'équation 4.21 :

$$Superficie (m^2) = \frac{H \times L}{2} \quad [4.21]$$

Un facteur est attribué en fonction de la valeur de la superficie (tableau 4.13). Les plages ont été déterminées en fonction des superficies de coupes de roc étudiées, dont les distributions sont présentées à la figure 4.47. Il est important de souligner ici que les limites pourraient être ajustées lors de l'application à un autre territoire.

Par exemple, une coupe de roc de 4 m de haut et de 500 m de long et une coupe de 10 m de haut et de 100 m de long auraient toutes deux un facteur de pondération (F_{SUP}) de 0.9. L'intervalle des valeurs

potentielles de S_{CR} , obtenu de la multiplication du terme Y_{CR} par le facteur de pondération (F_{SUP}) varie de 0.00037 à 1.

L'application d'un facteur de correction a un effet important sur la valeur du potentiel de rupture (S_{CR}). Lorsque l'on ordonne les coupes de roc en ordre décroissant du terme Y_{CR} , le classement est différent de celui obtenu lorsqu'on les ordonne en fonction de la multiplication d' Y_{CR} et de F_{SUP} . Ceci est illustré à la figure 4.48.

Tableau 4-13. Valeur attribuée au facteur de pondération en fonction de la dimension des parois rocheuses (F_{SUP}).

Superficie (m ²)	Facteur de pondération pour la superficie (F_{SUP})
Moins de 99	0.01
100 à 199	0.1
200 à 499	0.5
500 à 999	0.9
1000 à 1999	0.99
2000 et +	1

Lorsque des volumes potentiels de plus de 5 m³ étaient notés sur le terrain, un commentaire était saisi à cet effet. L'observation de tels volumes est indiquée dans les résultats du S_{CR} et du $D_{MEDCP, CR}$, par un symbole différent ou par une mention dans le tableau. Ce potentiel n'influence pas la valeur du S_{CR} , autrement que dans le choix des pointages attribués aux paramètres de la fiche MTQ.

Les fiches MTQ n'ont pas été saisies pour toutes les coupes de roc répertoriées sur le territoire couvert par le projet ParaChute. Lors de la première semaine de terrain en juin 2015, la fiche n'était pas saisie de façon systématique et, par la suite, certaines coupes n'ont pas été le sujet de caractérisations complètes, car elles ont été jugées, sur le terrain, non prioritaires. Ces coupes ont eu des cotes terrain de valeur 12 ou 13 (tableau 4.5). Au total, 100 coupes de roc inventoriées n'ont pas de fiche MTQ. Leurs caractéristiques sont résumées au tableau 4.14 en les distinguant selon leur cote terrain. 78 de ces coupes sont de faible hauteur, soit de 6 m et moins et huit coupes de roc ont des hauteurs de 10 m et plus. Pour leur attribuer un potentiel de rupture (S_{CR}), les paramètres de la fiche MTQ ont été évalués, selon la méthodologie décrite ci-dessous.

Pour les coupes de roc qui ont une cote terrain de 13, peu importe leur hauteur, les pointages de neuf des dix paramètres est fixé à 3. Les mêmes pointages sont attribués aux parois de cote terrain 11 et 12, dont la hauteur est de 6 m et moins. Le pointage de l'orientation de la paroi est déterminé à partir de l'orientation de la coupe évaluée à partir du MNT. Pour les parois restantes, soient celles cotées de 7 à 10 et celles de plus de 6 m de haut cotées 11, les paramètres de la fiche MTQ sont évalués en fonction des photographies terrain disponibles. La hauteur et la longueur de toutes ces parois est connues, donc le facteur de pondération pour la superficie (F_{SUP}) est calculé de la même manière que pour les autres coupes de roc.

Tableau 4-14. Cote terrain et hauteurs des cent coupes pour lesquelles la fiche MTQ n'a pas été saisie au cours des travaux de terrain.

Cote terrain	Nombre total de coupes	Coupes de h < 6 m	Coupes de h = 6 m	Coupes de h > 6 m	h maximal (m)
13	59	46	9	4	8
12	19	9	6	4	10
11	7	3	1	3	17 et 30
10	10	2	1	7	17
9	2	0	0	2	17
8	1	1	0	0	5
7	1	0	0	0	21
Aucune cote	1	0	0	1	10

4.9.7. Intégration des paramètres liés aux conséquences et à la vulnérabilité

L'approche adoptée pour le MEDCP permet d'intégrer, s'il est jugé nécessaire, un terme lié aux conséquences potentielles et à la vulnérabilité des éléments à risque à une chute de pierres. Cette section fait une brève revue des conséquences potentielles d'un tel événement pour le cas de la voie ferrée étudiée dans le projet *ParaChute*. Cette section pourrait être utile au gestionnaire pour étudier l'influence que pourrait avoir l'intégration de ce terme dans le MEDCP et quels paramètres pourraient être considérés lors de son évaluation. Un exemple sera donné dans la discussion de ce rapport.

La première question à se poser quant aux conséquences potentielles est « Quels sont les éléments à risques ? » En d'autres mots, qui ou quoi pourrait être affecté par une chute de pierres ? Les conséquences peuvent être de nature économique, environnementale, humaine ou matérielle. Elles peuvent aussi être immatérielles lorsque l'on considère les conséquences à l'image de la compagnie, à la confiance des employés envers leur employeurs et psychologiques pour ceux touchés de près ou de loin par le stress engendré par de telles situations. Ici, seuls les éléments physiques seront considérés, i.e. les effets psychologiques ne sont pas considérés. Dans le cas d'une voie ferrée, les éléments à risque sont (liste non exhaustive) :

- *Les opérateurs de locomotives;
- *Les employés d'entretien de la voie ferrée;
- *Les employés à bord d'un train;
- *Les utilisateurs des passages à niveau;
- *Les utilisateurs de chemins et routes situés en périphérie;
- *Le train, incluant la ou les locomotives et les wagons;
- Les composantes de la voie ferrée (les rails, le ballast, les aiguillages, etc.);
- *Le chargement du train;
- *L'environnement, incluant les étendues d'eau, la faune et la flore;
- La ligne électrique;
- *Les camps situés en bordure de la voie ferrée;

- Les activités économiques en lien avec le transport de marchandises sur la voie ferrée;
- *Autres infrastructures à proximité.

Dans le cas des routes du MTMDET, les éléments à risque seraient très différents et c'est l'une des raisons pourquoi un terme représentant les conséquences doit être pensé en fonction de l'infrastructure et du système de gestion en place.

Lors d'une chute de pierres, quatre scénarios sont possibles et chacun entraînera des conséquences différentes. Le premier est que la chute de pierres n'atteint pas la voie ferrée, ainsi, aucune conséquence n'y est associée. Le deuxième est que la chute de pierres traverse la voie ferrée et l'endommage au passage. Le troisième est que la chute de pierres traverse la voie ferrée au même moment où un véhicule s'y trouve. Le quatrième scénario est celui où la chute de pierres s'immobilise sur la voie ferrée

La suite du volet conséquences et vulnérabilité portera uniquement sur le quatrième scénario. Si l'on pose l'hypothèse, que la chute de pierres n'atteint que la voie ferrée (c'est-à-dire que la chute de pierres n'atteint pas les routes, les camps, etc), alors, les éléments marqués d'un astérisque dans l'énumération en début de section, ne sont vulnérables que dans le cas d'un déraillement. Encore une fois, nous faisons abstraction des possibles effets psychologiques et immatériels. Ainsi, puisque plusieurs conséquences sont causées par un déraillement, le terme conséquence pourrait essentiellement évaluer la possibilité qu'une chute de pierres entraîne un déraillement. En d'autres termes, le terme pourrait évaluer la vulnérabilité d'un train au déraillement, si une chute de pierres d'une certaine magnitude et intensité survient, à un endroit particulier de la voie ferrée. Pour cet endroit particulier, il pourrait être possible de déterminer quels autres éléments à risque sont présents et quelles sont leur vulnérabilité propre suite à un déraillement. Une telle approche permettrait de différencier les conséquences potentielles selon l'endroit où se situe la coupe de roc.

Dans une optique de chemin de fer à simple voie, sans contournement et en considérant que tous les trains parcourent le même chemin, le fait de ne pas tenir compte d'autres paramètres tels que le trafic et la possibilité de détour est tout à fait logique. C'est d'ailleurs l'approche adoptée dans le cas du système de l'IOC-BGC (Lato et al. 2016a et b) et de l'analyse de risque réalisée pour le glissement actif de Gascons (Cloutier 2014). Dans le système IOC-BGC, la visibilité et la distance de freinage ne sont pas pris en compte, car il est peu probable qu'un train de minerai puisse arrêter à temps pour éviter l'impact avec un objet. De plus, peu importe où se fait l'accident, l'accès est difficile et ceci occasionne un arrêt du transport du minerai et des passagers.

Pour continuer dans cette approche, l'évaluation du paramètre serait alors centré sur les trois questions suivantes : 1) si une chute de pierres atteint la voie ferrée, causera-t-elle un déraillement et 2) quelle sera la gravité d'un déraillement dans ce secteur et 3) les conséquences seront-elles plus ou moins importantes que s'il avait eu lieu dans un autre secteur? Quels sont donc les facteurs peuvent influencer la réponse à ces trois questions?

Dans l'optique où la chute de pierres se produit lorsque le train n'y est pas, ces paramètres affecteront la fonctionnalité de la voie ferrée :

- quantité (volume total) de roches atteignant la voie ferrée;
- dimension des fragments qui ont atteint la voie ferrée;

- énergie de la chute de pierres. Une chute de pierres avec plus d'énergie est plus susceptible d'endommager les rails;
- est-ce que la voie est bloquée (concentration des débris);
- la forme des particules. Dans le système du CN, des blocs de forme de coin sont plus susceptibles de soulever la locomotive et donc de la faire dérailler;
- espace disponible pour pousser la roche à l'extérieur de la voie ferrée.

Les paramètres suivants influenceront la capacité du train à s'arrêter à temps ou de ne pas dérailler s'il entre en collision avec des débris immobilisés sur la voie ferrée :

- l'énergie cinétique du train qui varie selon le carré de la vitesse du train;
- possibilité d'alerter le train avant le passage (système d'alerte, bris du rail qui déclenche une alerte)(varie en fonction du temps d'occupation d'un canton);
- distance de visibilité, qui, avec la vitesse, influencera la capacité à ralentir ou s'immobiliser avant l'impact;
- la distance de freinage, qui est fonction de divers paramètres dont l'inclinaison de la voie ferrée et des caractéristiques propres au train (poids, longueur, type de freins).

Enfin, pour répondre aux deuxième et troisième questions, les paramètres suivants pourraient être considérés :

- le potentiel qu'une étendue d'eau soit atteinte par le train;
- la difficulté d'atteindre le lieu du déraillement pour porter secours et remettre en fonction la voie ferrée;
- l'inclinaison et le dénivelé du talus en bordure de la voie ferrée;
- distance entre la voie ferrée et la crête du talus;
- la présence d'autres infrastructures à proximité (tunnels, ponts, routes, habitations).

Plusieurs des éléments de cette deuxième liste peuvent être évalués des photographies aériennes et du MNT. La visibilité a été évaluée à partir du MNT (section 4.6.5). D'ailleurs les informations suivantes sont disponibles pour chacune des coupes de roc et des secteurs de parois éloignées :

- hauteur et angle du talus en aval de la voie ferrée;
- distance de l'étendue d'eau la plus proche;
- type d'étendue d'eau (choix entre rivière, ruisseau, lac, tourbière et aucun);
- éléments à risque à proximité (ligne électrique, camp permanent, camp temporaire, passage à niveau, route, chemin de terre, habitations);
- limite de vitesse.

4.9.8. Présentation cartographiques du D_{MEDCP}

Les résultats du MEDCP pour chacun des secteurs éloignés ou coupes de roc ont aussi été mis sous forme cartographique. La principale différence entre les deux représentations se situe dans le fait que les secteurs éloignés forment des polygones, tandis que les coupes de roc doivent être représentées sous forme de polyligne.

Trois principaux paramètres sont représentés sur chacune des cartes. Premièrement, la longueur de la ligne ou du polygone représente l'espace occupé par la coupe ou le secteur éloigné. Une étiquette est affichée afin d'y spécifier le nom de la coupe. Par la suite, la couleur de la polyligne ou du polygone représente la catégorie MEDCP. L'échelle de couleur choisie varie de rouge (catégorie 1) à vert (catégorie 5) en passant par le jaune pour la catégorie 3. Finalement, pour chacune des coupes ou parois éloignées, un histogramme est présent. Cet histogramme représente sous format graphique la valeur attribuée au potentiel d'atteinte (en bleu) et au potentiel de rupture (en blanc), les deux informations étant mis à la même échelle. Cette représentation a comme objectif de permettre, facilement, de comprendre d'où vient la valeur du D_{MEDCP} . Par exemple, un potentiel de rupture élevé, combiné à un potentiel d'atteinte faible, pourrait donner une catégorie MEDCP de 4 ou 5. Cette représentation graphique montre rapidement que la catégorie est abaissée par le potentiel d'atteinte faible. De même, un emplacement, par exemple, qui aurait un fossé très étroit et donc un potentiel d'atteinte élevé, pourrait voir sa catégorie MEDCP être faible si le potentiel de rupture est faible. Dans le cas des coupes de roc, l'histogramme comporte une troisième information, en beige, indiquant si de la mitigation est présente ou non. Dans ce cas, peu importe la mitigation, la présence de mitigation fixe le terme M à une valeur de 0.5. Cette valeur sera à vérifier et est discutée dans ce rapport à la section 6.5.2.

Les cartes produites pour les coupes de roc comportent aussi quelques autres renseignements, tels qu'une symbologie présentant les événements répertoriés de mouvements de masse, soit autant les chutes de pierres que les coulées de débris ou avalanches. Cette banque de données est présentée au chapitre 5.

De plus, pour certaines coupes, un astérisque de couleur a été apposé à côté du nom de la coupe. Cet astérisque permet de refléter, dans quelques cas précis, s'il y a une différence notable entre la catégorie MEDCP et la catégorie déterminé de la cote terrain. Deux cas peuvent arriver. En premier, si la catégorie «terrain» était de 5, mais que la catégorie MEDCP était entre 1 et 3, un astérisque vert a été apposé. Cela reflète que, pour différentes raisons, l'évaluation terrain avait été telle que cette paroi a été jugée qu'elle représentait un très faible danger pour la voie ferrée, voire, qu'elle pourrait être retirée de de l'inventaire, mais que la catégorie MEDCP ne reflète pas ces observations. Ces parois pourraient donc être considérées comme les moins prioritaires de leur catégorie MEDCP respective, et qu'avant d'abaisser leur catégorie, cette paroi devrait être revisitée pour confirmation. L'autre cas, qui est arrivé rarement, est le cas contraire, soit une paroi dont la catégorie MEDCP est plus faible que la catégorie «terrain». Dans ce cas, un astérisque rouge a été apposé. Ceci veut dire qu'une attention spéciale y est requise. Par exemple, l'inspection terrain pourrait avoir révélé la présence d'un ou de quelques blocs problématiques, mais que la falaise en général n'est pas trop problématique, ou que la complexité des glissements potentiels requièrent une analyse plus détaillée.

Afin de pouvoir comparer les cartes entre elles, toutes les cartes pour les secteurs éloignés ont été produites à la même échelle, soit une échelle de 1:20000 lorsqu'imprimé sur une feuille de type « Lettre ». Pour les cartes présentant les D_{MEDCP} des coupes de roc, l'échelle utilisée est de 1:8000 sauf pour le secteur des tunnels D et E (PM 155) où l'échelle utilisée est de 1:5000, étant donné la densité très élevée de coupes de roc qui rendait illisible la carte au 1:8000.

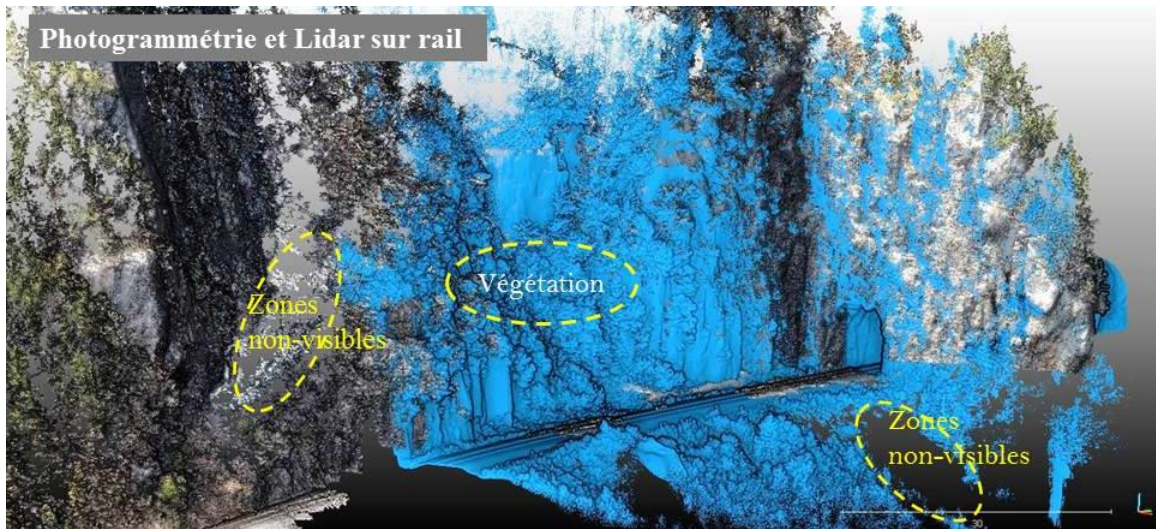


Figure 4.1. Illustration de nuages de points acquis avec le LiDAR sur rail (couleur bleue) et en photogrammétrie (couleurs réelles), montrant des zones non visibles ou des zones masquées par la végétation.

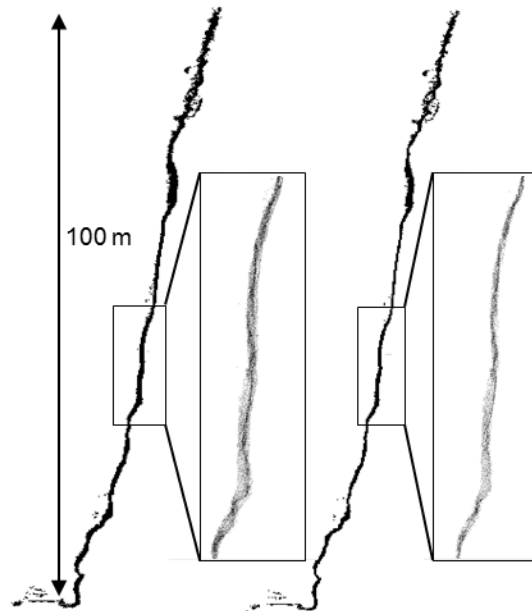
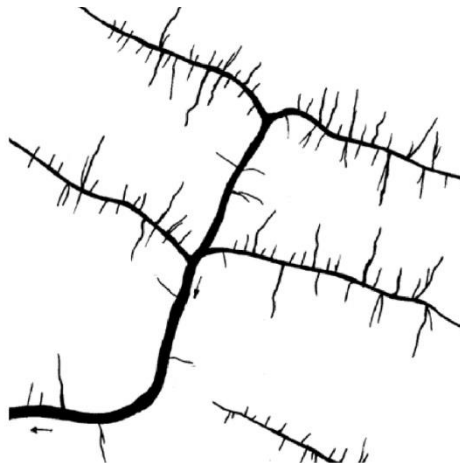


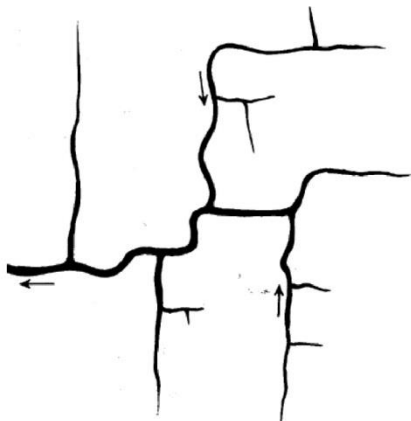
Figure 4.2. Coupe d'un modèle photogrammétrique, extraite sur une largeur de 0.5 m, d'une paroi montrant le bruit élevé (à gauche) et le bruit un peu moins grand (à droite) après filtrage des données.



Parallèle



Treillis



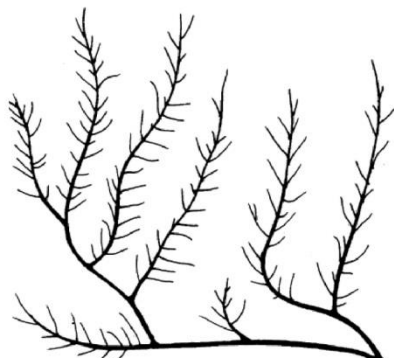
Rectangulaire



Angulaire



Dendritique



Penné

Figure 4.3. Principaux types de drainage possibles dans la région du projet ParaChute.

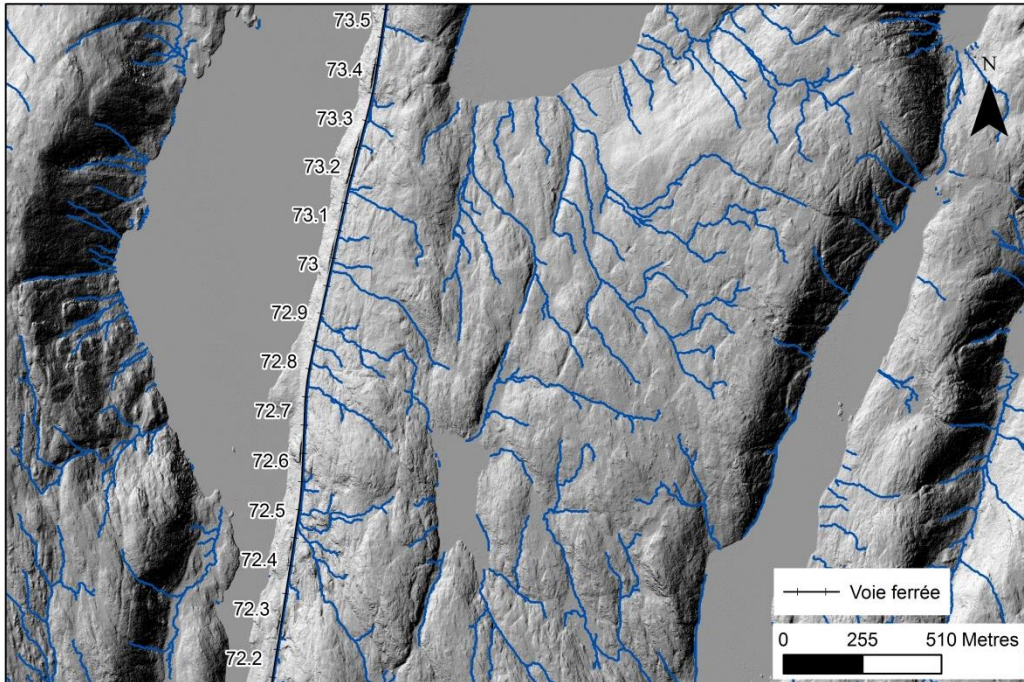


Figure 4.4. Exemple d'un drainage angulaire dans le canton Eva

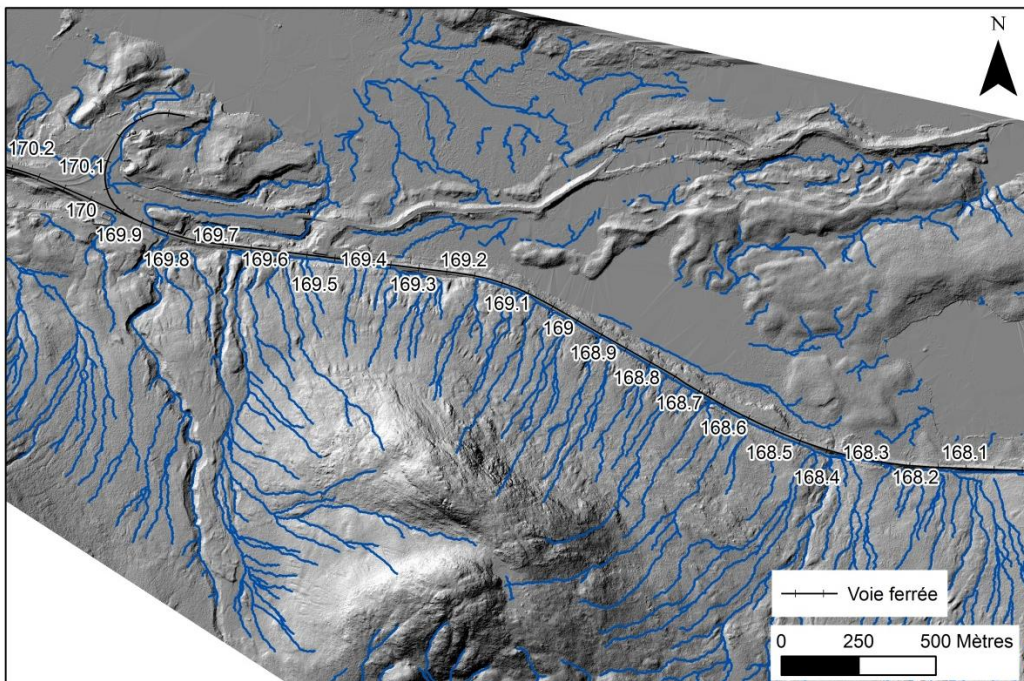


Figure 4.5. Exemple de drainage parallèle et plus ou moins perpendiculaire à la voie ferrée dans le canton Kay. Ce même patron semble se développer tout autour du massif central de la figure pour pratiquement former un ensemble annulaire.

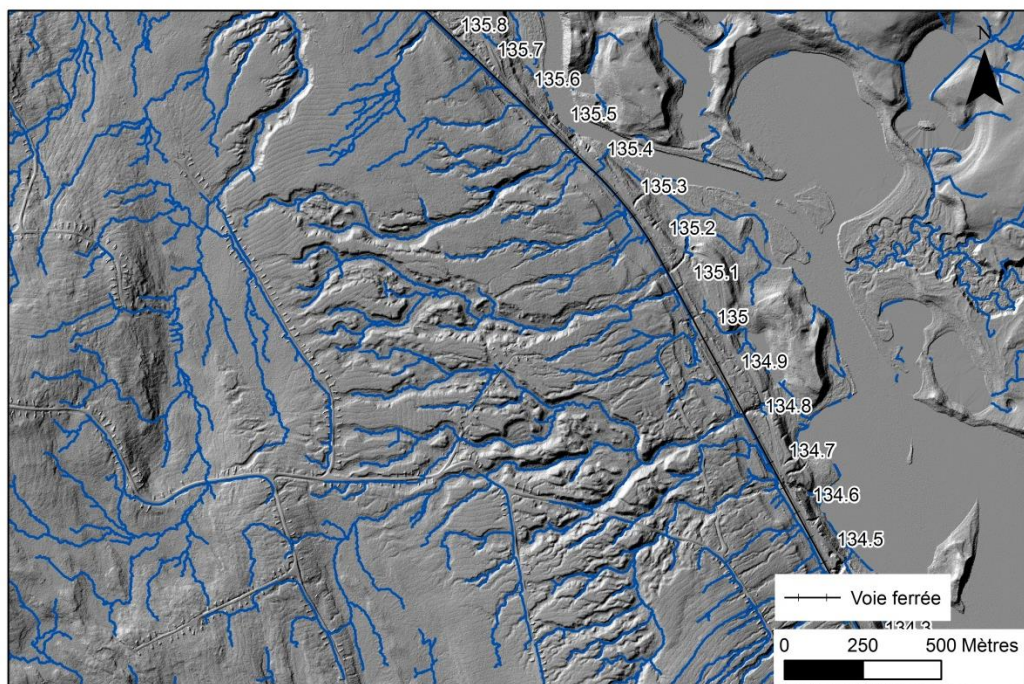






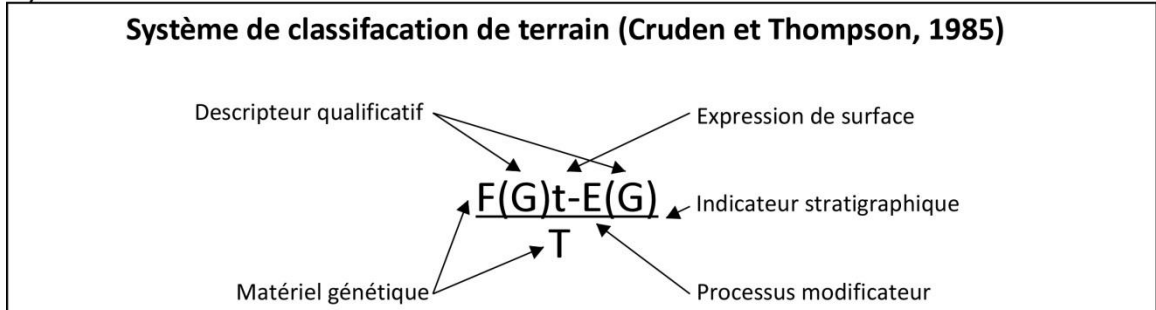


Figure 4.6. Exemple d'un réseau penné dans des dépôts fluvioglaciaires fortement ravinés (portion centrale de l'image). L'image vient du canton Item.

a)

Matériel génétique	Épaisseur	Limites
Matériaux anthropogéniques	 < 1 m	— Certaine
Colluvions	 1 à 25 m	- - - Incertaine
Dépôts fluviatiles		 Grille atlas
Dépôts fluviatiles ravinés		
Dépôts fluvio-glaciaires		
Dépôts fluvio-glaciaires ravinés		
Dépôts organiques		
Roche en place, substratum		
Roche en place, substratum escarpé(e)		
Till		
Till raviné		
Marin		
Marin raviné		
	Hydrographie	
	 Cours d'eau	 28.1 Chemin de fer/Points milliaires
	 Lacs et rivières	

b)



c)

Matériel génétique	Descripteur qualificatif	Expression de surface
A: Matériaux anthropogéniques	A: Processus actif	a: Talus, glacis
C: Colluvions	G: Glaciaire	b: Tapis, couche 1 à 25 m
F: Dépôts fluviatiles	I: Processus inactif	f: Cône, fan, éventail
O: Dépôts organiques		h: Bosselé
R: Roche en place, substratum		l: Au niveau, nivelé
T: Till	Processus modificateur	m: Réduit, ténu
W: Marin	E: Chenalisé	r: À crêtes
L: Lacustre (inutilisé ici)	F: En rupture	s: Abrupt, à pic
	H: Avec des kettles	t: En terrasse
	P: Suffosion	v: Placage < 1 m
	V: Raviné	

Figure 4.7. Composantes et légende du système de classification des motifs de la carte morphostructurale, (a): légende de la grille d'interprétation; (b et c) code de classification des motifs autre que le drainage.

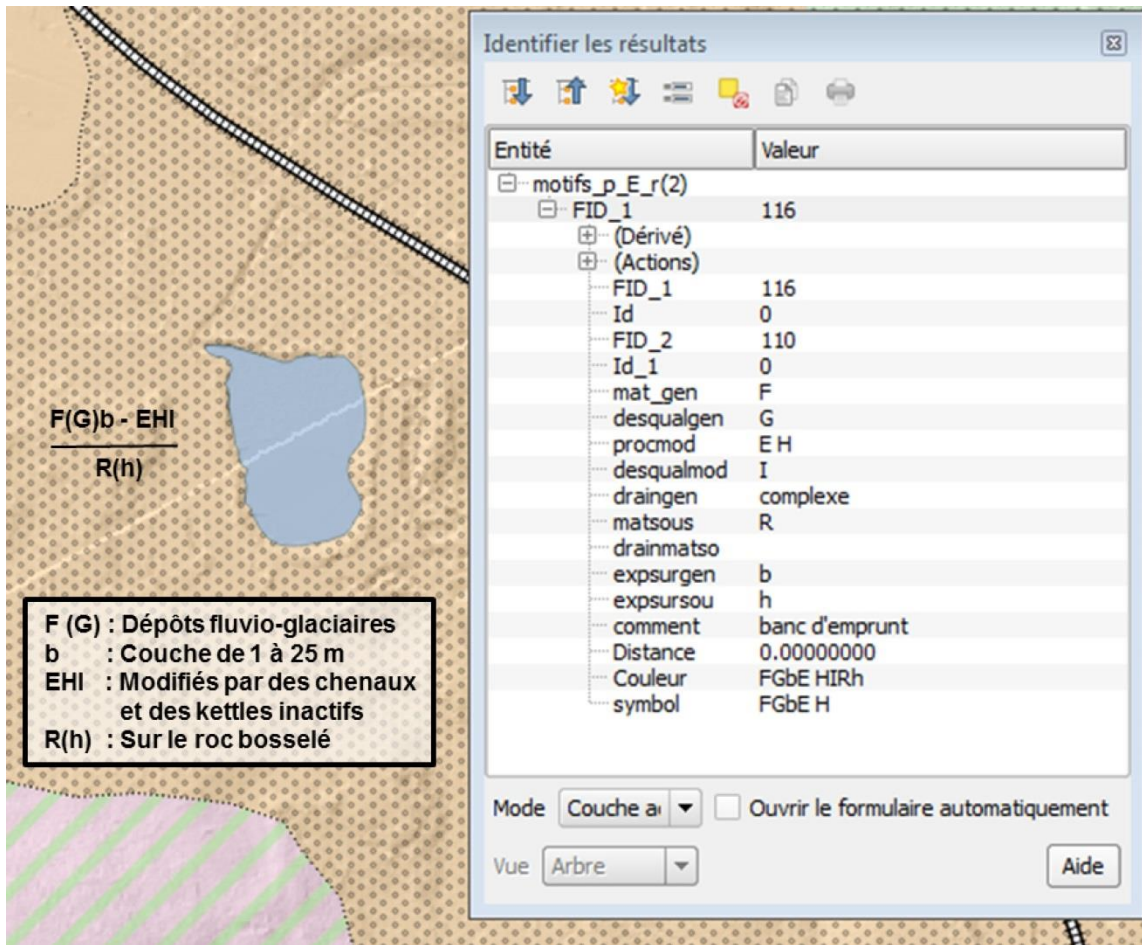


Figure 4.8. Exemple d'un motif et de ses attributs réalisés pour le projet ParaChute et illustrant son intégration dans QGIS.

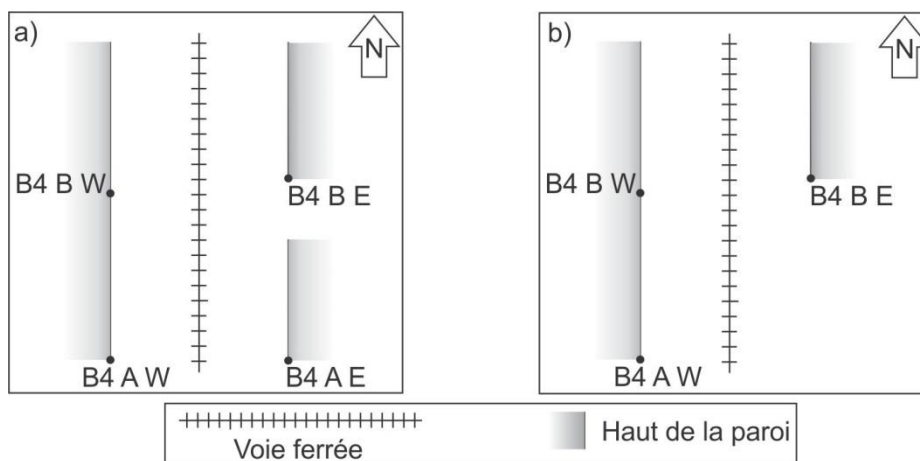


Figure 4.9. Exemple d'attribution des noms de coupes de roc lorsqu'une paroi est continue.

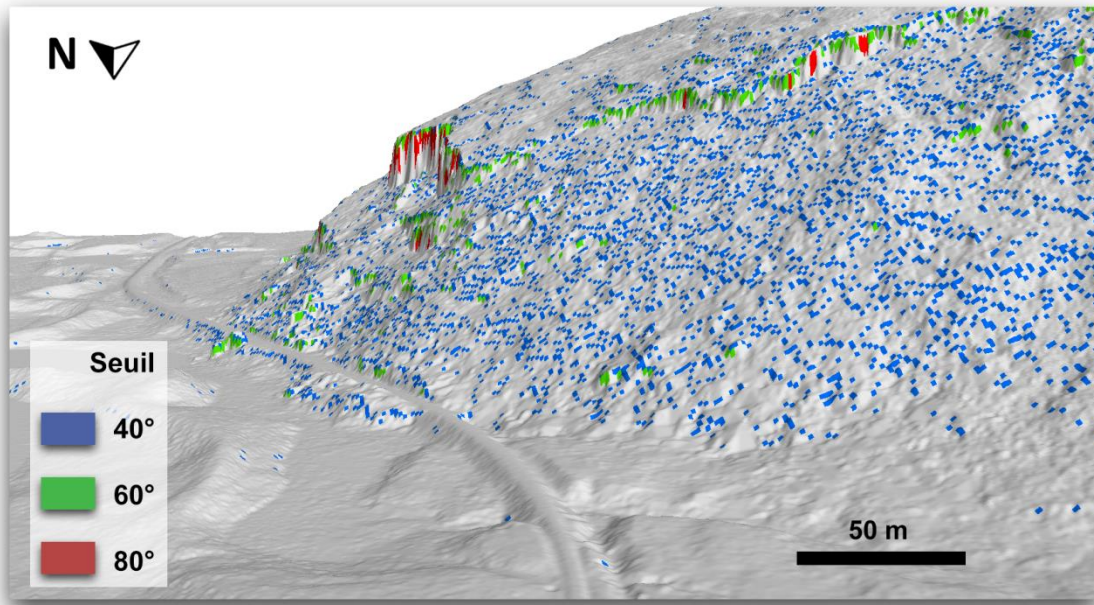


Figure 4.10. Sommets automatiquement identifiés pour le PM 50.3. Les sommets identifiés avec les seuils de 40, 60 et 80 ° sont respectivement représentés en bleu, vert et rouge.

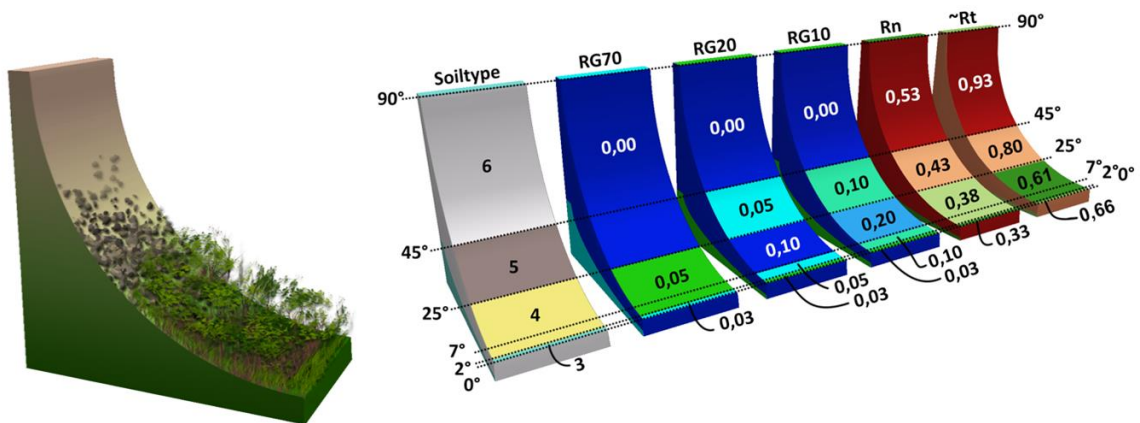


Figure 4.11. À gauche, représentation des types de terrain qui varient en fonction des pentes. À droite, série de modèles numériques de terrain à pente variable sur lesquels les caractéristiques de terrain ont été automatiquement attribuées aux pentes par les outils développés en fonction des paramètres retenus. Les valeurs de coefficient de restitution tangentiel (R_t) sont estimées d'après les équations de Rockyfor3D pour les paramètres de terrain concernés, pour des particules cubiques de 30 cm de côté et de masse volumique de 2800 kg/m³ et des impacts à des vitesses correspondant à celles obtenues après une chute libre verticale de 20 m sur une surface inclinée à 45°.

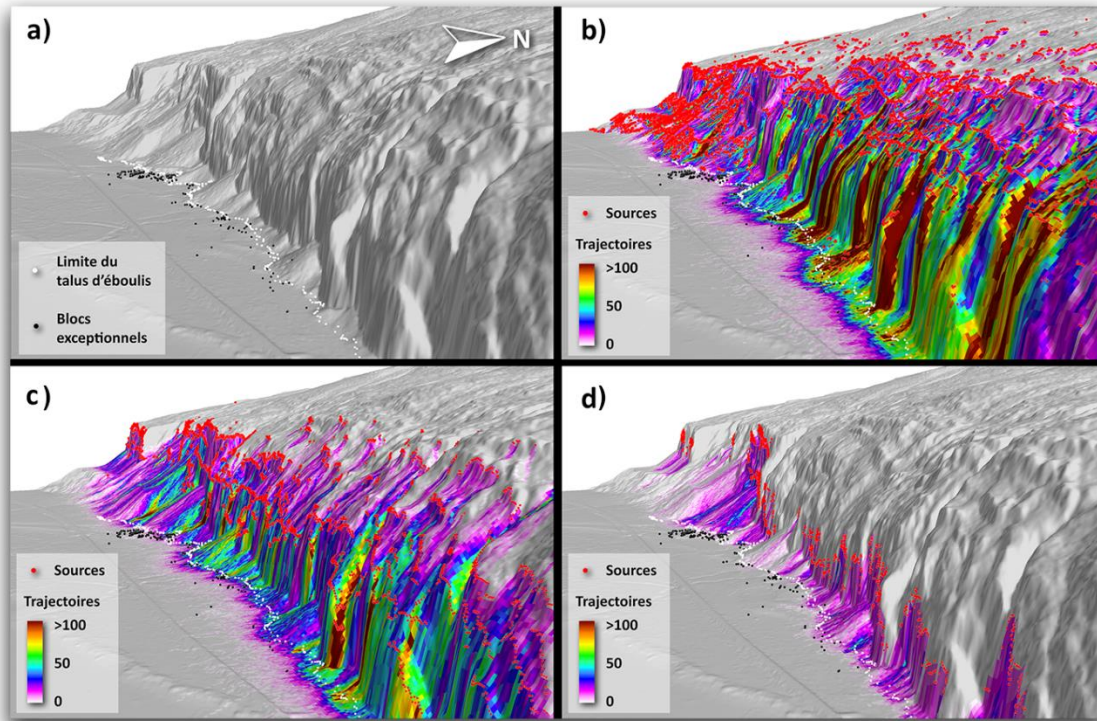


Figure 4.12. Trajectoires simulées au Cap-Tourmente avec les paramètres utilisés pour le projet ParaChute selon les trois scénarios pour l'identification des zones sources en sommet de falaise. En a), le modèle numérique de terrain en relief ombragé est représenté en 3D avec la position du pied du talus d'éboulis identifiée au GPS représentée par des points blancs. Les points noirs correspondent aux blocs exceptionnels ayant dépassé le talus d'éboulis qui ont été observés sur le terrain. En b), c) et d), le nombre de trajectoires passant en chaque pixel est représenté par le large spectre de couleurs. Les sources à partir desquelles les trajectoires sont simulées sont représentées par les points rouges. Celles-ci sont attribuées aux sommets des parois rocheuses pour les seuils de 40, 60 et 80 ° respectivement en b), c) et d). Notez qu'un faible nombre de trajectoires (1-5) passant par un pixel colore ce dernier en blanc rose très peu saturé, ce qui s'apparente beaucoup au gris du relief ombragé.

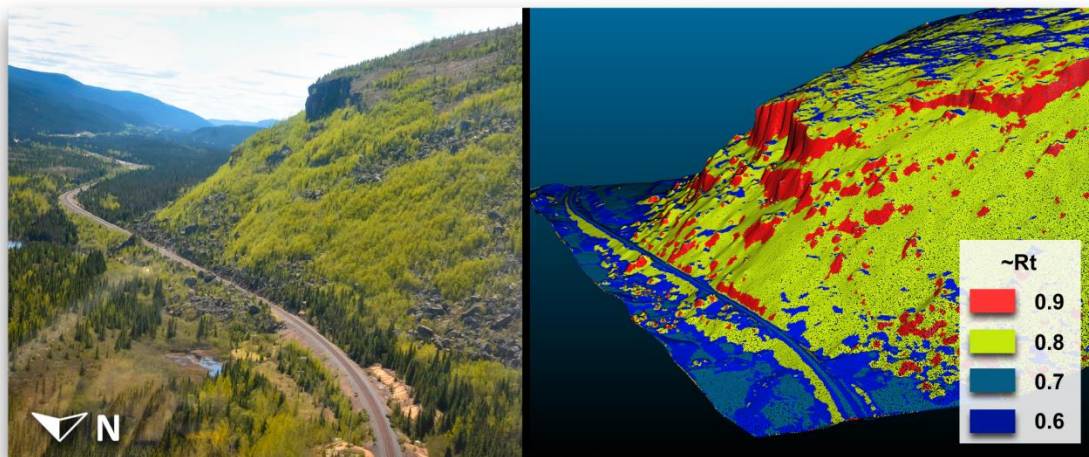


Figure 4.13. Représentation en 3D sous forme de nuage de point (à droite) du secteur du PM 50 visible sur la photographie de gauche. La variable des coefficients de restitution tangentiels est affichée sur les points en différentes couleurs. Le choix des paramètres peut facilement être ajusté lorsque les résultats produits par les outils ne correspondent pas aux types de terrains observés. La visualisation en 3D facilite les étapes de validation des résultats et la calibration des paramètres.

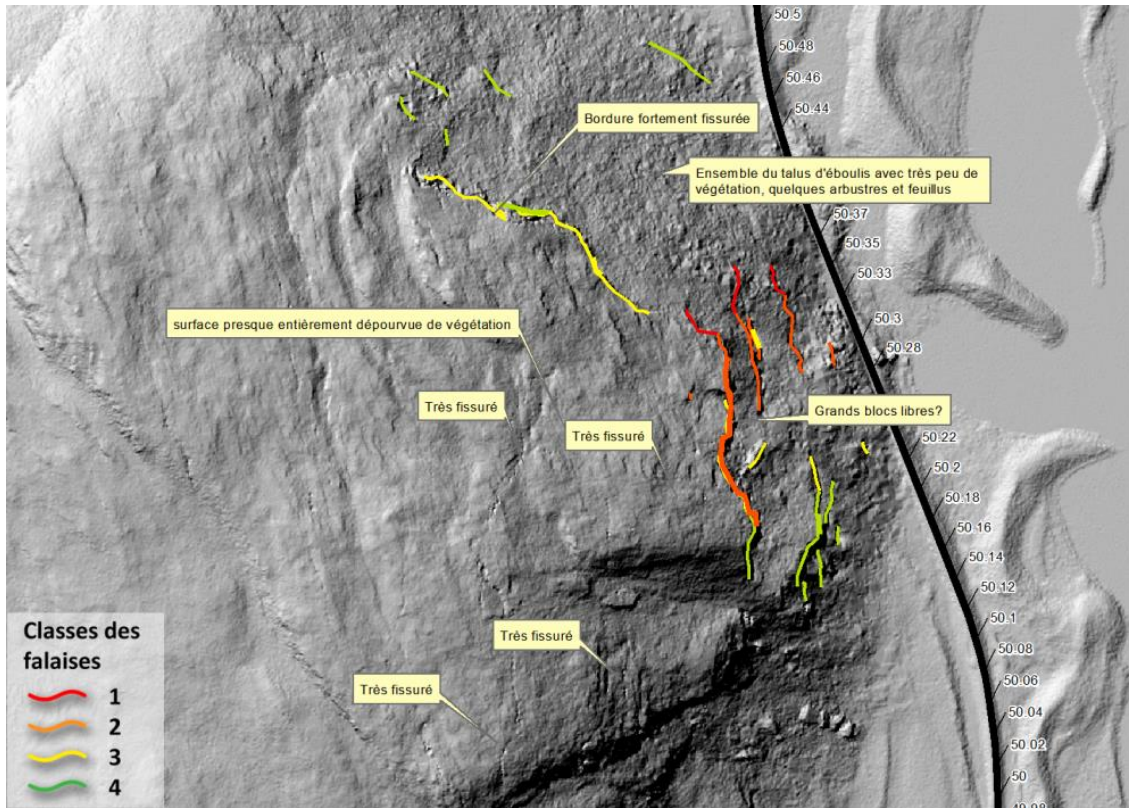


Figure 4.14. Carte de la compilation des observations sur nuages de points avec les sommets de falaise classifiés pour les deux derniers scénarios (60 ° et 80 °) représentés par les tracés colorés. Les points miliaires sont indiqués au niveau de la voie en guise d'échelle et de repères.

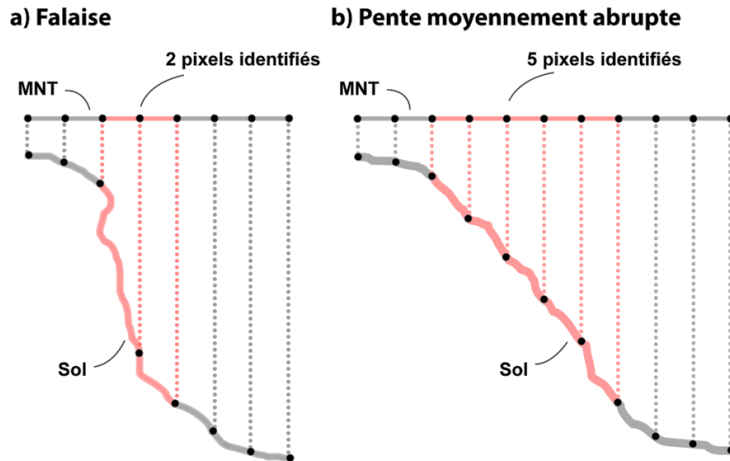


Figure 4.15. Deux pentes de même dénivelé sont représentées, l'une plutôt abrupte en a) et l'autre moins abrupte (en b), avec une pente légèrement supérieure à 40° . Le modèle numérique de terrain (MNT) matriciel (raster) est une représentation à plat des terrains. Ceux-ci sont subdivisés en sections d'aire à plat égale (pixel). Ces divisions égales sont ici représentées avec leurs projections au niveau du sol. Les pixels ayant une pente égale ou supérieure à 40° sont représentés en rouge. Deux pixels sont identifiés dans le cas de la falaise (en a) alors que 5 pixels sont identifiés dans le cas de la pente moyennement abrupte (en b). La surface réelle des terrains ne peut donc pas être correctement représentée par les modèles numériques de terrain.

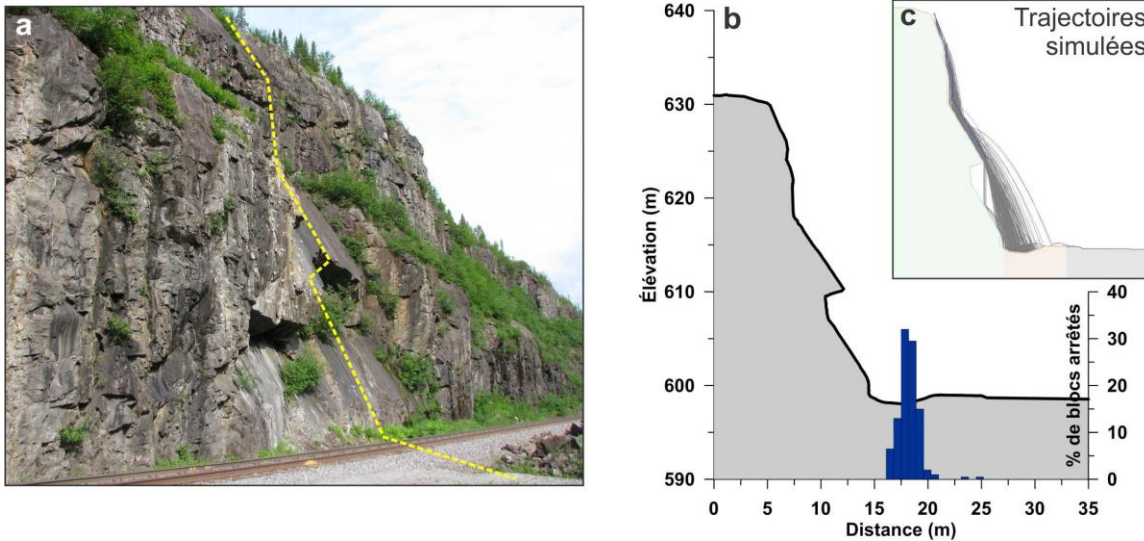


Figure 4.16. Extraction d'un profil topographique, indiqué par une ligne pointillée jaune d'un nuage de points de la paroi rocheuse du PM 150 (a) pour réaliser des simulations de trajectoire 2D (b et c) à l'aide du logiciel RocFall de Rocscience (2016)(c). Ces simulations ont été réalisées avec des paramètres arbitraires pour démontrer l'utilité des nuages de points, par conséquent, le résultat (en b et c) est invalide.

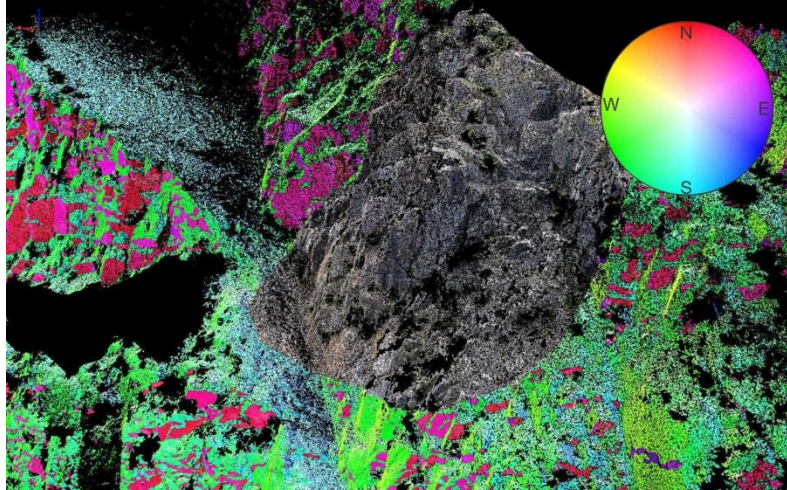


Figure 4.17. Reconnaissance et caractérisation des familles de discontinuités dans le logiciel Coltop 3D sur nuage de points photogrammétriques. Au centre de l'image, le nuage est affiché avec les couleurs de la photographie, soit les valeurs rgb (rgb pour red, green and blue) attribuées aux points. Le reste de la figure présente les points colorés en fonction de leur pendage et direction de pendage selon la charte de couleur affichée dans le stereonet en haut à droite.

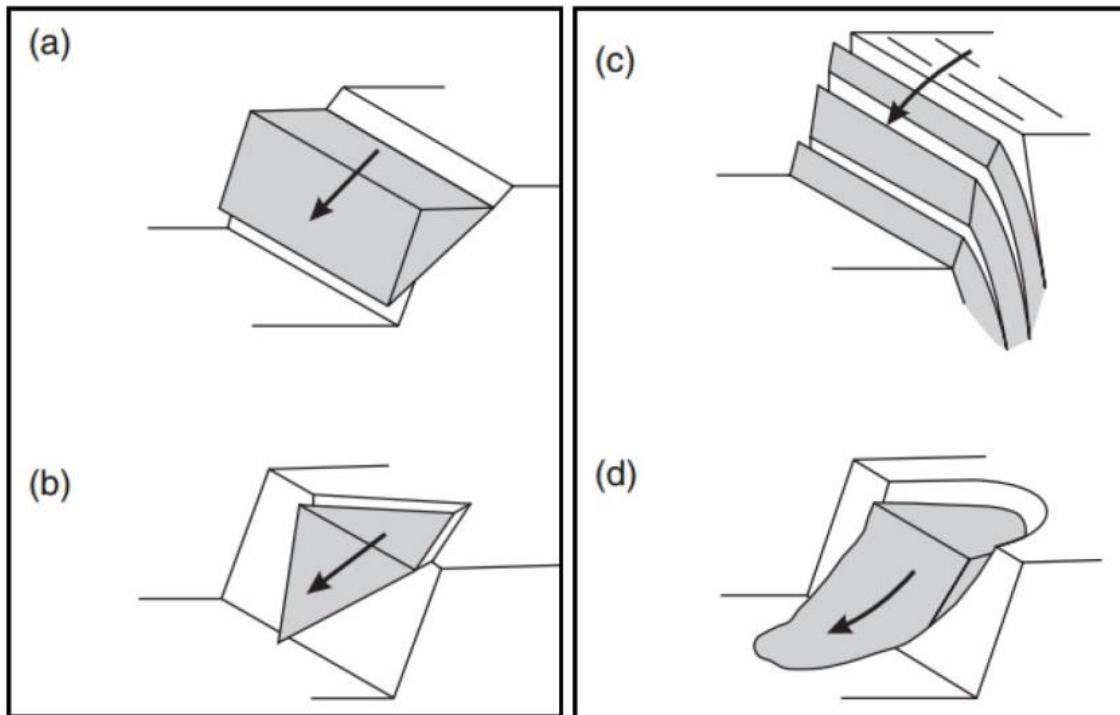


Figure 4.18. Modes de ruptures dans le roc a) rupture planaire, b) rupture en dièdre, c) rupture par basculement et d) rupture circulaire (Tirée de Wyllie et Mah 2004)

Glissement planaire	Glissement dièdre	Rupture par basculement
Pente ≤ 90°		
$ \alpha_d - \alpha_f \leq 20^\circ$	$\beta_i < \beta_{fa}$	$ \alpha_d - (\alpha_f \pm 180^\circ) \leq 15 \text{ à } 30^\circ$
$\beta_d < \beta_{fa}$	$\beta_i > \phi$	$(90^\circ - \beta_d) \leq (\beta_f - \phi)$
$\beta_d > \phi$	$ \alpha_i - \alpha_f < 90^\circ$	
	$ \alpha_i - \alpha_f < \alpha_{a,b} - \alpha_f $	

α_d = direction de pendage de la discontinuité, β_d = pendage de la discontinuité,
 α_f = direction de pendage de la pente, β_f = pendage de la pente,
 β_{fa} = pendage apparent de la pente, β_i = plongée de la ligne d'intersection
 Et ϕ = angle de frottement

Figure 4.19. Critères évalués par les tests cinétiques pour les modes de ruptures planaire, dièdre et par basculement.

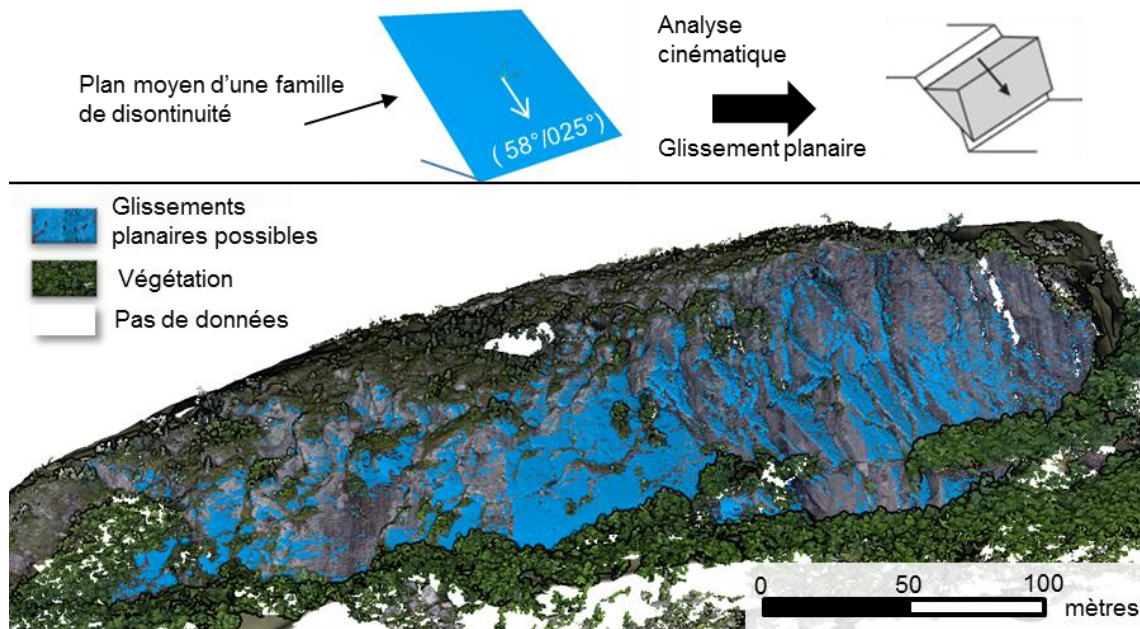


Figure 4.20. Représentation 3D d'une paroi rocheuse sur laquelle une analyse cinématique pour les glissements planaires a été réalisée pour une discontinuité donnée et ce sur chacun des points. Les orientations des plans sont présentées selon la convention pendage/direction de pendage.

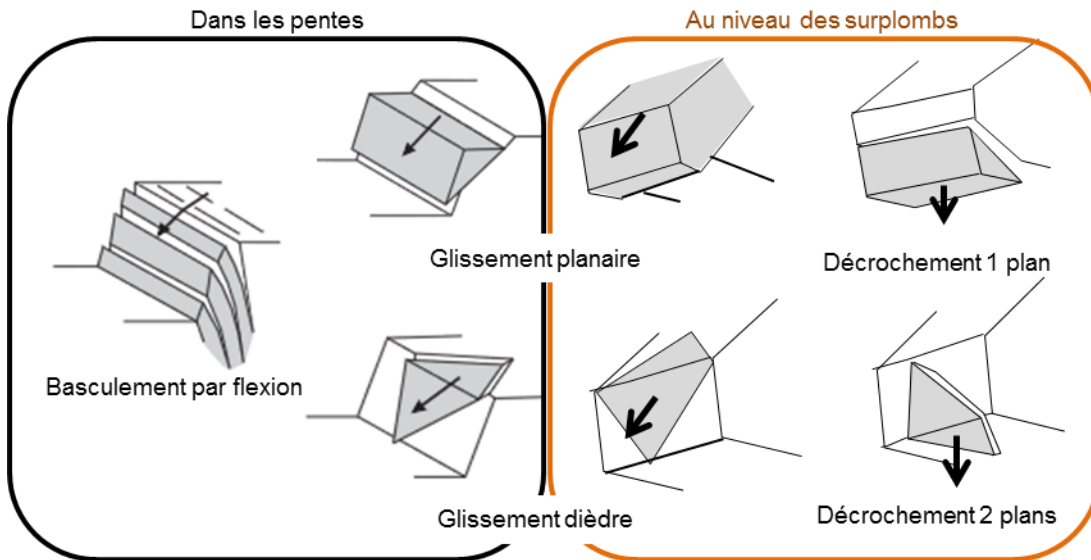


Figure 4.21. Ensemble des modes de rupture considérés dans l'analyse cinématique et les calculs de susceptibilité se produisant dans les pentes et en surplomb

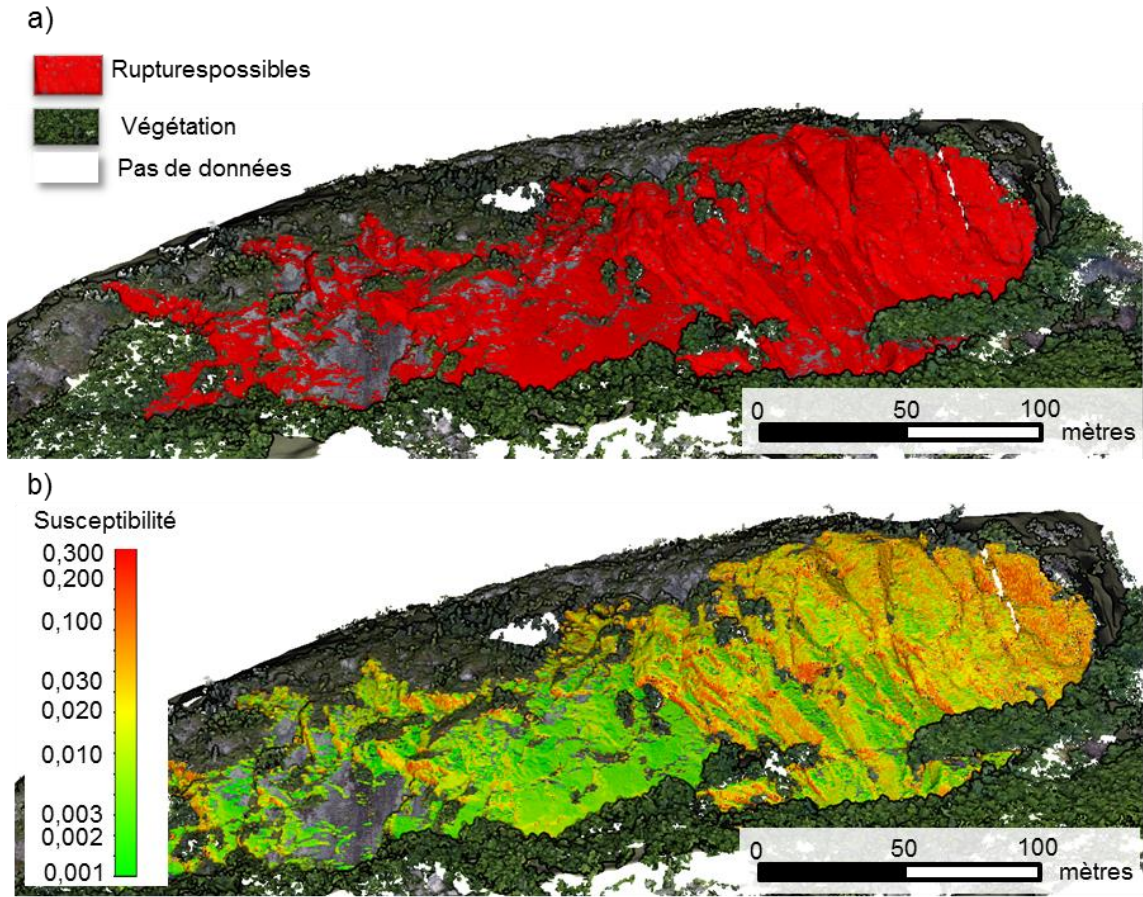


Figure 4.22. Représentation 3D d'une paroi rocheuse sur laquelle a) une analyse cinématique pour tous les modes de ruptures et pour toutes les familles de discontinuités a été réalisée sur chacun des points et b) l'analyse de la susceptibilité a été appliquée sur les modes de ruptures.

a - Vue vers le sud-ouest



b - Vue vers le nord

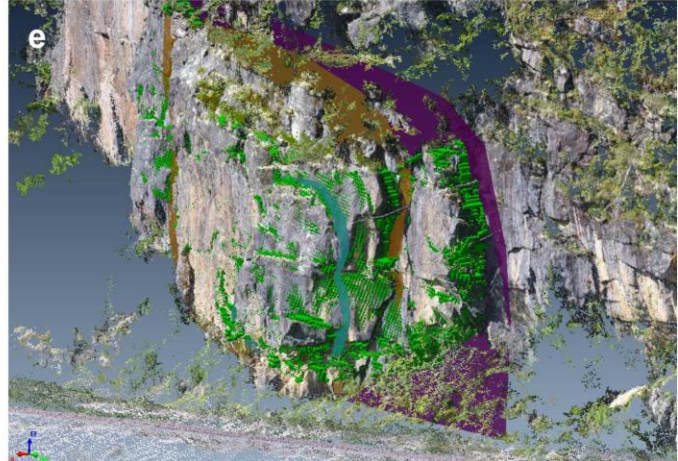
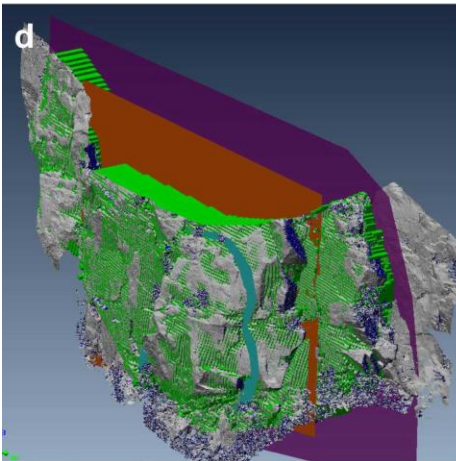
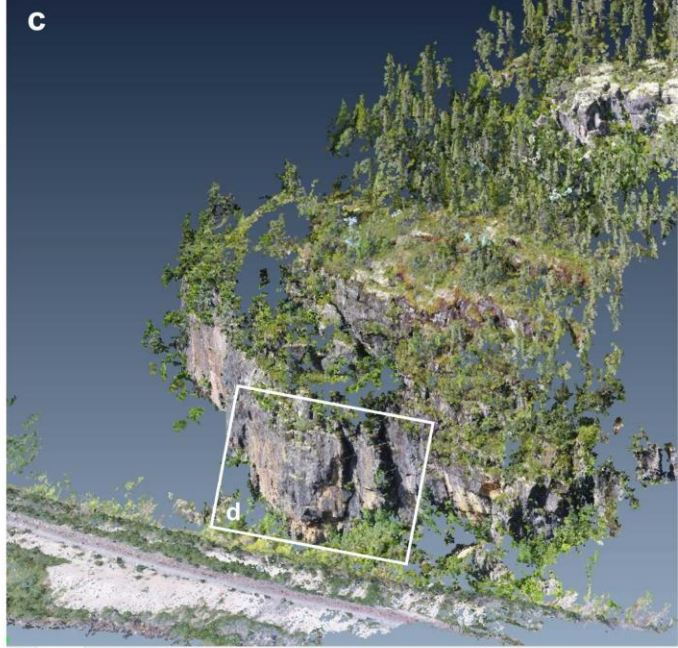
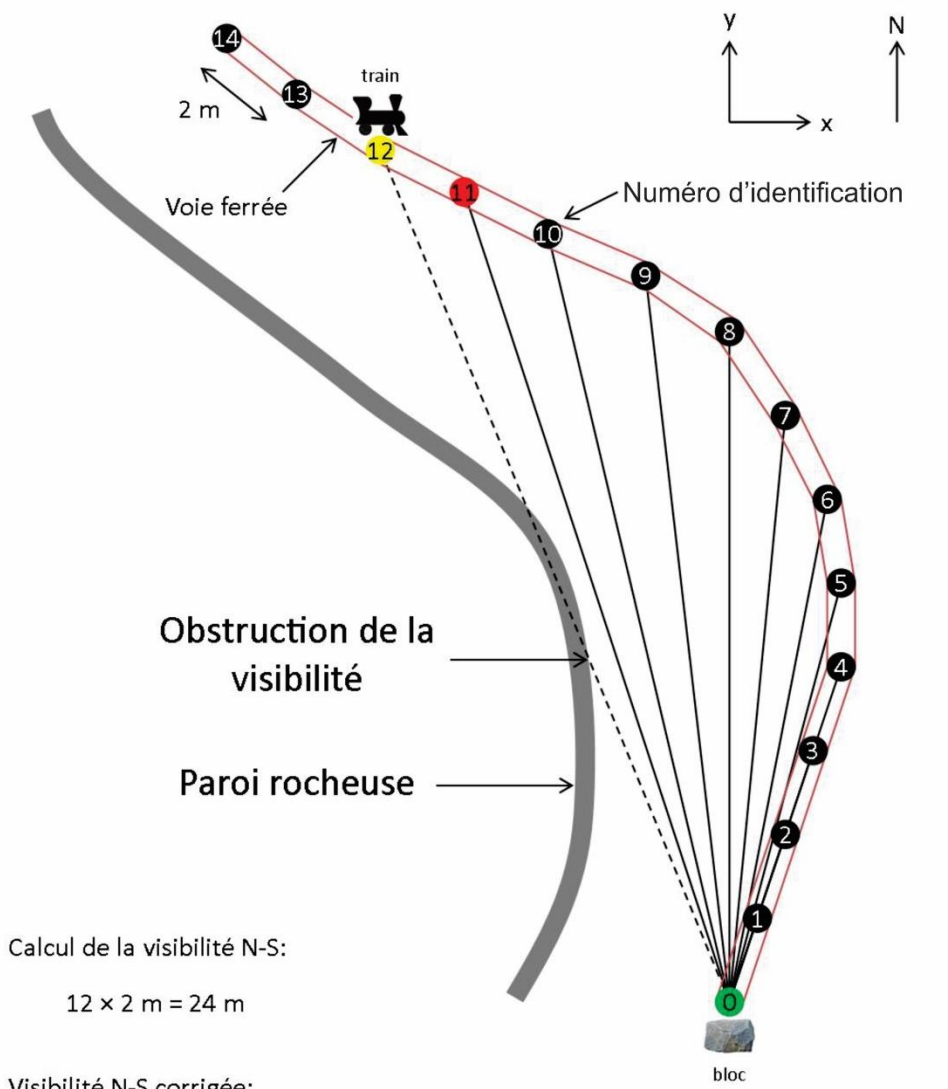


Figure 4.23. Définition et évaluation de volumes pouvant potentiellement basculer au PM 150. a) et b) Photographies du bas de la paroi, prises de la voie ferrée, où les trois volumes sont indiqués en bleu, brun et vert. c) Modèle photogrammétrique réalisé à partir des photographies prises du drone. d) Gros plan du secteur encadré en c) avec les plans ajustés aux fractures ouvertes. L'espace ainsi formé est rempli de prismes rectangulaires verts qui sont générés pour calculer le volume. e) Modèle photogrammétrique avec les plans ajustés aux fractures lors de l'opération de calcul d'un volume. Le nuage photogrammétrique est peu détaillé dans la partie sommitale du plan violet ce qui crée de l'incertitude par rapport à la définition géométrique du bloc rocheux.



Calcul de la visibilité N-S:

$$12 \times 2 \text{ m} = 24 \text{ m}$$

Visibilité N-S corrigée:

$$24 \text{ m} - 2 \text{ m} = 22 \text{ m}$$

Légende:

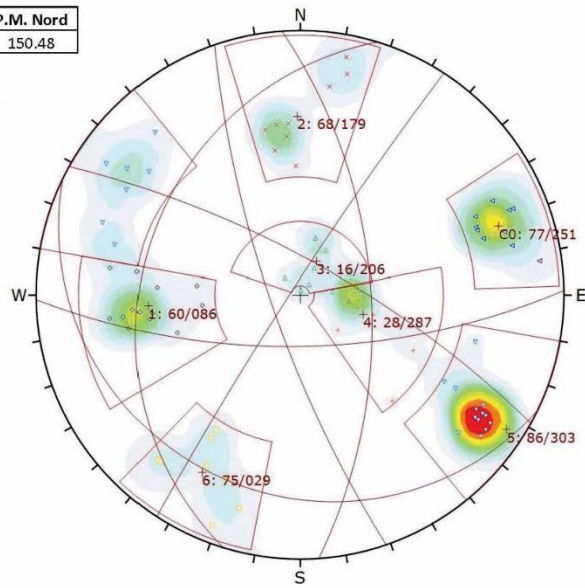
- Points du tracé ferroviaire espacés à un intervalle de 2 m
- Point de départ à partir duquel la visibilité est déterminée (position du bloc)
- Premier point non visible situé derrière l'obstacle (position du train)
- Dernier point visible servant à déterminer la visibilité

Figure 4.24. Schéma de l'évaluation numérique de la distance de visibilité maximale

J12—6020-6021 — Pr. A

P.M. Sud	P.M. Nord
150.3	150.48

Certitude
Incertain



nb.	CO	espace	persist	1	espacem.	persist	2	espace	persis	3	espace	persis	4	espace	persis
6/7	77/251	600-2000mm	3-10m	60/086	600-2000mm	> 20m	68/179	?	1-3m	16/206	>6000mm	1-3m	28/287	>6000mm	1-3m

5	espace	persis	6	espace	persis	7	espace	persis
86/303	>6000mm	3-10m	75/029	?	1-3m			

Talus	Analyse cinétique		
W-Talus	W-Planaire	W-Dièdre	W-Basculement
85/080	1, 5(marginal)	2-6, 1-5, 1-6, 5-6, 1-2	CO, 5(marginal)

Figure 4.25. Exemple de fiche remplie avant le terrain indiquant les résultats de l'analyse structurale avec Coltop et des tests cinématiques.

Secteur: GPS: P.M.: Température: Date: Nom:

Inscrire les éléments et photos associées. Compléter/commenter le schéma si nécessaire.

Légende

Types de ruptures		Structures impliquées
<input type="radio"/> --	Aucune rupture observée	
<input type="radio"/> Rr	Non contrôlée structurellement	
<input type="radio"/> Re	Par érosion différentielle	
<input type="radio"/> Rp	Planaire	
<input type="radio"/> Rd	Dièdre	
<input type="radio"/> Rt1	Basculement d'un bloc seul	
<input type="radio"/> Rtf	Basculement flexural	
<input type="radio"/> Rts	Basculement en série de blocs	

Structure	Géométrie		
<input type="radio"/> So	Fractures ouvertes	<input type="radio"/> Gs	Surplombs
<input type="radio"/> Sr	Racines dans les fractures	<input type="radio"/> Gcx	Convexe
<input type="radio"/> Sw	Venue d'eau	<input type="radio"/> Gcv	Concave
		<input type="radio"/> GI	Lisse
		<input type="radio"/> Gir	Irrégulière

Mesures de stabilisation et de protection

	Appréciation générale			% couvert	
	Bonne	moyenne	faible		
<input type="radio"/> Pbl	Boulonnage	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<input type="radio"/> Pgr	Grillage	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<input type="radio"/> Pfi	Filet	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<input type="radio"/> Pmu	Muret	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<input type="radio"/> Pbm	Berme	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<input type="radio"/> Pfo	Fossé	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Éléments libres

<input type="radio"/> Eb	Blocs
<input type="radio"/> Et	Troncs

Conditions climatiques et morphologie

Susceptible aux eaux de surface

S'englace en hiver

Couloirs d'avalanches

Couloirs de coulées de débris

Commentaires

Historique de ruptures et cicatrices observées

Historique de ruptures _____

Volumes impliqués _____

	Inconnue	faible	moyenne	forte
Fréquence des ruptures	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 4.26. Exemple de fiche de terrain.

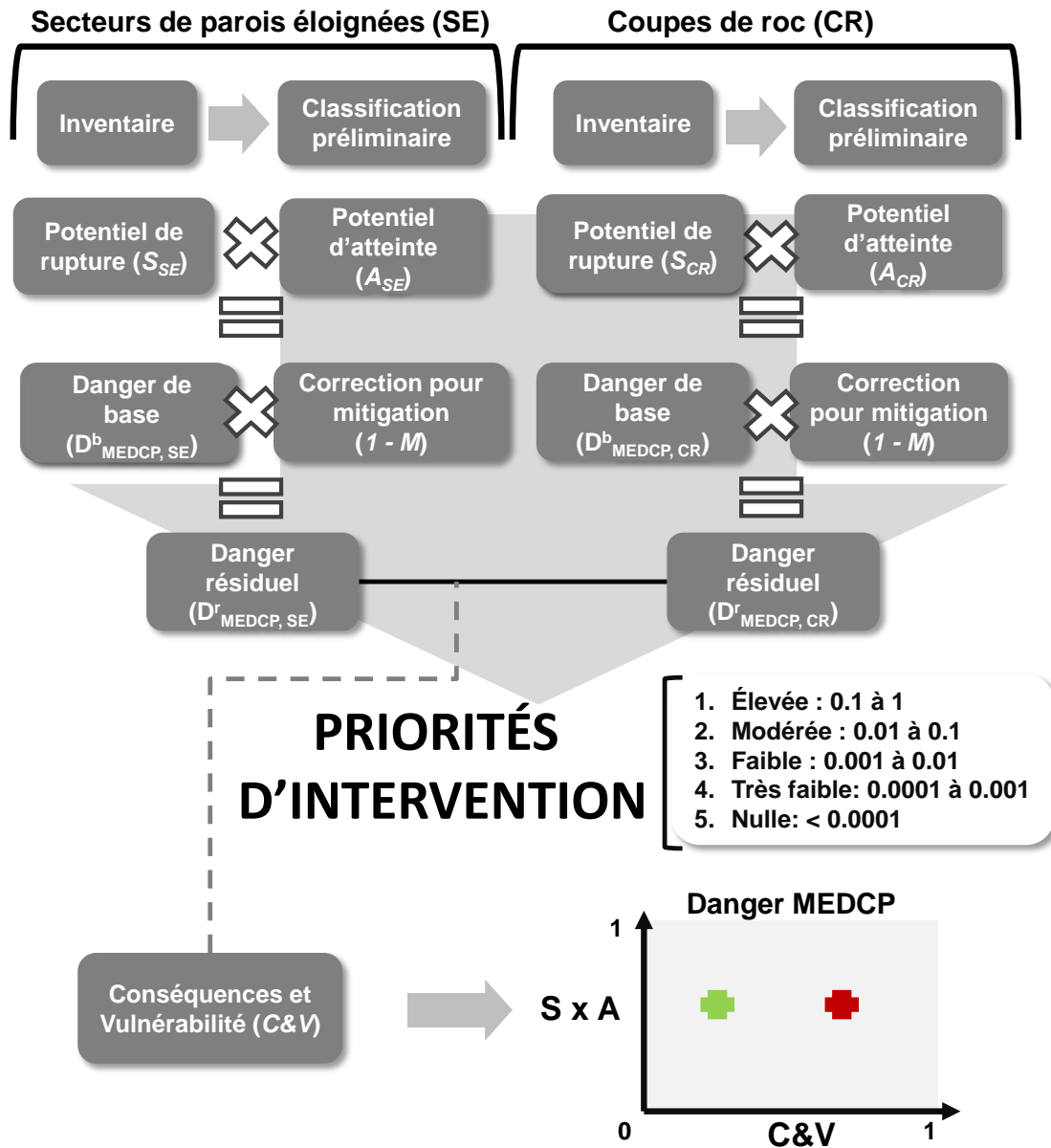


Figure 4.27. Approche générale menant à l'évaluation du D_{MEDCP} et leur catégorisation en niveau de priorité. Les secteurs de parois éloignées et les coupes de roc sont évalués en utilisant des techniques différentes, mais les paramètres évalués et l'équation générale du MEDCP est la même pour les deux types de parois. Les conséquences et la vulnérabilité permettent de différencier des parois d'une même catégorie de priorité.

Secteurs de parois éloignées (SE)

Analyse régionale sur tout le territoire couvert par le MNT

Inventaire

- Reconnaissance automatique des crêtes de parois rocheuses (MNT)
- Simulations 3D de chute de pierres systématiques sur tout le territoire couvert par le MNT (Rockyfor3D; MNT)

Classification préliminaire

- Regroupement des crêtes pour créer les secteurs de parois éloignées (MNT, photos aériennes, résultats simulations)
- Planification des acquisitions de photographies par hélico et drone

Analyse réalisée secteurs par secteurs de parois éloignées

Potentiel de rupture (S_{SE})

- Recherche de signes de rupture (LAS brutes)
- Évaluation visuelle de critères et calcul de Y_{SE} (Photos aériennes, par hélicoptère et drone, MNT)
- Densité des sources ($F_{DENSITE}$) identifiées lors de la reconnaissance des secteurs

$$Y_{SE} = \left[\frac{(P_A + P_B + P_D) \times 0.2 + P_C \times 0.4}{81} \right]$$

$$S_{SE} = Y_{SE} \times F_{DENSITE}$$

Potentiel d'atteinte (A_{SE})

- Simulations de trajectoires 3D (Rockyfor3D; MNT)

$$A_{SE} = \frac{\text{nombre de trajectoires simulées atteignant la voie}}{\text{nombre de trajectoires simulées}}$$

$$\text{Danger résiduel } (D_{MEDCP, SE}^r) = D_{MEDCP}^b \times (1 - M)$$

$$\text{Danger de base } (D_{MEDCP, SE}^b)$$

$$\text{Correction pour mitigation } (1 - M)$$

PRIORITÉS D'INTERVENTION

1. Élevée : 0.1 à 1
2. Modérée : 0.01 à 0.1
3. Faible : 0.001 à 0.01
4. Très faible: 0.0001 à 0.001
5. Nulle: < 0.0001

Figure 4.28. Illustration des étapes du MEDCP menant à l'évaluation des secteurs de parois éloignées. Entre parenthèses, les données, et parfois les logiciels, nécessaires à l'analyse sont indiquées. MNT : modèle numérique de terrain; MLS : nuages de points obtenus de scans laser mobiles sur rail; LAS : nuages de points obtenus de scans laser aéroportés.

Coupes de roc (CR)

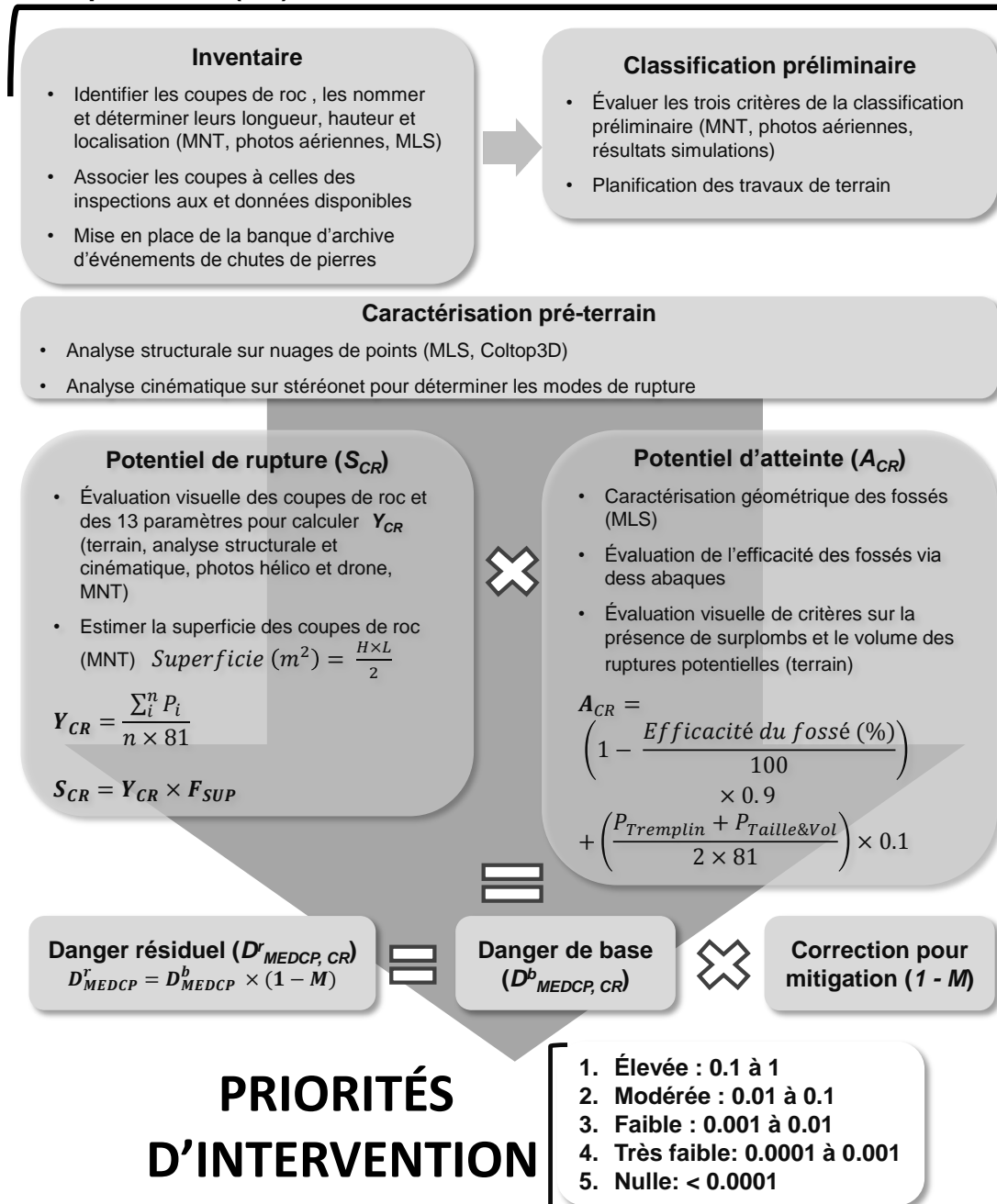


Figure 4.29. Illustration des étapes du MEDCP menant à l'évaluation des coupes de roc. Entre parenthèses, les données, et parfois les logiciels, nécessaires à l'analyse sont indiquées. MNT : modèle numérique de terrain; MLS : nuages de points obtenus de scans laser mobiles sur rail.

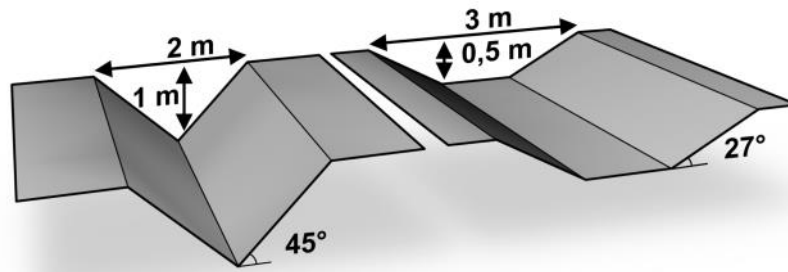


Figure 4.30. Différences d'une même géométrie de fossé mais avec un MNT avec des pixels de 1 m de côté et l'un avec des pixels de 0,5 m de côté.

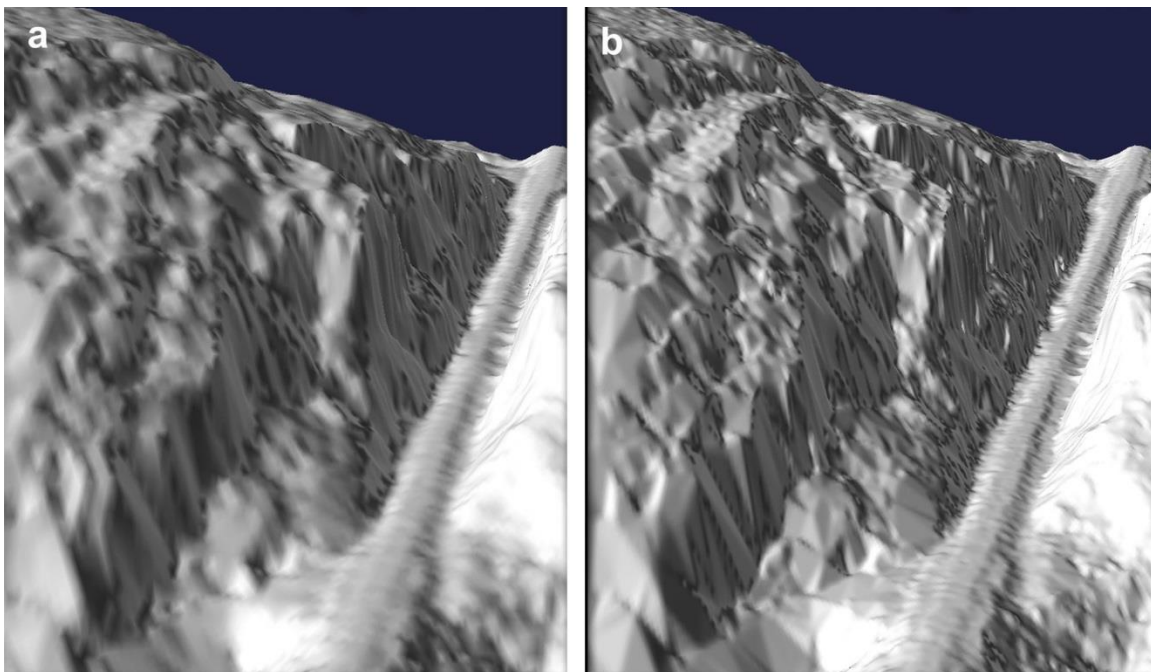


Figure 4.31. Comparaison de l'effet de la largeur du maillage. En a) le maillage est au 1 m tandis qu'en b) le maillage est au 0,50 m.

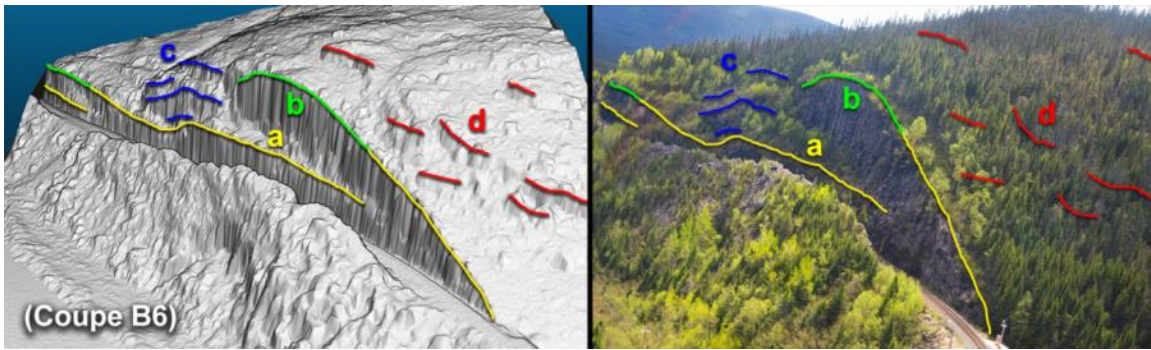


Figure 4.32. Les différents types de sommets d'escarpement qui peuvent être identifiés. En jaune (a), on a les premiers sommets des coupes rencontrés en partant de la voie ferrée. Au-dessus de ceux-ci, on retrouve parfois un second niveau de la coupe et les sommets associés, illustré ici en vert (b). Il y a ensuite les sommets ambigus où il est difficile de déterminer s'ils sont naturels ou simplement le prolongement de la coupe, ici en bleu (c). Finalement, il y a les sommets des falaises naturelles, ici pour de petites falaises en rouge (d).

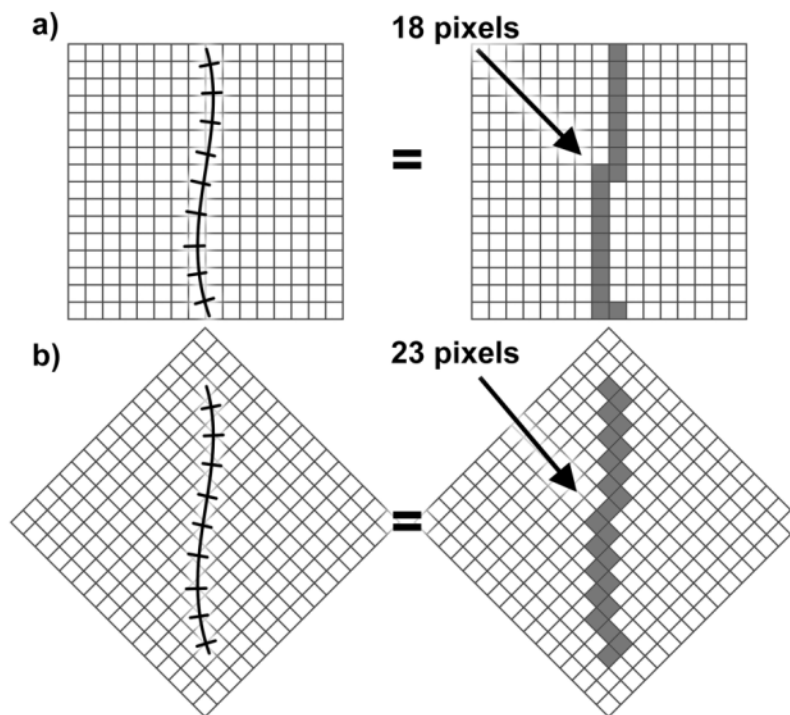


Figure 4.33. Illustration montrant l'effet de l'orientation de la grille (pour la rasterisation) sur le nombre de pixels interceptés par l'élément linéaire.

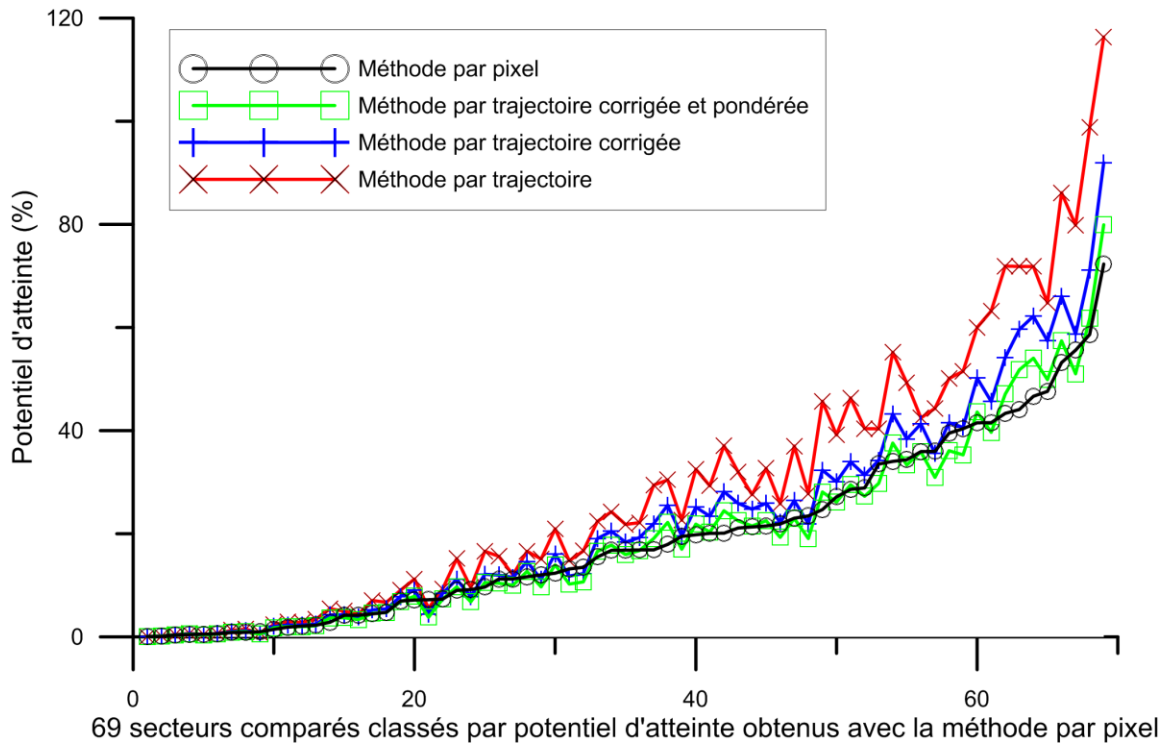


Figure 4.34. Comparaison des pourcentages d'atteinte obtenus avec la méthode par pixel et la méthode par trajectoire pour les 69 secteurs comparables (les cinq tunnels sont retirés), ici avec les valeurs classées par pourcentage d'atteinte croissant de la méthode par pixel. Les résultats de ceux-ci ont été utilisés pour établir la pondération à appliquer pour que la méthode par trajectoire approche la méthode par pixel.

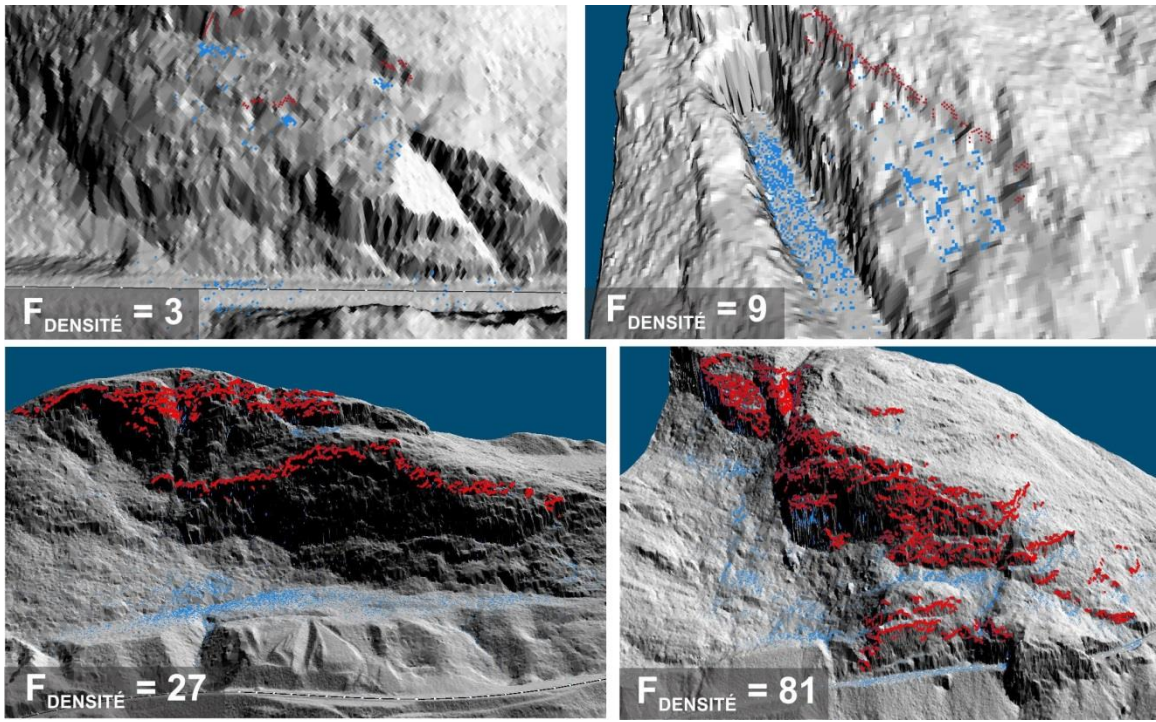


Figure 4.35 Exemple de secteurs avec des pointages du paramètres $F_{\text{DENSITÉ}}$ de 3, 9, 27 et 81.

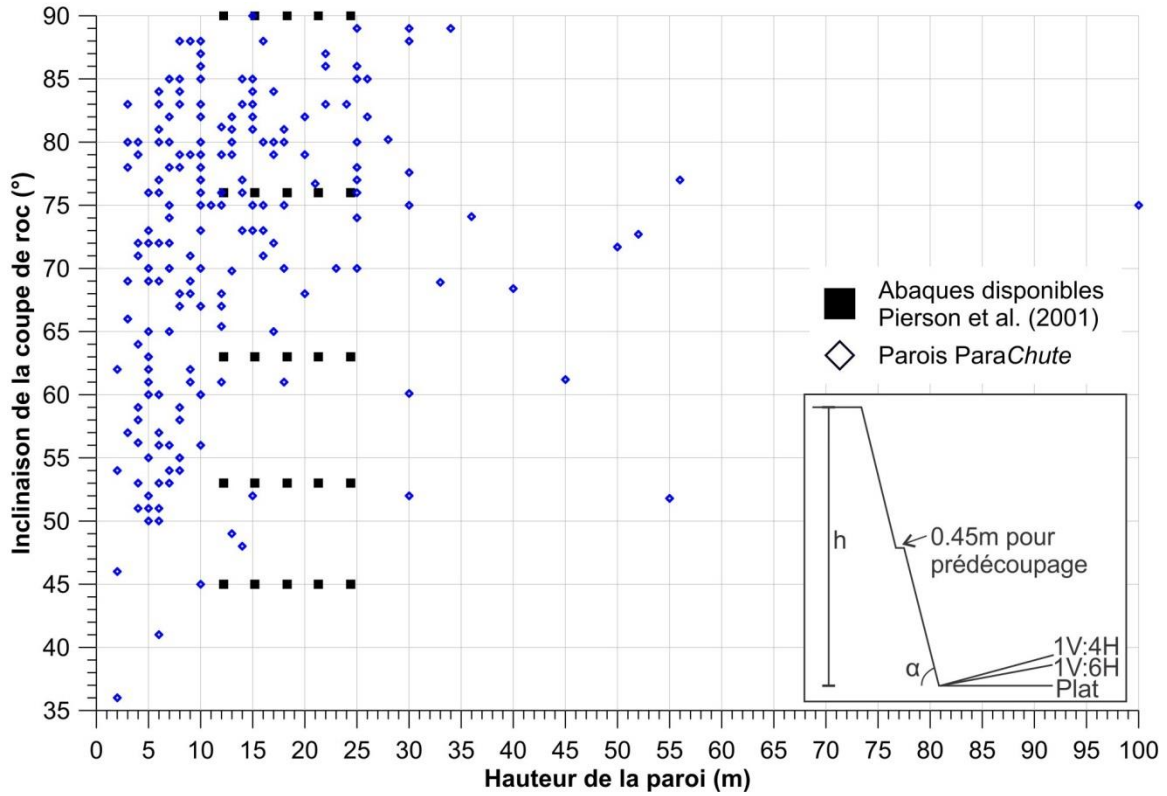


Figure 4.36. Combinaisons d'inclinaison et de hauteur de parois pour lesquelles un abaque de l'efficacité des fossés est disponible dans Pierson et al. (2001) et distribution de coupes de roc du projet ParaChute. Les abaques sont disponibles pour les fossés de trois géométries : fossé plat (absence de fossé), 1V:6H et 1V:4H.

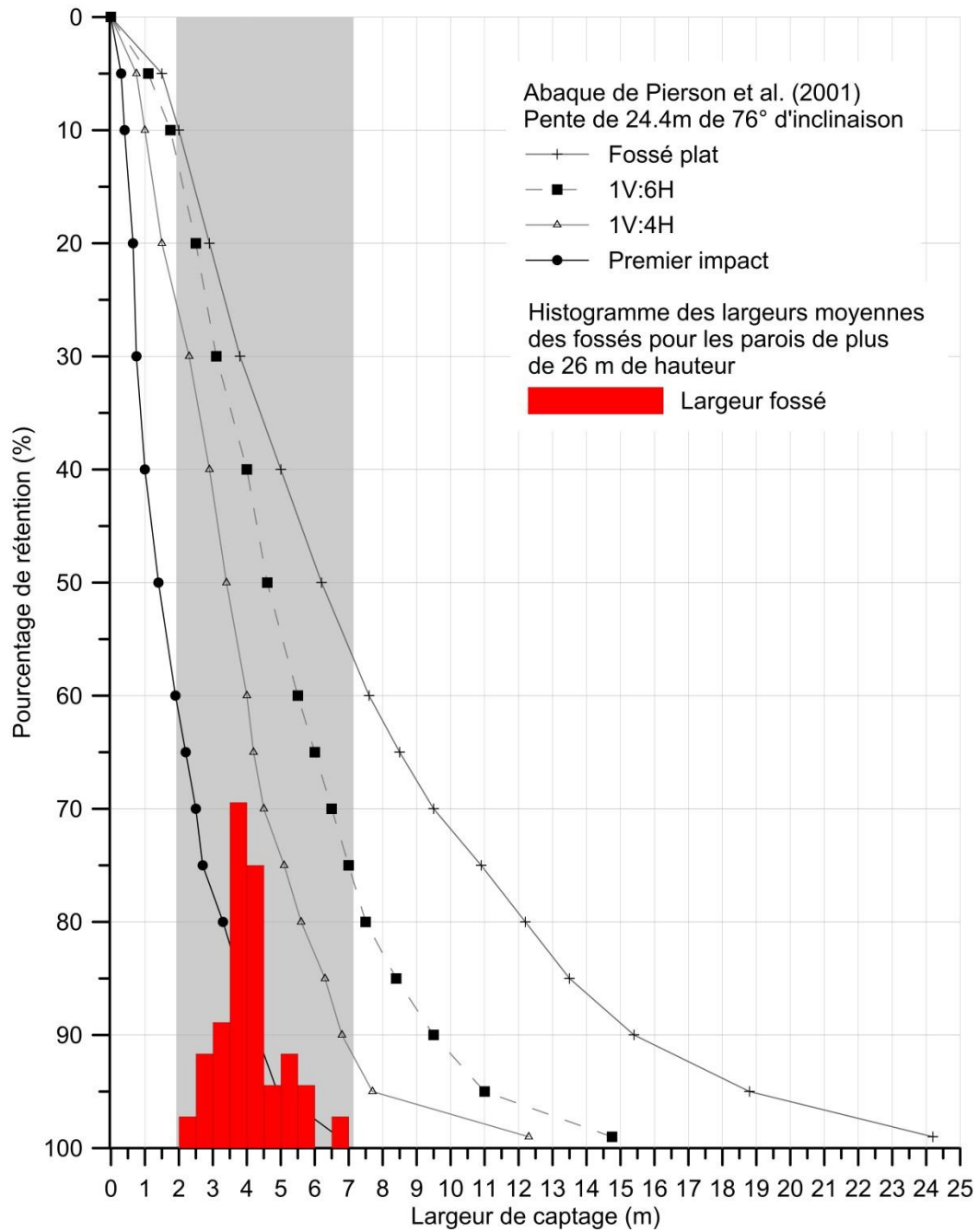


Figure 4.37. Reproduction d'un des abaques de Pierson et al. (2001) pour une coupe de roc de 24.4 m de hauteur et inclinée à 76°. L'histogramme présente les largeurs de fossés mesurées pour les parois de plus de 26 m de haut. La fréquence relative de l'histogramme exprimée en % correspond aux valeurs de l'axe des y, mais inversées, e.g.: 90=10%, 95=5%.

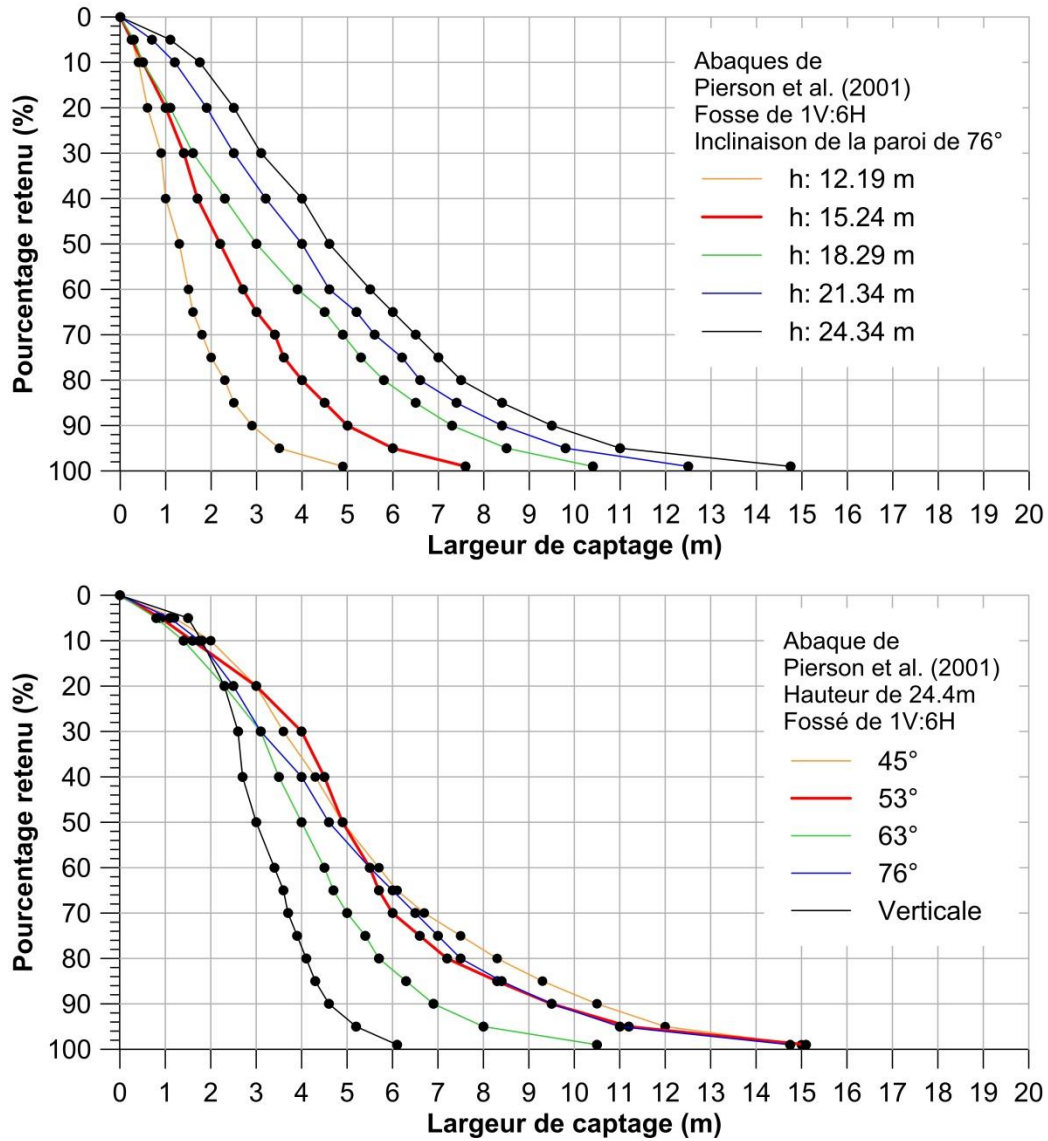


Figure 4.38. Reproductions des abaques de Pierson et al. (2001) mettant en relation le pourcentage de blocs retenus dans un fossé en fonction de sa largeur. a) Les courbes des parois inclinées à 76° pour un fossé de 1V:6H sont rapportées sur un même graphique, afin de montrer l'influence de la hauteur de la paroi sur la capacité de rétention. b) Les courbes des parois de 24.4 m de haut avec un fossé de 1V:6H sont représentées sur un même graphique pour montrer l'influence de l'inclinaison de la paroi sur la capacité de rétention.

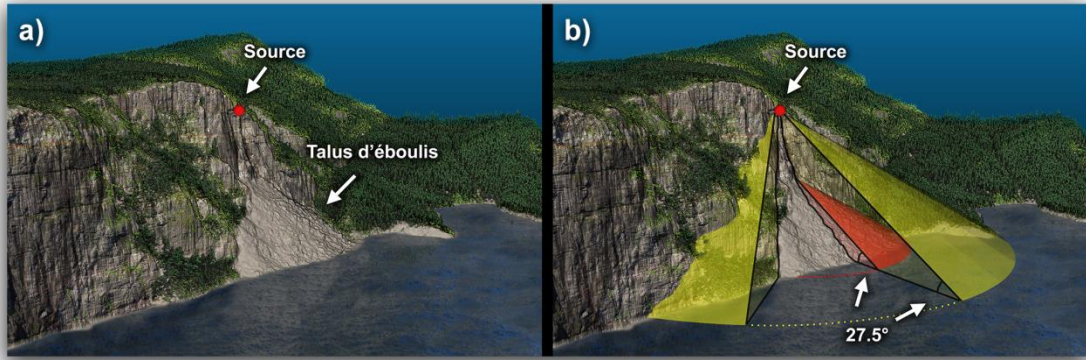


Figure 4.39. Définition de la ligne d'énergie formant un cône pouvant être atteint par des chutes de pierres se détachant de la paroi rocheuse (tirée de Noël 2016).

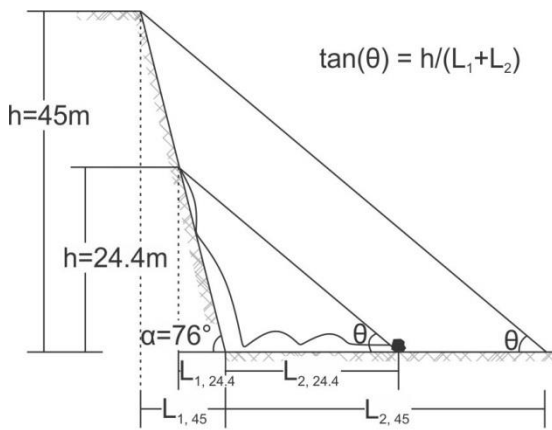


Figure 4.40. Calcul de l'angle de la ligne d'énergie reliant le haut d'une coupe au bloc s'étant le plus propagé. Cet exemple est fait pour un fossé plat. Les paramètres de l'équation 4.17 y sont représentés (h , L_1 , L_2 et θ).

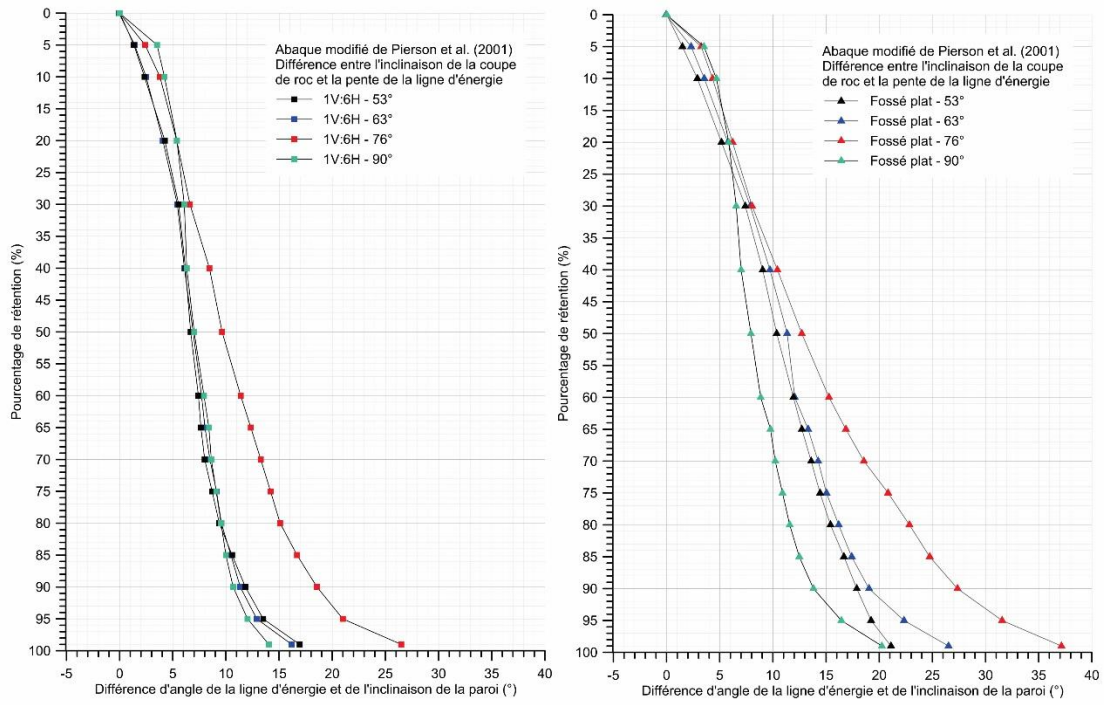


Figure 4.41. Abaqués modifiés de Pierson et al. (2001) a) fosse de captage de 1V:6H et b) fossé plat.

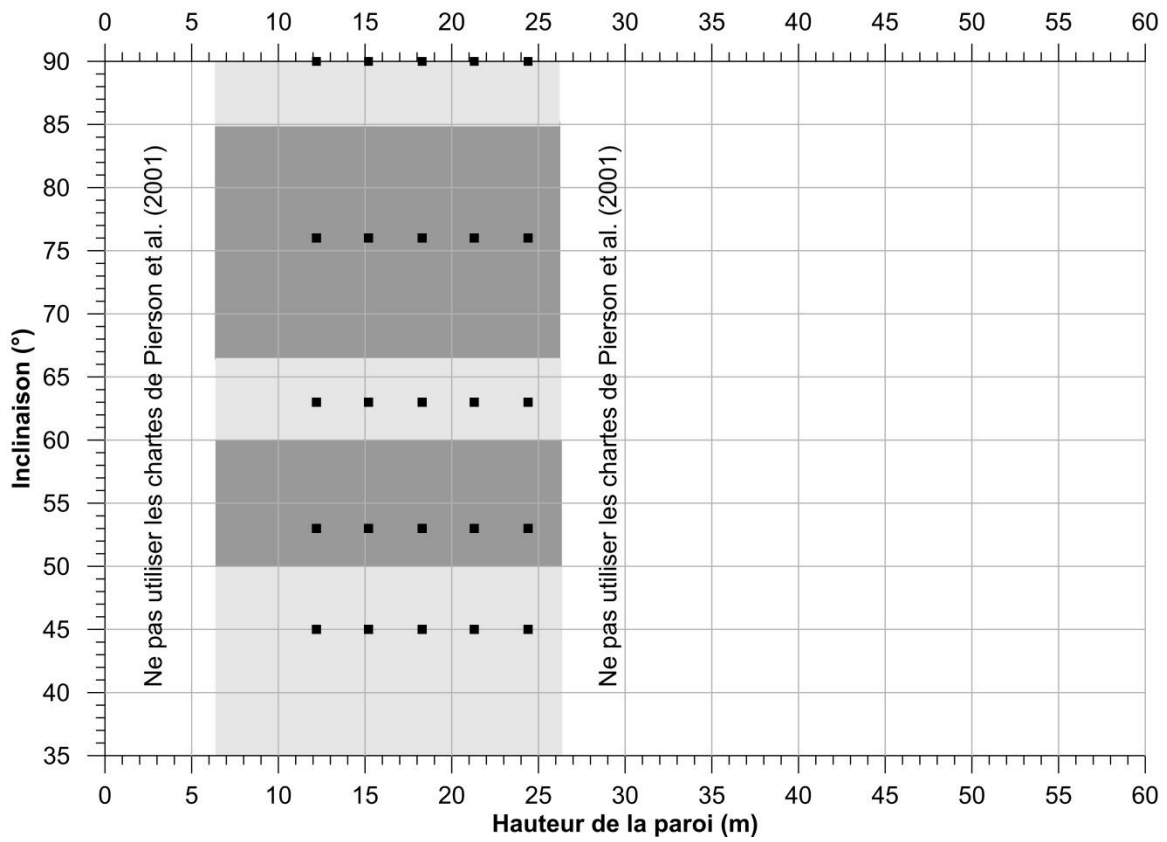


Figure 4.42. Matrice de décision du choix de l'abaque de Pierson et al. (2001) à utiliser.

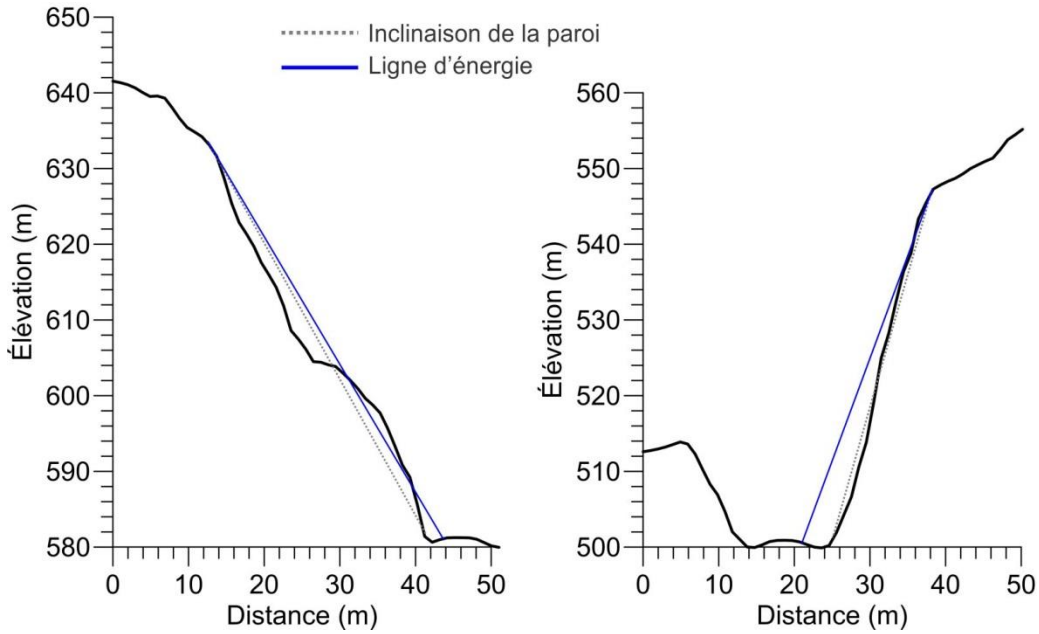


Figure 4.43 Exemple de profils de parois rocheuses de 26 m de haut et plus où l'inclinaison générale et celle de la ligne d'énergie sont calculées.

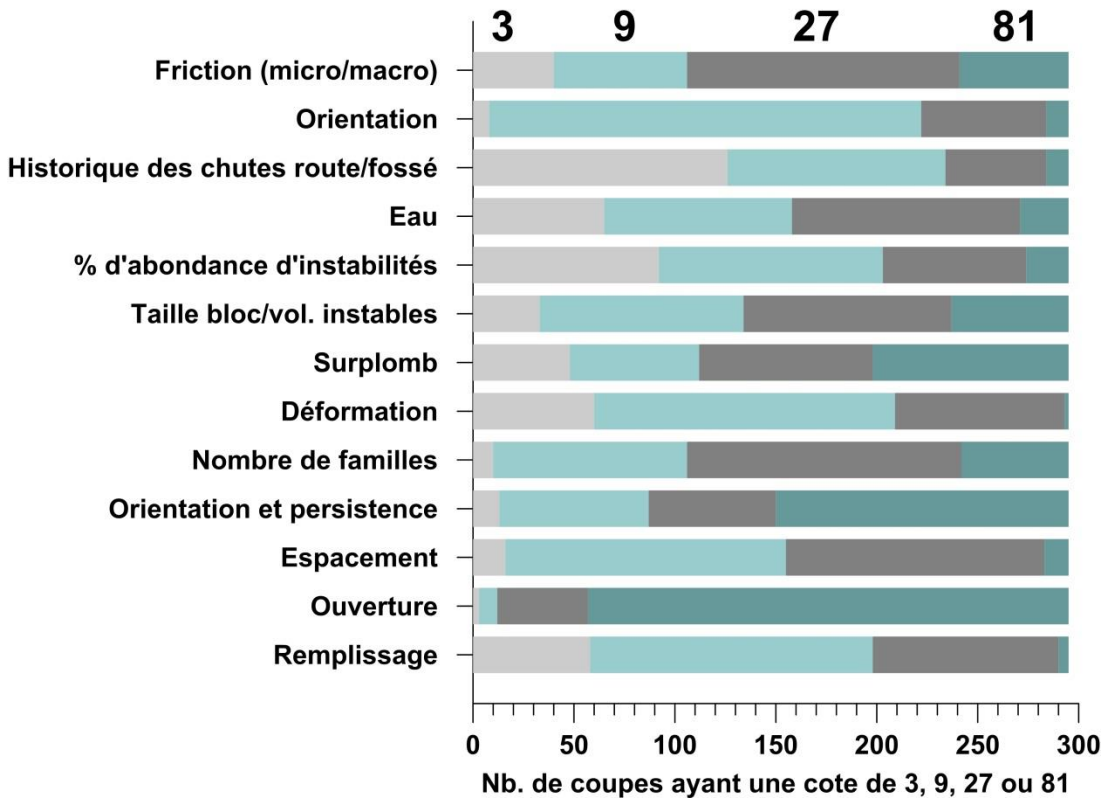


Figure 4.44. Distribution du pointage de chacun des paramètres de la fiche MTQ saisie pour 300 coupes de roc.

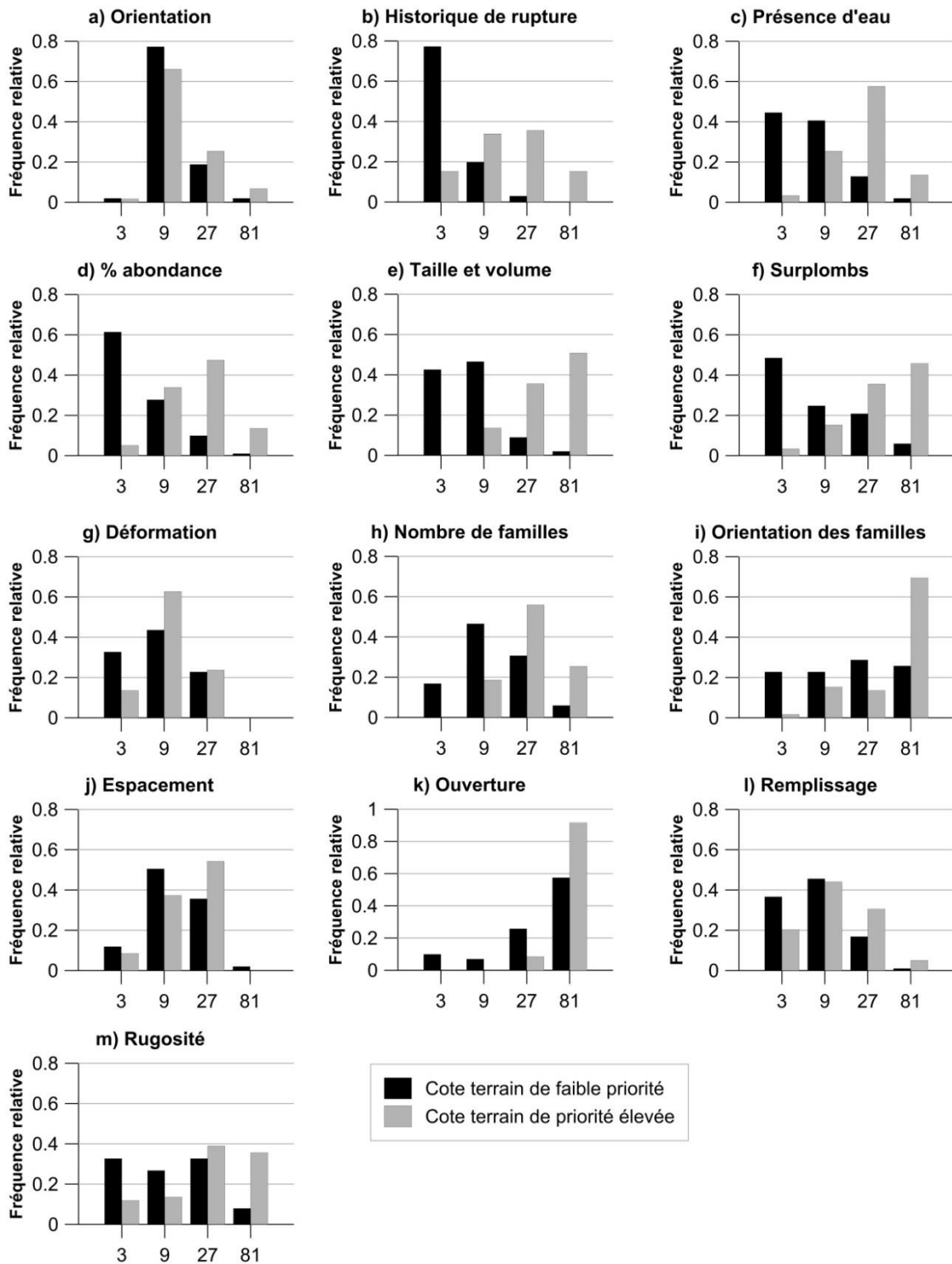


Figure 4.45. Histogrammes des pointages attribués aux treize paramètres de la fiche MTQ pour les coupes de roc avec des cotes terrain de 1 à 5 (histogrammes de gauche) et de 11 à 13 (histogrammes de droite). Si le paramètre reflète bien la susceptibilité à la rupture d'une coupe de roc, il devrait y avoir une proportion plus importante de 27 et de 81 dans l'histogramme de gauche que dans celui de droite.

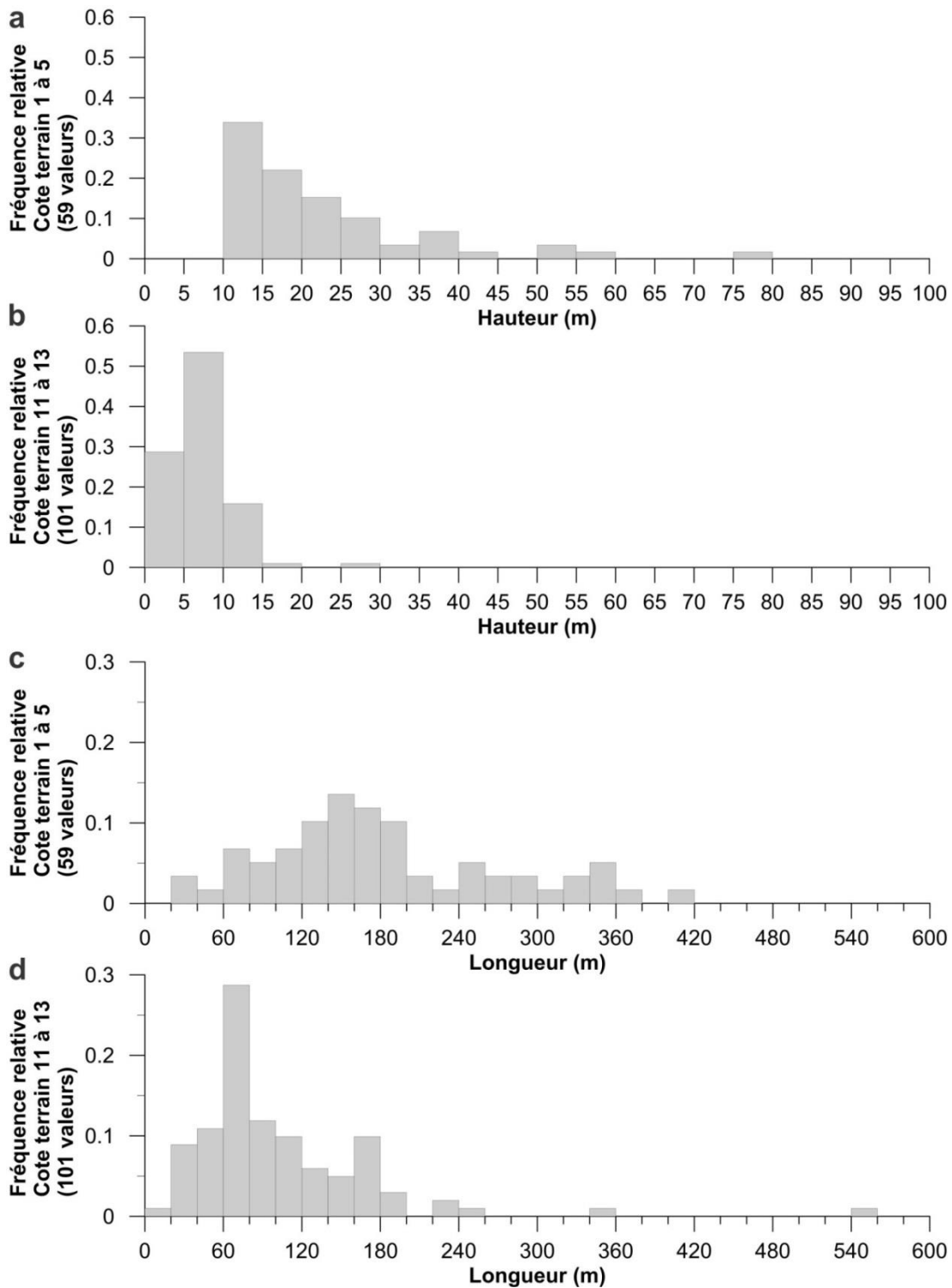


Figure 4.46. Hauteurs de coupes ayant reçues des cote terrain de 1 à 5 (a) et de 11 à 13 (b). Aucune coupe qui fait moins de 10 m de haut s'est vu attribuée une cote terrain de plus de 5. Les coupes jugées les moins prioritaires (cotes terrain de 11 à 13) sont en général moins hautes. Celles de 17 m et de 30 m de haut sur l'histogramme b, sont deux parois situées relativement loin de la voie ferrée, donc avec des probabilités d'atteinte faible et c'est pour cette raison qu'elles sont cotées de 11 à 13. Les histogrammes en c et d présentent les longueurs des mêmes coupes de roc

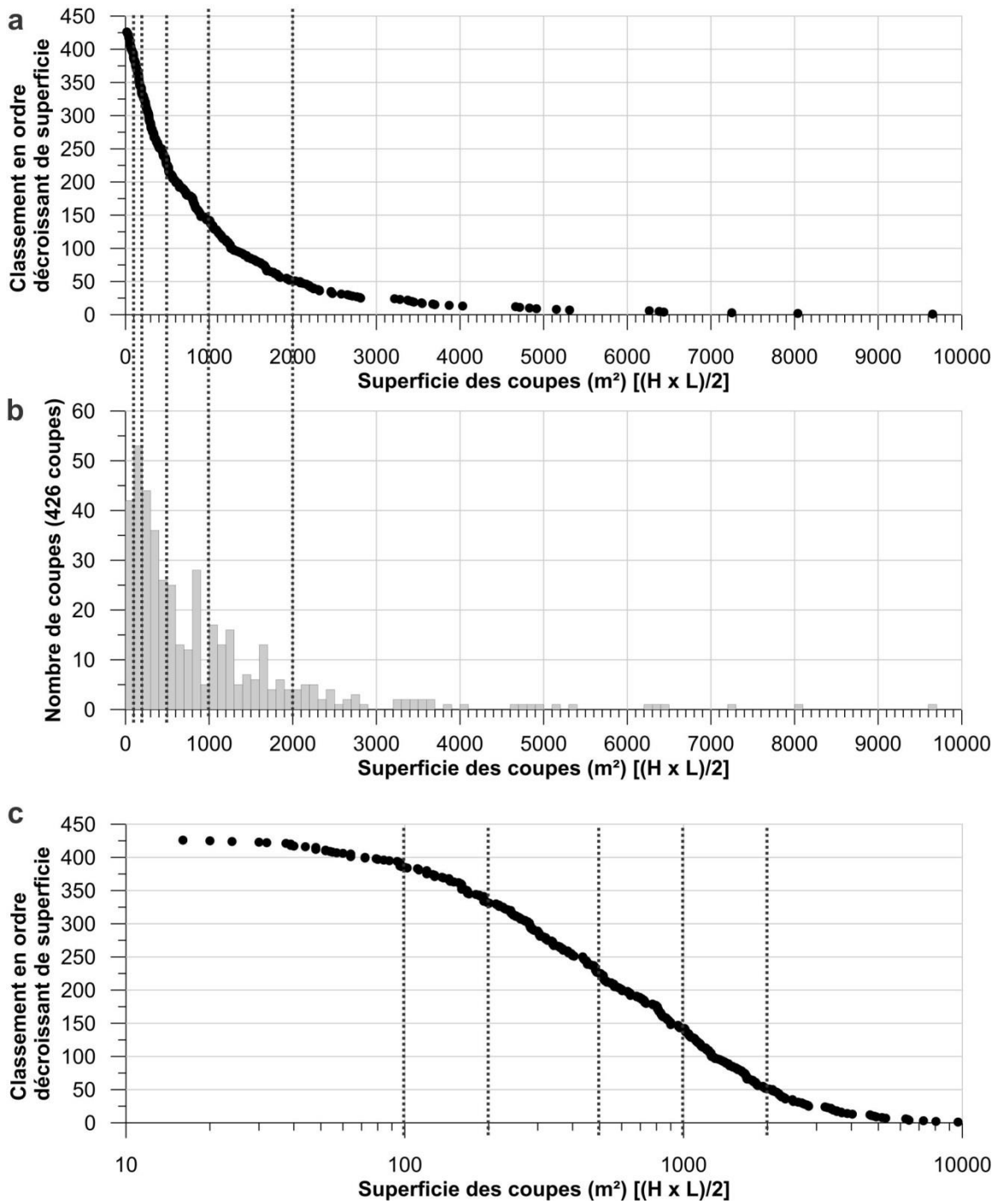


Figure 4.47. Distribution des superficies des coupes de roc évaluées comme étant l'aire d'un triangle en utilisant la hauteur maximale et la longueur des parois mesurées à partir du MNT. Les limites des catégories de facteurs de pondérations (F_{SUP}) sont indiquées par les lignes verticales pointillées.

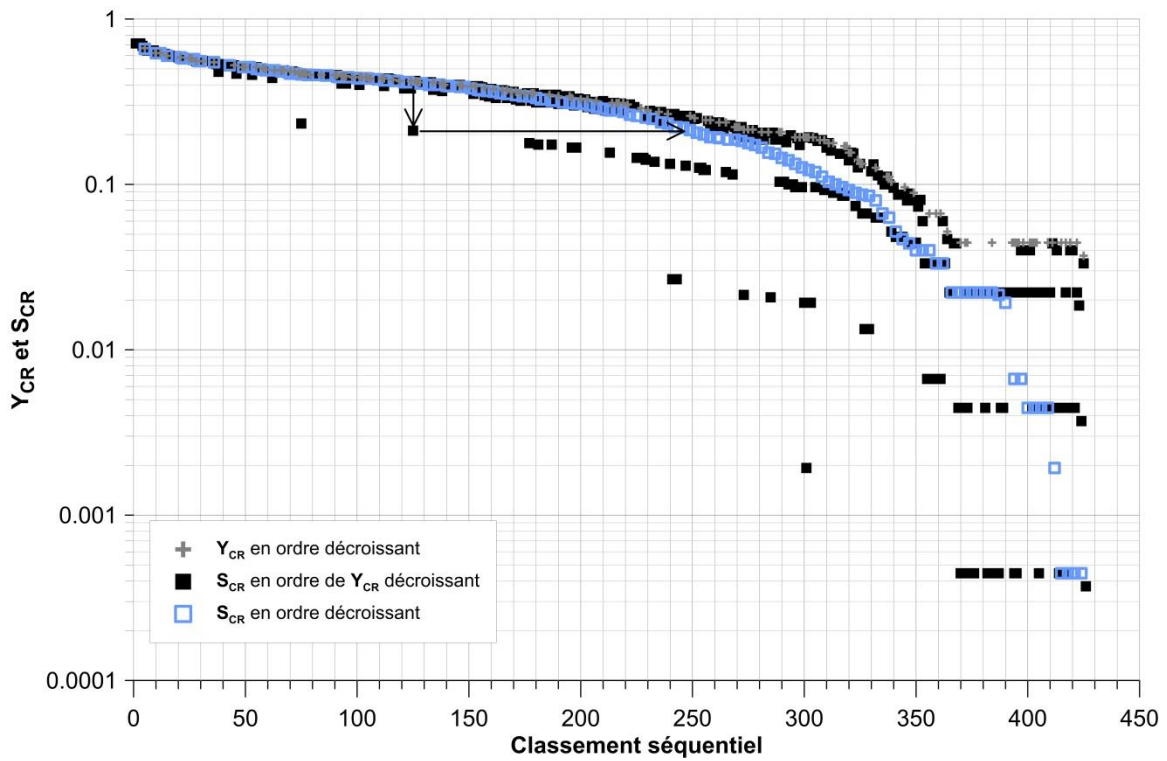


Figure 4.48 Démonstration de l'effet de F_{SUP} sur la valeur du potentiel de rupture (S_{CR}).

5. Structure de la base de données

5.1. Hiérarchie

La base de données comprend des fichiers non-géoréférencés et des informations contenues dans des fichiers géoréférencés qui doivent être consultés via un SIG. Cette section fait une vue d'ensemble rapide de la structure de la base de données et de son contenu. Une version détaillée sera remise avec la base de données elle-même, afin que les futurs utilisateurs puissent s'y retrouver facilement.

5.2. Données non-géoréférencées

Les données sont divisées dans deux répertoires, le premier est celui des coupes de roc et le deuxième est celui des parois éloignées. Dans le dossier des coupes de roc, l'information est classée par canton (A à K) (selon les noms utilisés par ArcelorMittal), puis par coupe. Chaque répertoire associé à une coupe est composé des sous-répertoires décrits au tableau 5.1. Ils contiennent les stéréonets présentant les résultats de l'analyse structurale et des tests cinématiques, les photographies et vidéos et s'il y a lieu, les informations disponibles sur des chutes de pierres s'étant produites à cette coupe de roc. Les secteurs de parois éloignées contiennent les photographies et vidéos et pour certains secteurs, d'autres informations telles que des données structurales, des scans laser terrestres ou des modèles photogrammétriques.

Tableau 5-1. Structure de la base de données associée aux parois rocheuses et aux secteurs de parois éloignées.

Répertoire principal	Identifiant des parois	Noms des sous-répertoires, tel que dans la base de données	Description du contenu
Section x	xy_PM_zz.zz	Coltop 3D	Fichiers .3dp et .c3d pour visualisation et analyse de nuages de points dans le logiciel Coltop 3D
x : 1 ^{ère} lettre du nom du canton	x : lettre identifiant le canton y : identifiant numérique attribué du sud vers le nord, e.g. la coupe la plus au sud du canton Able est A1 zz.zz : point milliaire du côté sud de la coupe, selon les points miliaires, calculés par le LERN, qui peuvent différer (de 30 à 300m) de ceux sur le terrain.	Dips	Stéréonet de l'analyse structurale dans le logiciel Dips de Rocscience
		Figures_Localisation	Figures créées pour cette coupe. Pour le moment, ce dossier est vide pour la majorité des coupes
		Photogrammetrie	Modèles photogrammétriques sous divers formats, dont les fichiers intermédiaires générés lors de la création du modèle
		Photos_photogrammétrie	Photographies prises sur le terrain avec un patron systématique et avec du recouvrement entre les photos pour la réalisation de modèles photogrammétriques. Elles sont prises avec l'appareil Nikon.
		Archive	Image, description, rapport, courriel en lien avec des événements de chutes de pierres antérieures.
		Photos_terrain	Photographies prises avec divers appareils pour montrer certaines caractéristiques de la coupe. Ces photos peuvent montrer le fossé, une fissure, un écoulement d'eau, etc.
		Structure_terrain	Fichiers Dips et Coltop 3D

5.3. Données géoréférencées

Ces informations doivent être visualisées dans un environnement SIG. Elles incluent la liste d'information suivante :

- Modèle numérique de terrain généré à partir des scans laser aéroportés;
- Produits dérivés du MNT (inclinaison des pixels, orientations des pixels, relief ombragé);
- Produits de la carte morphostructurale (motifs et drainage);
- Orthophotographies 2005 et 2010;
- Cartes de dépôts de surface (MRN 2004);
- Carte géologique (MRN);
- Index des tuiles des scans laser aéroportés et mobile;
- Informations sur la voie ferrée :
 - Point milliaire (généré par le LERN et des points GPS fournis par Arcelor);
 - Délimitation des cantons;
 - Positions des camps temporaires et permanents;
 - Limite de vitesse;
 - Position des tunnels;
- Données et résultats du MEDCP appliqué aux secteurs de parois éloignées;
- Données et résultats du MEDCP appliqué aux coupes de roc :
 - Dimensions des fossés;
 - Orientation et inclinaison des coupes de roc;
 - Pointage de la fiche MTQ;
 - Évaluation de l'efficacité des fossés;
 - Classification préliminaire;
 - Hauteur et longueur;
 - Point milliaire correspondant au début et à la fin des coupes de roc;
 - Coordonnées GPS;
- Trajectométries systématiques appliquées à tout le territoire :
 - Nombre de trajectoire par pixels;
 - Localisation des sources;
 - Rn et Rt;
 - Nombre de passages aux niveaux de la voie ferrée;
- Trajectoire par secteurs de parois éloignées :
 - Nombre de trajectoires par pixel;
 - Localisation des sources;
 - Position d'arrêt des blocs;
 - Rn et Rt;
- Distance de visibilité calculée avec le script qui utilise le MNT sans végétation :
 - Résultat par coupes de roc;
 - Résultat pour tout le tracé de la voie ferrée située au sud du camp Love;
- Banque d'événements de chutes de pierres;
- Cote attribuées aux parois rocheuses lors des inspections de 1973, 1989, 1998, 2004 et 2009;
- Localisation des photographies acquises lors des vols en hélicoptère de juin 2014 et juin 2015.

Banques de données d'événements de mouvements de masse

Les archives du projet *ParaChute* recensent 82 événements de mouvement de masse, dont certains ne sont pas des chutes de roches ou des glissements rocheux (e.g. avalanches de neige, glissements dans le remblai ou coulées de débris). 70 événements sont en lien avec les chutes de pierres ou des glissements rocheux. Le tableau « Archives » dans les annexes numériques rapporte l'ensemble des mouvements de masse recensés, avec les informations pertinentes lorsqu'elles sont disponibles (volume, type de matériel, année, etc.). Certains événements ont des descriptions et localisations très précises, tandis que d'autres sont un peu moins précise.

Les sources d'informations utilisées pour former la base de données influencent la répartition temporelle des événements (fig. 5.1). La source d'information la plus ancienne est un rapport datant de 1973, dans lequel ils mentionnent plusieurs événements de chutes de pierres, d'où le nombre élevé d'événements notés en 1973. La date exacte de la plus part de ces événements n'est pas connue. La deuxième source d'information est constituée de la mémoire des employés côtoyés, majoritairement Pierre Gionet et l'inspecteur, maintenant retraité, Michel Paquet. Les informations fournies par ces personnes étaient parfois documentées de photographies. Enfin, pour les années 2015 et 2016 les événements ont été notés soient des observations terrain faites par l'équipe et majoritairement de compte rendus téléphoniques et courriels faits par Pierre Gionet.

L'historique des événements (fig. 5.2) montre que près du tiers des événements répertoriés ont eu lieu dans le canton Jig, mais que plusieurs événements ont eu lieu dans tous les autres cantons au sud de Jig, sauf Georges et Item. Du point de vue nombre d'événements par mille de voie ferrée, le ratio le plus élevé est dans Jig, avec 1.83 événements par mille de voie ferrée. Dans le canton Baker, ce ratio est de 1.28. Ceci illustre que, même si il y a moins d'événements dans Baker que dans Jig, du fait de la petitesse du canton, le ratio est tout de même élevé. Les ratios pour Dog et Eva sont comparables au ratio pour Baker, soit de 1.14 et 1.08 respectivement. Si l'on compare avec Charles, qui a un nombre plus important d'événements que ces trois derniers cantons, mais qui est aussi beaucoup plus long, le ratio d'événement sur nombre de milles de voie ferrée est de 0.49, soit près de la moitié que le ratio pour Baker.

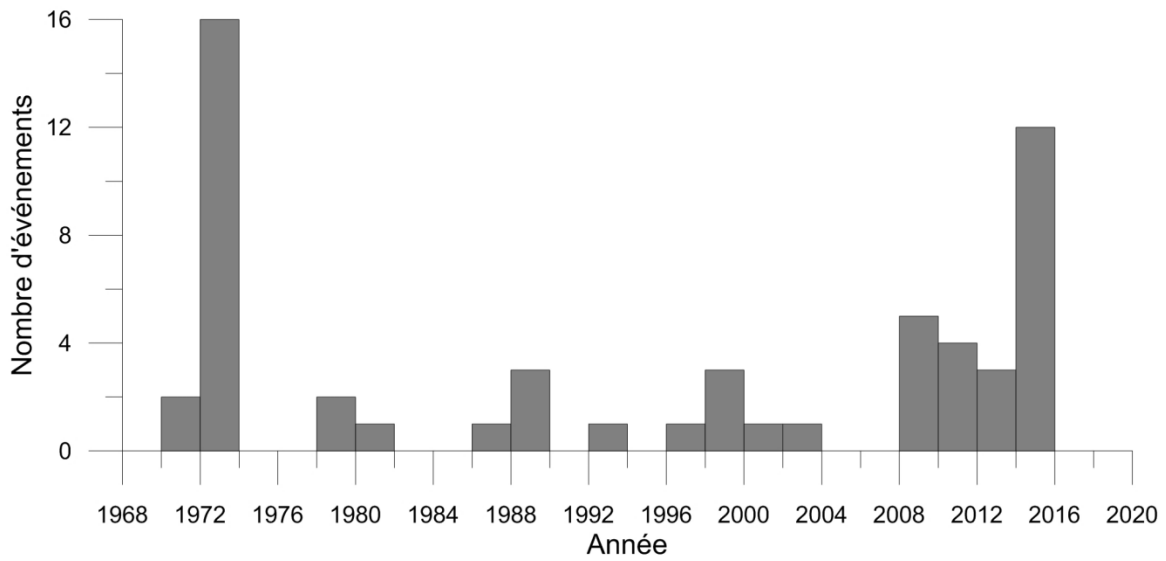


Figure 5.1. Histogramme montrant l'année où des événements ont été notés dans l'historique.

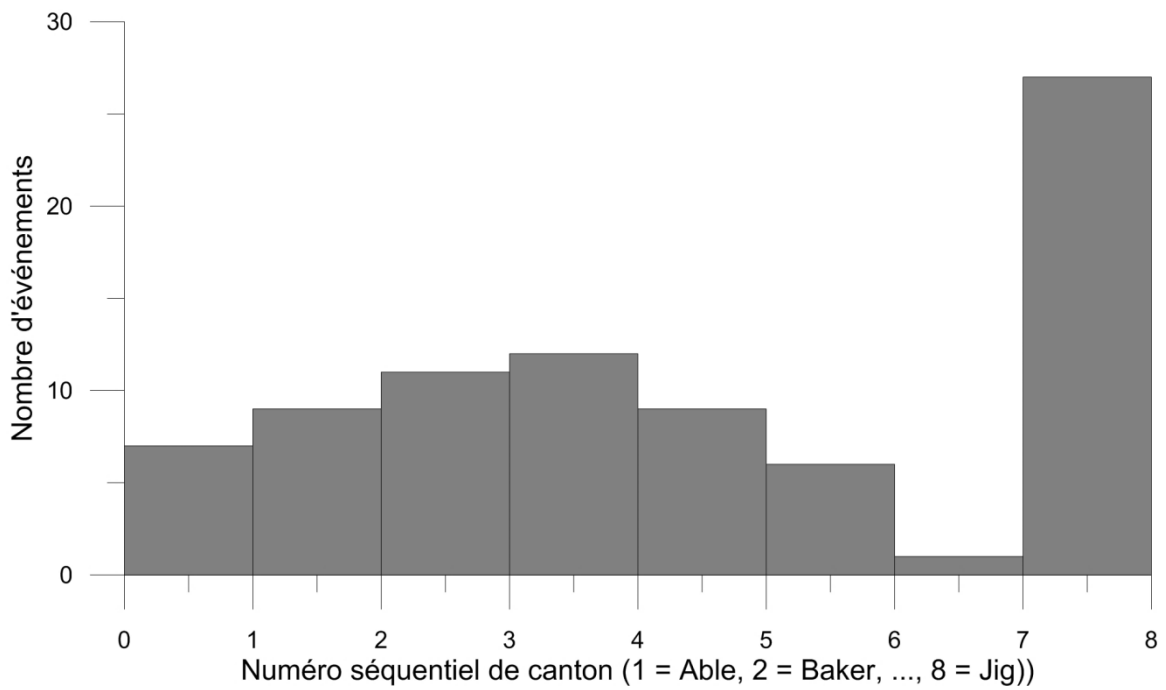


Figure 5.2. Histogramme du nombre d'événements par cantons.

6. Résultats

6.1. Carte morphostructurale

Décrire une carte morphostructurale est un peu comme décrire une carte géologique, i.e. qu'il faut en faire ressortir les éléments principaux et laisser l'usager l'analyser ou encore questionner la banque de données selon ses besoins. Les résultats obtenus de la cartographie morphostructurale sont regroupés en diverses tuiles couvrant l'ensemble du secteur étudié (fig. 6.1) présentés dans un atlas remis dans un document séparé du rapport final (Mayers et al. 2017). Les résultats sont illustrés selon les points suivants : (1) observations et exemples de cartographie morphostructurale et (2) exemples d'application (cartes thématiques) tels que l'identification des secteurs correspondant à des talus d'éboulis, ou encore des secteurs pouvant nourrir d'éventuelles coulées de débris chenalisées.

6.1.1. Exemples de cartographie morphostructurale

Afin d'illustrer la cartographie morphostructurale du secteur, certains résultats sont utilisés afin de faire ressortir les éléments suivants : (1) le contrôle de la morphologie du substratum rocheux dans certains secteurs, (2) la signature d'écoulement glaciaires, (3) la mise en place de dépôts glaciaires (till), et (4) la mise en place de grands ensembles fluvioglaciaires lors de la déglaciation, lesquels sont ultérieurement érodés en diverses terrasses fluvioglaciaires.

Morphologie rocheuse et drainage

Dans le canton Baker, les roches métamorphiques présentes (~ PM 28) viennent y contrôler le drainage. La patron de drainage suit la grande structure rocheuse et se présente sous une forme légèrement courbée et parallèle (fig. 6.2). Le secteur d'intérêt couvre la majeure partie de la figure et forme un relief important qui est recoupé par la rivière MacDonald le long de laquelle passe la voie ferrée. Cette région se présente comme étant presque dégarnie de dépôts de surface.

Écoulements glaciaires

Toute la région a subi le passage des glaciers aux cours des diverses glaciations. Naturellement, on considère que la plupart des formes associées à l'écoulement des glaciers sont reliées à la dernière glaciation wisconsinienne. Les principales traces observées dans la région se présentent sous la forme de roches moutonnées, de drumlins ou encore de moraine fuselée qui ont une orientation générale vers le sud. Un tel exemple provenant du canton Georges est présenté à la figure 6.3 qui illustre les traces laissées par l'écoulement glaciaire. Ces traces sont révélées par la présence de roches moutonnées, donc érodées par le glacier, et par des moraines fuselées aussi mises en place lors de l'avancée du glacier. Dans les deux cas, les directions d'écoulement sont les mêmes, i.e. vers le sud. Une caractéristique intéressante de ces formes est qu'elles ne sont pas influencées directement par la structure de la roche sous-jacente.

Dépôts morainiques (T)

Toute la région a été recouverte par les glaciers qui y ont soit érodé le substratum rocheux sans laissé de dépôts significatifs (R) ou déposé une couche de till plus ou moins épaisse que l'on pourrait confondre à l'occasion avec des dépôts fluvi-glaciaires. Un tel exemple est présenté à la figure 6.4 dans le canton Kay. Selon le processus de mise en place, certains dépôts glaciaires ont permis la formation d'épaisses couches de till lesquelles, tout comme les dépôts fluvi-glaciaires, sont aussi formées de sables et de graviers et peuvent être fortement ravinées.

Dépôts fluvio-glaciaires (FG)

Lors du retrait des glaciers de la région, les eaux de fontes ont charrié de grandes quantités de sédiments qui se sont mis en place à proximité du front glaciaire et en aval. Les dépôts sont habituellement constitués de sables et de graviers formant soit des eskers (cordons sinueux), ou des dépôts fluvio-glaciaires. Ces derniers seront plus tard érodés en terrasses lorsque le niveau de base du cours d'eau, dans lequel ils se forment, va s'abaisser. De tels dépôts fluvio-glaciaires retrouvés à proximité des eskers présentent souvent des kettles (petits lacs plus ou moins circulaires) indiquant que de la glace provenant de la désintégration du glacier a été mêlée aux dépôts. On parle alors de dépôts fluvio-glaciaires de contact de glace. Un exemple spectaculaire de ce type de dépôts fluvio-glaciaires de contact de glace mis en place lors de la déglaciation du territoire est présenté à la figure 6.5. Il se situe dans le canton Item.

6.1.2. Application : cartes thématiques

La cartographie morphostructurale fournit une panoplie de données qui peuvent être croisées selon les besoins. Les éléments comprennent les attributs (fig. 4.8) qui peuvent aussi être recoupés avec des aspects topographiques, tels que la pente du talus et ainsi générer des cartes thématiques, telles qu'une carte thématique sur l'emplacement potentiel des glissements de terrain.

À titre d'exemple, trois types de mouvements de terrain sont ciblés: les coulées de débris chenalées, les coulées de débris non chenalées, qui se produisent lorsque le till glisse sur le roc et les glissements rocheux. La génération d'une carte thématique aux glissements de terrain doit donc permettre l'identification des conditions propices à chacun de ces mouvements de terrain. Une telle carte provenant du canton Charles est présentée à la figure 6.6a. Les sources de sables et graviers alimentant une coulée de débris chenalée sont identifiées en couplant les attributs correspondants à un dépôt fluvio-glaciaire raviné aux pentes supérieures à 15°. Ces dernières informations, une fois couplées, permettent aussi de distinguer des secteurs en bordure de la rivière qui pourraient être sujets aux glissements rotationnels. Les secteurs permettant les coulées de débris non chenalées sont identifiés en couplant les attributs correspondants au till en couche ou en placage sur le roc aux pentes supérieures à 15°. En ce qui a trait aux glissements rocheux, la carte thématique permet une première identification des secteurs sources en extrayant de la carte les secteurs dont le matériel génétique est rocheux et dont la pente est supérieure à 45°. À cette carte, il est possible d'ajouter les colluvions repérés lors de la création de la carte morphostructurale. Les colluvions en pied de parois rocheuses sont un signe de glissements rocheux antérieurs. Un exemple de carte illustrant une source de glissements rocheux et des colluvions au canton Charles est présenté à la figure 6.6b.

6.2. Reconnaissance et caractérisation des parois éloignées

Concernant les parois éloignées, trois principales étapes ont dû être entreprises afin de les étudier. En premier lieu, il a fallu les identifier. Par la suite, le potentiel d'atteinte (A_{SE}) a été évalué pour ces différentes parois, et finalement, un potentiel de rupture (S_{SE}) a aussi été évalué. Ces trois grandes étapes seront illustrées à l'aide de quelques exemples dans les prochaines sous-sections et les tableaux et annexes de l'ensemble des résultats y seront référés. Suite à ces différentes études, le $D_{MEDCP, SE}$ a pu être attribué à chacune des parois. La classification des parois éloignées qui en découle sera présentée dans la section 6.5.

6.2.1. Reconnaissance initiale des parois éloignées pertinentes

Afin de reconnaître les parois éloignées pertinentes, i.e. celles dont les blocs, si ils parvenaient à se détacher, pourraient atteindre la voir ferrée, deux principales étapes ont été entreprises avant de faire les simulations de chutes de pierres proprement dites : (1) la détection des sources et (2) la détermination des paramètres qui ont trait aux chutes de blocs. Les détails relatifs à la reconnaissance sont fournis dans le mémoire de maîtrise de F. Noël (Noël, 2006). Des exemples de résultats pour ces grandes étapes sont présentés dans les prochaines sous-sections.

Détection des sources

Un premier exemple d'identification de sommets est présenté à la figure 6.7, représentant la situation au secteur du PM 50.3. Tel qu'il est indiqué dans la section méthodologique, les sources sont, dans le cadre de ce projet, identifiées comme étant des bris de pente ou « sommets », avec des angles de 40, 60 et 80 degrés. La figure 6.7 montre que plusieurs « sommets » sont identifiés avec le seuil à 40°, beaucoup moins avec le seuil à 60° et peu avec un seuil à 80°. En fait, pour un tel seuil, presque uniquement la partie la plus élevée de la paroi principale est identifiée, tandis qu'avec le seuil à 60°, l'ensemble des parois est relativement bien identifié. Il y a aussi, pour le seuil à 60°, quelques gros blocs du talus d'éboulis qui sont identifiés comme étant des hauts de falaises, mais cela est relativement mineur. Cette valeur à 60° est celle qui a été retenue pour la détermination du potentiel d'atteinte, parce qu'elle est plus représentative de l'ensemble des parois que la valeur à 80°, et que la valeur à 40° fait ressortir beaucoup de secteurs qui ne sont pas des falaises.

La figure 6.8 montre, quant à elle, la situation à l'entrée des Monts Groulx, soit entre les PM 150 et 152. Ici aussi, l'utilisation d'un seuil à 40° fait ressortir un grand nombre de sources possibles, qui ne correspondent pas toutes à des falaises. Le seuil à 60° identifie mieux les falaises. Il peut aussi être noté, que le bris de pente dû aux coupes de roc est identifié par le seuil à 60° (fig. 6.8). Pour cette première étape de l'analyse, ces sources ont été conservées. Par contre, pour l'évaluation du potentiel d'atteinte des parois éloignées (section suivante, la 6.2.2), ces sources ont été éliminées. Le seuil à 80°, tout comme au PM 50, fait ressortir les plus hautes et abruptes falaises, par exemple celle située au-dessus du PM 152 (fig. 6.8). La falaise visible au PM 150.5, même si elle fait près de 105 m de haut, ne ressort presque pas avec le seuil à 80°, mais ressort avec le seuil à 60°.

Il appert donc que le choix du seuil de pente a une très grande influence sur la distribution des sources. L'utilisation d'un seuil à 80° fera ressortir uniquement les falaises les plus hautes et les plus verticales. L'utilisation d'un seuil à 60° fera ressortir environ l'ensemble des falaises. Finalement le seuil à 40° fait ressortir beaucoup de composantes du terrain qui ne sont pas des falaises. La valeur à 60° est donc celle qui a été retenue pour la détermination du potentiel d'atteinte, parce qu'elle est plus représentative de l'ensemble des parois.

Paramètres pour les chutes de blocs

Le territoire a aussi été classifié, aux fins de simulation de chutes de pierres, en fonction des coefficients de restitution présumés. La figure 6.9 montre, comme premier exemple, la classification des coefficients de restitution tangentiels aux alentours du PM 50. Sur cette figure, on peut voir les principales parois rocheuses ressortir en rouge, à cause des coefficients de restitution tangentiels élevés. Plusieurs pixels de cette même couleur se retrouvent dans le talus d'éboulis et correspondent donc aussi, selon le modèle, à des parois rocheuses. En réalité, ces pixels correspondent à la face des grands blocs composant le talus

d'éboulis. En fait, étant donné que ces blocs sont aussi de la roche, il pourrait être présumé que cette erreur d'identification a peu d'influence sur la valeur qu'aurait été imposée à ces faces, si le travail avait été fait manuellement. Par contre, le dessus des blocs est identifié comme des terrains plats, et auraient selon la classification du modèle, des paramètres correspondant à des sols granulaires, ce qui sont des paramètres sûrement trop faibles pour de la roche. Finalement, étant donné que tous les coefficients imposés au modèle sont conservateurs, ces erreurs d'identification ne devraient pas limiter la propagation des trajectoires.

Les secteurs en rose sur la figure 6.9 sont les secteurs dont les pentes sont comprises entre 25 et 45°. Cela représente principalement le sommet des falaises, qui sont arrondies en partie par effet de lissage, les pentes recouvertes d'un placage de till, le talus d'éboulis ainsi que les remblais ferroviaires. Les coefficients de restitution imposés sur ces secteurs sont caractéristiques de dépôts granulaires compacts et d'affleurements de roc (Pfeiffer et Higgins, 1990), étant donc une description représentative du type de dépôts cartographié.

Finalement, les secteurs en verts pâle et foncé sur la figure 6.9 représentent des secteurs où sont déposés, par exemple, des dépôts alluvionnaires ou fluvioglaciaires. Hormis le dessus de quelques gros blocs dans le talus d'éboulis, les coefficients de restitution imposés sur ces secteurs sont conformes à ceux qui seraient attribués aux dépôts rencontrés. La cartographie morphostructurale vient appuyer les analyses, surtout pour ce qui concerne le choix des coefficients de restitution.

Simulations

Une fois les sources et les paramètres propres aux chutes de pierres définis, il est alors possible de procéder aux simulations proprement dites. Plusieurs résultats sont produits par le logiciel Rockyfor3D, parmi lesquelles figurent le nombre de trajectoires traversant un pixel, les vitesses maximales atteintes à chaque pixel ainsi que le point d'arrêt des diverses simulations. Ces trois résultats sont présentés à la figure 6.10 pour le secteur du PM 50, lorsque les sources utilisées sont celles définies avec un seuil à 60°.

On observe peu d'accumulation à la grandeur du talus d'éboulis et une augmentation du nombre de blocs accumulés directement en pied de talus, où il y a changement de pente (fig. 6.10b). Les positions d'arrêt des blocs simulés ne sont donc pas tout à fait conformes avec les blocs visibles sur la photographie (fig. 6.10a), particulièrement à cause de l'accumulation plus élevée au pied du talus.

Il est important ici de préciser que l'imposant talus est plutôt exceptionnel par rapport à la taille de la falaise. Il n'a peut-être pas été formé par une accumulation de chutes de pierres ponctuelles. Tel qu'il est présenté dans la section suivante, un grand réseau de fissures ouvertes parallèles à l'escarpement principal a d'ailleurs été observé au sommet du massif rocheux sur les photographies aériennes et sur les données LiDAR brutes observées en 3D sous forme de nuage de points. Certaines, ouvertes d'un à trois mètres et profondes de cinq à dix mètres, ont même été observées à une centaine de mètres en amont de l'escarpement principal.

La densité de trajectoires par pixel est plutôt homogène sur le talus d'éboulis (fig. 6.10c), ce qui indique qu'il y a peu d'accumulation sur le talus d'éboulis. Cette densité change drastiquement à proximité de la base, correspondant à la hausse d'accumulation en cet endroit. Lorsqu'il y a plusieurs niveaux de falaise qui se superposent, on observe une hausse importante du nombre de trajectoires par pixel situé en aval de ces

sources. En effet, le fait de doubler le nombre des sources lorsqu'un niveau de falaise s'ajoute engendre près du double de trajectoires observées plus bas.

Les vitesses semblent bien contrôlées par les pentes présentes (fig. 6.10d). Les pentes abruptes engendrent une forte augmentation de la vitesse le long de ces dernières. La baisse de vitesse en pied de talus engendre l'accumulation des particules simulées et donc, la baisse de densités des trajectoires en chaque pixel.

En plus de comparer les simulations avec la position des blocs exceptionnels et du talus d'éboulis, le réalisme des simulations peut être vérifié avec les lignes d'énergies obtenues. Celles des trajectoires simulées pour la tuile du PM 50 correspondent avec l'angle des talus d'éboulis du terrain. En effet, les trajectoires simulées ont principalement des lignes d'énergie entre 33 et 34° (fig. 6.11), alors que les talus d'éboulis ont des valeurs entre 34 et 35°. Ces valeurs correspondent aussi à celles observées par Jaboyedoff et Labiouse (2011) en terrain alpin. Finalement, quelques trajectoires exceptionnelles simulées ont des valeurs inférieures à 30°, ce qui donne une marge de sécurité lorsqu'elles sont considérées, puisqu'habituellement les chutes de pierres ponctuelles atteignent rarement des valeurs inférieures à 30°. Les trajectoires simulées sont donc réalistes, mais avec une tendance conservatrice à exagérer les distances parcourues pour les valeurs extrêmes.

Simulations préliminaires (seuils à 40, 60 et 80°)

Le nombre de trajectoires simulées traversant la voie ferrée a par la suite été notée pour chaque mètre de voie ferrée. Tel qu'il est mentionné dans la méthodologie, à ce stade-ci du travail, les coupes de roc étaient aussi considérées, donc le nombre de trajectoire simulées comprend aussi les trajectoires provenant des coupes de roc. Le nombre de trajectoires croisant la voie ferrée par mètre linéaire est mis en graphique et présenté à la figure 6.12. Cette figure représente, pour l'ensemble de la voie ferrée, les trajectoires croisant la voie provenant des trois sources utilisées, soit avec les seuils de 40, 60 et 80 degrés. À cette échelle (fig. 6.12), il est impossible de distinguer les trois sources. La majorité des trajectoires proviennent du scénario avec les sources identifiées avec un seuil de 40°, puisqu'elles sont plus nombreuses. Des histogrammes montrant des portions agrandies, couvrant un mile de voie ferrée, ont été créés pour montrer plus en détail les secteurs étant atteints par les trajectoires simulées à partir des trois scénarios de sources. Ceux-ci ont été montés l'un à la suite de l'autre pour former une vidéo, en annexe à ce rapport, qui permet de parcourir l'ensemble de l'infrastructure. La figure 6.13 montre, pour le PM 50, un extrait de cette vidéo.

Les trajectoires partant des sources identifiées avec un seuil de 40° donnent une idée de la trajectoire des blocs qui partiraient du talus d'éboulis. Celles partant des sources identifiées avec un seuil de 60° sont les plus représentatives du secteur. Elles atteignent l'ouvrage principalement entre les PM 50.2 et 50.5. Les valeurs maximales se trouvent entre les PM 50.3 et 50.4 (fig. 6.13). Finalement, les trajectoires provenant des sources identifiées avec un seuil de 80° sont présentes en moins grand nombre puisque les sources sont moins nombreuses. Elles atteignent l'ouvrage principalement entre les PM 50.18 et 50.34. Comme elles ne couvrent pas l'ensemble des parois principales du secteur, elles ne doivent pas être directement considérées. Elles permettent cependant d'indiquer quelles sections de l'ouvrage peuvent être atteintes par les trajectoires provenant des parois les plus hautes et verticales. Les trajectoires du scénario avec les sources prises avec un seuil de 80° aident donc à l'interprétation de celles dont les sources sont à 60° et fait en sorte que plus d'attention a été accordée aux secteurs où l'on rencontre les trajectoires des deux scénarios.

Reconnaissance des parois éloignées

À l'aide des histogrammes et des cartes des trajectoires des scénarios avec seuils de 60 et 80 degrés, les sommets de falaises peuvent être classifiés en fonction du nombre de trajectoires simulées atteignant le chemin de fer. Les sites avec plusieurs parois identifiées sont ensuite analysés sur nuages de points 3D pour observer la densité de végétation en pied de falaise, les traces de chutes de pierres récentes, la présence de blocs désolidarisés et de fissures ouvertes. Ces observations sont finalement notées sur les cartes des sommets de falaises classifiées.

La classification des sources en fonction des trajectoires qui atteignent l'ouvrage est présentée à la figure 6.14 pour le secteur du PM 50. Des classes sont attribuées pour chaque falaise, selon les critères présentés à la figure 6.15. Les trois niveaux de falaises entre les PM 50.3 et 50.4 sont classés de catégorie 2 au sud (~20-50 trajectoires par pixel) et de catégorie 1 au nord (> 50 trajectoires par pixel). Ils ont été classés ainsi à cause de la forte densité de trajectoires pour les sources à 60 et 80 degrés, au niveau de la voie ferrée vis-à-vis les falaises. Les trois niveaux ont localement la même cote, car il est très difficile, voire impossible, de distinguer les trajectoires provenant de chacun. Ces catégories ne sont pas liées à celles du

D_{MEDCP,SE}.

La haute paroi subverticale au sommet du massif rocheux est classée de catégorie 3 (< 20 trajectoires par pixel), puis de catégorie 4 (atteinte de l'infrastructure en quelques rares endroits) en se dirigeant vers le sud à partir des trois niveaux de falaises, car le chemin de fer s'éloigne graduellement du massif (fig. 6.14). La même paroi refait son apparition au sommet en se dirigeant vers le nord, elle y est classée de catégorie 3 (< 20 trajectoires par pixel), car la densité de trajectoires atteignant l'ouvrage à son niveau est faible, mais constante.

Une petite paroi de catégorie 4 (atteinte de l'infrastructure en quelques rares endroits) est erronément identifiée en bas à droite à cause des sources placées au niveau des gros blocs du talus d'éboulis à cet endroit. De plus, à cause de la faible hauteur de ces sources, les chances que les trajectoires partant de ces dernières atteignent l'ouvrage sont faibles. Les trajectoires partant de la paroi au sommet se superposant à celles de la petite paroi erronément identifiée, il n'était pas possible de distinguer à quelle paroi se rattachaient celles atteignant l'ouvrage. La petite paroi a donc été classifiée par précaution en fonction des trajectoires atteignant l'ouvrage, même si celles-ci ne lui sont pas nécessairement rattachées.

Une fois les falaises éloignées classifiées pour l'ensemble du territoire par rapport à leurs trajectoires qui atteignent l'ouvrage, les secteurs comportant de nombreuses parois identifiées ont été analysés plus en détail. Au total, 65 secteurs ont été analysés en 3D avec les nuages de points des levés LiDAR aéroportés bruts. La répartition des secteurs par canton est présentée à la figure 6.16. Des secteurs de parois éloignées ont été identifiés dans chacun des cantons, à l'exception de Kay (fig. 6.16). Sans surprise, le canton Jig contient le plus grand nombre de secteurs éloignés, ainsi que la plus importante densité de parois éloignées par mile. Le canton Baker est le deuxième canton en termes de densité de parois éloignées. L'annexe intitulée «Localisation_secteurs_eloignes.pdf» montre, canton par canton, la répartition des parois éloignées. Une fois ces secteurs regroupés, des analyses ont aussi été effectuées sur la morphologie de ces secteurs.

Un exemple d'analyse, pour le PM 50, est présenté à la figure 6.17. La figure principale est une vue en plan du secteur, tandis que les trois zones encadrées et agrandies montrent une vue en plan, mais du dessous, du secteur. C'est comme si l'observateur observait via l'intérieur du massif, cela permet donc de ne voir

uniquement que les points atteignant le sol. En manipulant le nuage de points en 3D pour l'observer sous différents angles, il est possible d'observer la densité de végétation, la hauteur des arbres et leur forme, la présence de blocs en pied de pente, la présence de grandes fissures subverticales et de blocs potentiellement désolidarisés du massif rocheux. Ces observations sont notées puis utilisées lors de l'évaluation du potentiel de rupture de ces secteurs (S_{SE}).

Dans ce secteur, de nombreux blocs probablement désolidarisés sont visibles le long de la falaise située la plus au nord, au niveau de l'agrandi en haut à gauche de la figure 6.17. Ceux-ci sont pointés par les flèches noires de l'agrandi. De larges fissures séparent ces blocs du massif rocheux. La végétation à leur base, dans le talus d'éboulis, est clairsemée et composée principalement de feuillus et d'arbustes, signes d'une forêt peu mature.

En partant du centre de la bordure fracturée abordée précédemment et en traversant le massif vers le sud jusqu'aux falaises visibles dans le deuxième agrandi de gauche, on peut suivre un réseau de larges et profondes fissures subverticales. Celles-ci sont indiquées par les flèches de l'agrandi. Certaines font plus de 5 mètres de profondeur. Ces fissures étant orientées selon l'axe nord-sud, elles sont probablement liées à d'anciens déplacements des épontes est, dans la direction est. Les parois à l'avant du massif, situées entre les PM 50.2 et 50.3 (fig. 6.17), sont visibles dans l'agrandi de droite. La présence de fissures est moins évidente. La façade semble désolidarisée à quelques endroits, avec ce qui semble être des fissures subverticales à l'arrière de celles-ci aux emplacements indiqués par les flèches noires. Une fois l'imposant talus d'éboulis passé, la végétation redevient dense, comme on peut l'observer en bas à droite du nuage de points du secteur. Les arbres y sont principalement des conifères.

Pour finir, toutes les couches d'informations générées sont placées dans un système d'information géographique (SIG). L'utilisateur peut alors aussi afficher les trajectoires, le nombre de trajectoires atteignant l'infrastructure, les sources, les paramètres de terrain, les pentes et leurs orientations, les reliefs ombragés, etc.

6.2.2. Potentiel d'atteinte des secteurs de parois éloignées (A_{SE})

Pour déterminer le potentiel d'atteinte, les simulations effectuées précédemment ont été raffinées, tel qu'il est décrit dans la section 4.9.3 décrivant la méthodologie. Par la suite, les trajectoires ayant traversé la voie ferrée sont comptabilisées et mises en relation avec le nombre total de trajectoires, afin d'évaluer le pourcentage d'atteinte. Deux méthodes sont utilisées pour ce faire, tel qu'il est exposé dans le chapitre méthodologie.

La nouvelle rasterisation à pixels de 0.25 m² (50 cm de côté) permet de réduire l'effet de lissage des pentes et des orientations associées aux données matricielles. Les fossés et éléments topographiques irréguliers se retrouvent mieux définis. Cela peut s'observer, par exemple, sur la figure 4.28 en a et b pour le secteur du PM 157.50.

La figure 6.18 présente, pour le PM 152, un exemple de résultats pour les simulations utilisant les nouvelles sources et le modèle numérique de terrain à plus haute définition. L'image du haut (fig. 4.28a) présente en rouge la localisation des sources et en bleu les positions d'arrêt des blocs. La portion b présente les densités de trajectoires affichées sur le MNT. Finalement, l'image c présente l'énergie moyenne des trajectoires passant par un pixel. On remarque sur cette figure des pixels bleus au niveau des parois

abruptes. Cela signifie que certaines simulations ne se sont pas propagées sur de longues distances et se sont arrêtées directement en pied de pente ou elles n'ont pas quitté leur point de départ. On remarque aussi que la position d'arrêt de plusieurs pierres est au niveau des plateaux. Les simulations permettent de déterminer la limite latérale où les trajectoires ne traversent plus la voie ferrée. De tels résultats sont disponibles pour l'ensemble des falaises éloignées. L'annexe numérique « Atteinte_Secteurs_Eloignes.pdf » présente, pour chacun de ces secteurs, les résultats détaillés. Le fichier Excel nommé « Secteurs_eloignes_MEDCP.xls » dans les annexes numériques présente, en ordre croissant de PM, l'inventaire des secteurs éloignés avec le pourcentage d'atteinte calculé pour chacune de ces parois ainsi que les principales propriétés géométriques.

Les histogrammes de la figure 6.19 présentent la fréquence relative de chaque intervalle de 10% de potentiel d'atteinte en fonction des deux méthodes de détermination de l'atteinte (les méthodes par pixels et par trajectoires). Les deux histogrammes sont similaires ce qui est normal puisque les valeurs de la méthode par trajectoires ont été pondérées afin d'être similaires à celles obtenues de la méthode par pixels. Le secteur éloigné avec la valeur maximale de potentiel d'atteinte (A_{SE}) est le même pour les deux méthodes.

Des dix secteurs avec le plus fort potentiel d'atteinte (A_{SE}), cinq se trouvent dans Jig, trois dans Able, un dans Dog et un dans Fox. Il ne semble pas y avoir de corrélation entre le dénivelé d'un secteur et son potentiel d'atteinte (fig. 6.20). Ceci est aussi le cas pour la distance horizontale maximale séparant les crêtes des parois et la voie ferrée (fig. 6.20). Par contre, la corrélation est meilleure entre la probabilité d'atteinte (A_{SE}) et la valeur de hauteur divisée par la distance horizontale moyenne, ce qui correspond aussi à une sorte de ligne d'énergie (fig. 6.21). Finalement, une faible corrélation existe entre le classement préliminaire des crêtes effectué à partir des résultats des simulations préliminaires systématiques et le potentiel d'atteinte (fig. 6.22). Ces analyses des résultats montrent, entres autres, l'importance de faire les simulations précises et non pas juste d'utiliser des relations empiriques, dans l'évaluation du potentiel d'atteinte, dans un contexte de paroi éloignée.

6.2.3. Potentiel de rupture des secteurs de parois éloignées (S_{SE})

Le potentiel de rupture est obtenu d'une équation mettant en relation cinq paramètres détaillés à la section 4.9 de la méthodologie et dont le pointage est indiqué pour chacun des secteurs dans le fichier «Secteur_eloignes_MEDCP.xlsx» dans les annexes numériques. Ce tableau indique le pointage attribué aux huit paramètres, la valeur calculée du potentiel de rupture (S_{SE}), la description du secteur et des incertitudes de l'évaluation. De plus, certains commentaires sur les caractéristiques des secteurs sont donnés, par exemple, la présence de cicatrices de coulées de débris.

La distribution des pointages attribués aux cinq paramètres utilisés pour le calcul du potentiel de rupture est présentée à la figure 6.23. Pour les paramètres P_A (présence de débris de chutes de pierres), P_B (état de la végétation) et P_D (potentiel de volume supérieur à 20 m³), au moins la moitié des secteurs ont un pointage de 3, donc correspondant aux critères les moins problématiques. Puis, le nombre de secteurs ayant des pointages de 9, 27 et 81 va en diminuant. Ceci indique que la majorité des secteurs étudiés ont une faible fréquence de chutes de pierres et que des talus d'éboulis n'ont pas eu le temps de se former. Effectivement, les lithologies présentes sur le territoire sont en général assez massives et ne favorisent pas des fréquences de plusieurs événements par année. Ceci est reflété par l'observation de blocs isolés ou

d'amas de blocs qui sont souvent observés plutôt que des talus d'éboulis qui sont rares (27 secteurs). Le secteur C PM52.00 est un exemple d'un secteur ayant un important talus d'éboulis.

Le paramètre P_A (accumulation de blocs tombés) pourrait être sous-estimé si des événements de chutes de pierres qui ont atteint la voie ferrée ne sont pas documentés dans la banque d'archives. Puisque ces blocs qui atteignent la voie ferrée sont déplacés, il est fort probable qu'ils n'aient pas été observés sur les photographies résultant en la sélection d'un critère de plus faible pointage et une sous-estimation du potentiel de rupture (S_{SE}).

Neuf des 73 secteurs ont obtenu un pointage de 27 ou 81 pour le paramètre évaluant le potentiel de génération de volume supérieur à 20 m³. Ces secteurs sont C PM52.00, J PM149.90, A PM24.10, C PM50.30, D PM58.80, H PM121.30, J PM152.00, J PM154.10 et J PM154.60 (les figures de localisation sont présentées à l'annexe « Localisation_Secteurs_Eloignes.pdf »). Étant donné que les grandes ruptures surviennent normalement moins fréquemment que celles de volume moindre, une paroi ayant uniquement un potentiel de grand volume aura probablement une fréquence de rupture plus faible qu'une paroi générant plusieurs petits volumes. Toutefois, les conséquences liées à une rupture de plus grand volume devraient être plus importantes et, pour cette raison, il peut être pertinent pour le gestionnaire de les reconnaître. Le système MEDCP permet de questionner la base de données pour faire ressortir ces secteurs.

Une pondération plus grande est attribuée au pointage P_C (fissuration du massif), que les pointages des paramètres A, B et D dans l'équation du potentiel de rupture. Un pointage de 9 a été attribué à 55% des secteurs pour le paramètre C. Effectivement, les observations effectuées au niveau des coupes de roc nous indiquent que la majorité des massifs rocheux du territoire étudié sont découpés par plus de quatre familles de discontinuités, donnant un aspect fracturé à plusieurs des parois rocheuses. Ainsi, les parois d'apparence lisse sans bris de pente (pointage de 3) sont plutôt l'exception sur le territoire étudié. De plus, un autre facteur contribuant au grand nombre de secteurs avec un pointage de 9 est le fait que, lorsque la paroi n'était pas visible sur les photographies, soit parce qu'elle n'avait pas été photographiée ou parce que la végétation cache complètement la paroi et qu'aucun signe ne permettait d'identifier des instabilités récentes ou en cours, c'est cette valeur qui était attribuée. Cette situation s'est présentée pour 30 secteurs.

Le paramètre $F_{DENSITÉ}$ (densité des sources) à une répartition plus équitable entre les divers pointages (fig. 6.23). Ce paramètre varie principalement en fonction de la géométrie des escarpements, principalement en fonction de leur hauteur. L'équation qui permet d'obtenir le potentiel de rupture accorde beaucoup d'importance à ce paramètre. Les équations présentées dans la section méthodologie sont inscrites ci-dessous :

$$S_{SE} = Y_{SE} \times F_{DENSITÉ}$$

$$Y_{SE} = \left[\frac{(P_A + P_B + P_D) \times 0.2 + P_C \times 0.4}{81} \right]$$

La figure 6.24 illustre de quelle façon la pondération en fonction de la densité de sources influence la valeur du potentiel de rupture et principalement, le classement relatif des parois. Un premier classement en ordre décroissant du terme Y_{SE} est présenté à la figure 6.24. Il varie de 0.03 à 0.87. Lorsqu'on effectue la multiplication par la pondération pour la densité de sources ($F_{DENSITÉ}$), le classement est influencé tel qu'on peut l'observer par le désordre apparent des résultats (carrés noirs, fig. 6.24). Par exemple, le secteur qui était en 35^e position (A PM11.50), passe d'une valeur de 0.096 (carré noir) à 0.00096 (carré bleu), et de la

35^e à la 54^e valeur la plus élevée. La pondération a aussi pour effet d'agrandir la plage de valeurs qui s'étend de 0.0003 à 0.87.

Le potentiel de rupture (S_{SE}) pour chacun des secteurs éloignés est présenté en ordre croissant sous forme graphique à la figure 6.25. Les secteurs situés dans le coin supérieur droit sont jugés plus susceptibles de générer des chutes de pierres. Le potentiel d'atteinte (A_{SE}) n'est pas pris en compte dans ce classement. Les résultats du MEDCP seront présentés à la section 6.5.1 du rapport. Bien que les résultats soient présentés comme une série séquentielle, il est plus adéquat de considérer des catégories, i.e. la quatrième paroi ayant le potentiel de rupture le plus élevé est potentiellement aussi problématique que la première. Les parois qui sont sur un même axe vertical dans la figure 6.25 ont des potentiels de ruptures similaires, i.e., les parois classées de la 57^e à la 67^e position ont le même potentiel de rupture et donc, la 67^e paroi pourrait tout aussi bien être la 57^e.

L'évaluation du potentiel de rupture (S_{SE}) repose essentiellement sur le jugement de l'observateur et est basé sur des données de télédétection. Le manque de visuel sur les parois est le plus grand facteur d'incertitude. Lorsque les parois sont de moins de 10 m de hauteur, elles sont souvent masquées par les arbres. Puisqu'il s'agit d'une évaluation qui vise à comparer relativement les secteurs entre eux et que les critères sont simples, ceci permet de limiter l'effet négatif de l'incertitude créé par le choix des critères. Le degré d'incertitude est évalué au moment de déterminer le potentiel de rupture par l'observateur. Il sera présenté à la section 6.5.1.

6.3. Inventaires et caractérisation des coupes de roc

6.3.1. Reconnaissance et inventaire

L'inventaire des coupes de roc a permis d'en dénombrier 425. Ce nombre différencie les côtés est et ouest. Ainsi, une tranchée compte pour deux coupes de roc et il y a 101 paires de coupes en tranchée. Les parois ont entre 2 et 100 m de hauteur et sont de 16 à 547 m de long (fig. 6.26). Les coupes font principalement face à l'ouest-sud-ouest et à l'est-nord-est (fig. 6.27).

La figure 6.28 présente le nombre de coupes de roc par canton, ainsi que la densité de coupes par mille pour chacun des onze cantons étudiés. Le canton Jig a la plus grande quantité et la plus grande densité de coupes de roc. Le second canton avec la plus grande densité de coupes est Eva, suivi de Baker et Dog. Les cantons Georges, How, Item et Kay ont significativement moins de coupes de roc que les autres cantons.

Approximativement 180 coupes de roc des 425 répertoriées au cours du projet *ParaChute* ont fait le sujet d'inspections passées (Golder et al. 2009 et les autres inspections). Les associations entre la nomenclature utilisée dans ce rapport et celle utilisée par les consultants sont indiquées au tableau « Nom_Correspondance_Consultants.xls » dans les tableaux numériques.

6.3.2. Potentiel d'atteinte des coupes de roc (A_{CR})

L'équation permettant d'obtenir le potentiel d'atteinte des coupes de roc (A_{CR}) est la suivante (Eq. 6.1):

$$A_{CR} = \left(1 - \frac{\text{Efficacité du fossé (\%)}}{100}\right) \times 0.9 + \left(\frac{P_{Tremplin} + P_{Taille\&Vol}}{2 \times 81}\right) \times 0.1 \quad [6.1]$$

Le tableau «Coupes_de_roc_MEDCP.xlsx» présente, pour chacune des coupes de roc, les données permettant d'évaluer le potentiel d'atteinte (A_{CR}).

Les paramètres du deuxième terme de l'équation ($P_{Tremplin}$ et $P_{Taille\&Vol}$) sont évalués en leur attribuant un pointage de 3, 9, 27 ou 81 sur la fiche MTQ. La répartition des pointages est illustrée aux histogrammes de la figure 6.29. Une majorité de coupes obtiennent un pointage de 3 ou de 9. La valeur minimale que peut prendre ce terme est 0.0037 et la valeur maximale est 0.1.

Le paramètre de l'efficacité des fossés est évalué de quatre façons différentes, selon qu'il s'agisse d'un portail de tunnel, d'une coupe de moins de 6 m de haut, entre 6 et 26 m de haut ou supérieure à 26 m de haut. Pour la dernière catégorie, les abaques de Pierson et al. (2001) ont été transformés pour que l'axe des abscisses devienne la différence entre l'angle de la ligne d'énergie et l'inclinaison de la paroi. Dans les abaques originaux, l'axe des abscisses est la largeur de la fosse de captage. Les histogrammes de la figure 6.30a illustrent les efficacités de fossés qui auraient été obtenues, si elles avaient été évaluées en utilisant les abaques de Pierson et al. (2001) pour les coupes de 24.4 m de hauteur. L'historgramme de la figure 6.30b présente les valeurs obtenues avec les abaques modifiés. Ce sont les valeurs des abaques modifiés qui sont utilisées pour l'évaluation de l'atteinte. Les abaques modifiés permettent, tel qu'il a été posé, d'obtenir des pourcentages d'efficacité plus faibles et donc, l'approche développée donne les résultats escomptés.

La distribution des valeurs obtenues pour l'efficacité des fossés des 425 coupes de roc est illustrée à la figure 6.31a. Plus de 200 coupes de roc obtiennent une efficacité supérieure à 95%. De ce nombre, plus d'une centaine sont des parois de moins de 6 m de hauteur. La distribution est à nouveau présentée, mais cette fois en enlevant les coupes de roc d'une hauteur inférieure ou égale à 6 m (fig. 6.31b). De cette deuxième représentation, 30% des parois ont une efficacité des fossés supérieure à 95%, alors que 5% des parois ont une efficacité inférieure à 5%.

L'addition des deux termes de l'équation 6.1 donne le potentiel d'atteinte des coupes de roc (A_{CR}). Plus la valeur est proche de l'unité, plus le potentiel qu'un bloc qui se détache de la paroi atteigne la voie ferrée est fort. La plage de valeurs d' A_{CR} s'étend de 0.0046 à 0.991 (fig. 6.32a et b). 64 coupes de roc obtiennent la valeur minimale de 0.0046 et une seule obtient la valeur maximale de 0.991. Il s'agit du portail nord du tunnel C. Les neuf portails de tunnel obtiennent des valeurs supérieures à 0.898. Le dixième portail est évalué dans les secteurs de parois éloignées.

La figure 6.32a présente les valeurs obtenues d' A_{CR} en ordre séquentiel et la couleur du symbole indique la catégorie de hauteur à laquelle appartient la paroi. Le potentiel d'atteinte est présenté sur une échelle logarithmique. Une coupe d'une hauteur de 6 m a un potentiel d'atteinte relativement élevé de 0.337, et ce, malgré sa faible hauteur. Cette coupe a été évaluée en utilisant l'abaque pour les parois de 12.27 m, et puisque son fossé est de moins de 0.50 m de profond, avec la courbe du fossé plat. Ainsi, l'efficacité de son fossé est probablement sous-estimée et donc, la méthodologie du MEDCP surestime l'atteinte dans ce cas particulier. Le potentiel d'atteinte (A_{CR}) semble néanmoins représentatif pour la grande majorité des parois.

6.3.3. Potentiel de rupture des coupes de roc (S_{CR})

Le potentiel de rupture des coupes de roc (S_{CR}) est obtenu de la sommation des pointages pondérée par un facteur déterminé en fonction de la dimension de la coupe de roc (F_{SUP}), tel qu'il est présenté dans la méthodologie (section 4.9.6) et rappelé ci-dessous (Eq. 6.2):

$$S_{CR} = Y_{CR} \times F_{SUP} \quad [6.2]$$

$$Y_{CR} = \frac{\sum_i^n P_i}{n \times 81} \quad [6.3]$$

Les pointages obtenus de l'évaluation de la fiche MTQ sont indiqués pour chacune des coupes de roc au tableau «Coupes_de_roc_MEDCP.xlsx». Ce tableau numérique indique le pointage attribué aux treize paramètres, la superficie, la valeur de Y_{CR} et de F_{SUP} , ainsi que la valeur calculée du potentiel de rupture (S_{CR}).

La figure 4.45 illustre de quelle façon la pondération en fonction de la superficie (F_{SUP}) des coupes de roc influence la valeur du potentiel de rupture (S_{CR}) et principalement, le classement relatif des parois. Un premier classement en ordre décroissant du terme Y_{CR} est présenté. Il varie de 0.037 à 0.711. Lorsqu'on effectue la multiplication par F_{SUP} pour obtenir S_{CR} , le classement est influencé tel qu'on peut l'observer par le désordre apparent des résultats (fig. 4.45). Par exemple, le secteur qui était en 125^e position (PM 82.19), passe d'une valeur de 0.422 à 0.211, et de la 125^e à la 249^e valeur la plus élevée. La pondération a aussi pour effet d'agrandir la plage de valeurs qui s'étend de 0.00037 à 0.711.

Tableau 6-1. Nombre de coupes de roc associées aux six valeurs que peut prendre le facteur de pondération en fonction de la superficie F_{SUP} .

F_{SUP}	Nombre de coupes de roc avec cette correction
0.01	15
0.1	26
0.5	73
0.9	87
0.99	81
1	143

Le potentiel de rupture des coupes de roc (S_{CR}) est présenté en ordre croissant sous forme graphique à la figure 6.33. Les secteurs situés dans le coin supérieur droit sont jugés plus susceptibles de générer des chutes de pierres. Les parois qui sont situées sur un même axe vertical dans cette figure ont des potentiels de ruptures similaires, i.e., les parois classées de la 365^e à la 386^e position ont le même potentiel de rupture et donc, la 386^e paroi pourrait tout aussi bien être la 365^e.

L'évaluation du potentiel de rupture (S_{CR}) repose sur l'évaluation visuelle de paramètres lors d'une visite terrain des coupes de roc. Au moment des travaux de terrain, l'utilisateur indique les sources d'incertitudes, s'il y en a. Ces sources d'incertitudes sont souvent associées à la présence de végétation qui masque la paroi, au manque de visuel sur le haut des parois (qui a parfois été résolu par l'utilisation d'un drone), à la complexité des mécanismes de rupture et à la difficulté à déterminer si la rupture de certains volumes est

imminente ou non. L'efficacité des mesures de mitigation en place est une autre source d'incertitude et l'évaluation de la fiche MTQ s'est fait en ne les considérant pas. Aussi, l'évaluation a été conduite dans le cadre de travaux de recherche universitaire et dans un cadre de formation. Les personnes qui ont pris part aux travaux de terrain avaient peu d'expériences en caractérisation de coupes de roc et n'étaient pas des ingénieurs séniors. Ceci peut se refléter dans la sélection des critères de la fiche MTQ.

6.4. Aperçu des glissements rocheux pouvant impliquer des volumes supérieurs aux chutes de pierres

Le MEDCP, de par son nom, est lié directement à l'analyse des chutes de pierres. À cet effet, son développement, à ce stade-ci, ne comprend pas l'analyse des glissements rocheux impliquant des volumes approximativement supérieurs à 20 m³. Les glissements rocheux de plus de 20 m³ sont en général beaucoup moins fréquents que les chutes de pierres, mais à cause de leur plus grand volume, les conséquences peuvent être plus grandes et surtout elles sont plus probables à cause de leur capacité supérieure à atteindre la voie ferrée. Sur l'abaque général proposé pour le projet *ParaChute* (fig. 6.34), il est indiqué que l'analyse structurale pourrait révéler la présence de signes indiquant la possibilité de mouvements de terrain rocheux impliquant des volumes plus grands pour des ruptures planaires, par basculement ou par dièdres (fig. 6.35).

Lors de la saisie des données de terrain, on aura noté s'il y a un potentiel pour des ruptures impliquant des volumes supérieurs à 5 m³ ainsi que des structures favorables à de grands glissements rocheux (ruptures planaire, basculement ou de dièdre) et ces éléments sont en quelque sorte pris en compte dans l'évaluation MEDCP de la paroi. Par contre, tel qu'il est décrit plus bas, le facteur de sécurité n'a pas été évalué pour ces conditions, car cela déborde du cadre du projet *ParaChute* lequel se limite à l'étude du danger des chutes de pierres. L'étude de ces types de rupture devra éventuellement être considérée par ArcelorMittal. Tel qu'illustré plus bas, le projet *ParaChute* contribue substantiellement aux données nécessaires à de telles analyses.

Pour certaines coupes de roc, il était difficile d'évaluer un mode de rupture en particulier étant donné l'état de la paroi et de la qualité de la coupe. La qualité est vraisemblablement héritée du mode de sautage utilisé pour réaliser la coupe qui aurait induit une fracturation importante du massif rocheux. Un tel exemple est montré à la figure 6.36 qui compare une coupe ayant une rupture planaire clairement identifiable et une autre où le découpage du massif rocheux a fait en sorte que l'orientation de la fracturation est presque aléatoire, sauf pour des décrochements localisés et qui sont plus liés aux chutes de pierres.

Au total, 65 coupes de roc ont présenté des signes indiquant un potentiel pour une rupture soit de type planaire, de dièdre ou par basculement, et ces données sont toutes colligées dans la base de données et présentées dans le tableau numérique «Coupes_de_roc_MEDCP.xlsx». Ces coupes de roc sont réparties à divers endroits sur le territoire et sont localisées sur chacune des cartes de compilation (Annexe numérique «Coupes_de_roc_cartographie.pdf») et notées au tableau général «Coupes_de_roc_MEDCP.xlsx». Mis à part les observations recueillies lors de la saisie des paramètres pour le MEDCP, aucune analyse n'a été faite sur ces ruptures car cela débordait du cadre du projet *ParaChute*. Par contre, il est jugé à propos de dédier une section à ces glissements afin d'illustrer comment les données obtenues dans le cadre du projet

ParaChute peuvent illustrer la présence de conditions favorables à des grands glissements et comment la base de données vient fournir un soutien à la gestion des parois rocheuses vis-à-vis ce type de mouvement.

Trois points seront abordés dans cette section. Premièrement, un exemple pour chacun des trois types de rupture (planaire, basculement et dièdre) est présenté avec le tableau de compilation. Deuxièmement, nous allons commenter sur l'évaluation de la possibilité d'atteinte. En troisième et dernier lieu, nous allons commenter en quoi ces éléments d'information viennent ajouter en tant qu'outil d'aide à la gestion des parois rocheuses.

6.4.1. Exemples de ruptures en masse du massif rocheux

Les modes de rupture dans les glissements peuvent être de quatre types dont trois sont contrôlés par les discontinuités (fig. 6.35). Un massif rocheux très fragmenté et ayant des discontinuités dans toutes les directions pourra générer des ruptures de type circulaires (fig. 6.35a). Les trois autres modes de rupture, i.e. planaire, par dièdre et par basculement, seront illustrés ci-après à partir d'exemples provenant du projet ParaChute.

Le potentiel de rupture en mode planaire, tout comme pour le cas d'un mode par dièdre, peut être évalué à l'aide du concept du coefficient de sécurité (F) qui considère qu'à l'équilibre, les forces résistantes sont égales aux forces contraignantes tel que (Eq. 6.4):

$$F = \frac{cA + (W \cos \psi - U + T \sin \beta) \tan \varphi}{W \sin \psi + V - T \cos \varphi} \quad [6.4]$$

Les différents paramètres de cette équation générale sont illustrés à la figure 6.37. La figure 6.37 présente un modèle simplifié d'une rupture planaire pour un bloc glissant sur une pente inclinée à ψ . Les forces résistantes sont exprimées au numérateur et les forces déstabilisatrices le sont au dénominateur. La poussée de l'eau (U et V , fig. 6.37a et b) ainsi qu'une résistance additionnelle due à l'ajout d'un ancrage (T , fig. 6.37b) sont aussi incorporées dans l'équation. La complexité de la relation présentée à la figure 6.37 est grandement accrue par des variations de la géométrie du problème lesquelles jouent principalement sur la valeur du poids de la masse qui peut se déplacer. Ainsi, l'évaluation du coefficient de sécurité d'un talus vis-à-vis un potentiel de rupture par dièdre ou planaire nécessite une connaissance de la géométrie du massif rocheux impliquée. Cette figure et la relation qui est présentée ici illustre que si l'on veut améliorer le coefficient de sécurité, on peut modifier la géométrie (impact sur W), drainer adéquatement (impacts sur U et V) ou encore augmenter la résistance au cisaillement le long de la surface de rupture par l'ajout d'une force d'ancrage (T). L'écaillage consisterait ici à enlever le bloc comme tel.

Chacun des cas sera représenté par une photographie de la paroi, le modèle numérique de terrain en nuage de points ainsi que le stéréonet des discontinuités et une brève analyse sur le mode de rupture principal considéré pour l'exemple présenté. Toutes les orientations des familles de discontinuités sont indiquées selon la convention pendage/direction de pendage.

Rupture planaire

Tel qu'illustré à la figure 6.35b, une rupture planaire se développe sur un plan incliné (une discontinuité suffisamment persistante) qui voit le jour dans la pente, i.e. que la pente de la discontinuité est inférieure

à celle du talus. Pour qu'il y ait rupture, il faudra que la pente de la discontinuité soit supérieure à l'angle de frottement à moins que des pressions interstitielles viennent y réduire la résistance au cisaillement.

Le cas utilisé ici provient du secteur Eva au PM 72.95 (fig. 6.38). La figure présente une photographie de la paroi en (a) le stéréonet en (b) des principales familles de discontinuités identifiées à partir du nuage de points de la paroi présenté en (c). La photographie montre clairement le découpage des roches en strates ayant une inclinaison semblable à celle du talus. Il y a déjà des surfaces de décollement présentes sur la paroi.

La paroi a été scannée à l'aide du LiDAR mobile et les résultats de l'analyse avec le logiciel Coltop ont donné l'image présentée en (c) et de laquelle ont été extraites les données structurales compilées en (b). Les surfaces colorées en vert correspondent à celles représentant le plan sur lequel la rupture planaire pourrait se produire. Aux données structurales présentées en (b) est ajoutée l'orientation du talus (65/280°) et cela à fin de bien illustrer la famille de discontinuités qui correspond à celle sur laquelle la rupture pourrait se produire, i.e. le long de la famille 1m ayant un pendage de 61° et orientée à 276° (voir la surface identifiée par 1m à la figure 6.38).

Rupture par dièdre

Une rupture par dièdre implique que l'on forme un volume rocheux qui est découpé par deux familles de discontinuités et dont la ligne d'intersection peut constituer l'axe dans lequel le mouvement pourra se faire. Comme pour les ruptures planaires, il faut ici que l'inclinaison de l'axe de la ligne d'intersection (ou du plan sur lequel se fera le mouvement) soit inférieure ou égale à celle du talus (fig. 6.35b).

L'exemple présenté ici pour le cas d'une paroi où l'arrangement des discontinuités permettrait une rupture par dièdre. Elle se situe au PM 71.82 dans le secteur Eva pour une coupe orientée vers l'ouest. Les plans des discontinuités qui peuvent générer une rupture par dièdre sont identifiés à la figure 6.39b et sont les familles représentées par les grands cercles rouges (2m 50/278°, et identifiée à la fig. 6.39) et vert (3m 76/011°) avec une direction de mouvement vers environ 300°. Cet exemple permet aussi d'illustrer un autre type de données acquises lors de travaux de terrain, i.e. les levés LiDAR terrestres (fig 6.39d).

Ici, on peut noter que les volumes potentiellement impliqués dans un glissement peuvent être variables selon la position spatiale des discontinuités qui seraient impliquées dans la rupture ainsi que de l'orientation locale du talus.

Rupture par basculement

Une rupture par basculement nécessite la présence d'une famille de discontinuités ayant un fort pendage (souvent supérieur à 70°) incliné vers l'intérieur du talus, laquelle repose sur un plan à faible pendage créé par une autre famille de discontinuités (fig. 6.35c). Un exemple simple d'une rupture par basculement pour un seul bloc est illustré à la figure 6.40. Cet exemple montre clairement que pour une rupture par basculement, l'instabilité devient possible lorsque le centre de masse du bloc (vecteur W) passe par la base du pied du bloc ou va au-delà (fig. 6.40). L'exemple illustre aussi que si l'on veut réduire le potentiel de rupture par basculement on jouera principalement sur la géométrie du bloc pour faire en sorte que celui-ci ne puisse que glisser, i.e. avec des ancrages on va épaissir artificiellement la portion du massif rocheux impliqué, sur le rapport h/B de la figure 6.40.

L'exemple présenté ici pour le cas d'une paroi où l'arrangement des discontinuités permettrait une rupture par basculement. Il s'agit ici de la coupe de roc F43 W (canton Fox) au PM 90.55 (fig. 6.41). À cet endroit, les deux familles de discontinuités qui sont associées pour générer potentiellement des ruptures par basculement sont les familles 1m (bleue, inclinée à 75°) et la famille 6m (brun) inclinée à 24°, approximativement dans la même direction que le talus, i.e. vers l'est. Les familles sont indiquées sur la photographie (fig. 6.41a) et la direction du basculement est indiquée par la flèche noire en (b). À cet endroit, ce mode de rupture potentiel par basculement apparaît assez généralisé sur l'ensemble de la paroi.

6.4.2. Commentaire sur le potentiel d'atteinte

Les coupes de roc pour lesquelles nous avons préliminairement identifié la présence de structures permettant des glissements de plus grand volume ont été répertoriées dans le MEDCP par l'indicateur de volumes de 5 m³ ou plus. Ce paramètre était considéré pour évaluer le potentiel d'atteinte, i.e. des volumes plus importants ont une capacité plus grande d'atteindre des distances plus élevées, le reste étant constant. Sous cet angle, le potentiel a été considéré.

Il serait tout de même important ici de rappeler que les grands glissements sont souvent moins fréquents, mais peuvent avoir des conséquences plus importantes à cause de leur volume. Pour ce qui est des coupes de roc situées à proximité de la voie ferrée, il est vraisemblable de croire que si un tel événement se produisait, l'infrastructure serait atteinte et dans bien des cas, le fossé ne serait pas suffisant pour contenir le volume déplacé. Ces commentaires sont mentionnés ici pour souligner l'importance à accorder à de tels phénomènes. Ces glissements rocheux posent un danger aussi pour les infrastructures, mais en évaluer le potentiel est en dehors du projet *ParaChute* comme tel.

6.4.3. Éléments d'aide à la gestion des parois rocheuses

La réalisation du projet *ParaChute* a permis l'acquisition d'une quantité importante de données sur les parois rocheuses bordant la voie ferrée dont plusieurs d'entre-elles pourraient être directement utilisées dans l'étude des glissements rocheux autres que les chutes de pierre. Les trois exemples présentés ci-haut illustrent la qualité des données et le fait qu'elles vont permettre des études plus poussées visant à réduire le danger posé par de tels types de glissements.

La méthode de mitigation la plus communément utilisée dans une situation de rupture planaire, dièdre ou basculement est l'utilisation d'ancrages. Les données acquises dans le cadre du projet *ParaChute* vont aussi permettre des études préliminaires sur la conception des méthodes de mitigation qui pourraient être utilisées.

Les travaux réalisés ont permis d'identifier des coupes pour lesquelles des glissements autres que les chutes de pierre pouvaient se produire. À cause du temps finalement disponible à l'étude des coupes de roc et des objectifs de développement du MEDCP, l'inventaire des coupes avec des potentiels de volumes supérieurs à 5 m³ n'est pas nécessairement complet. Par contre, le nombre assez élevé de sites où de telles conditions existent devrait retenir l'attention d'ArcelorMittal pour des travaux futurs.

Il apparaît dans notre analyse présentée dans cette section que la méthodologie développée dans le cadre du projet *ParaChute* permet d'aller au-delà de l'analyse des chutes de pierres, définies comme des ruptures de faible volume. Tout comme la carte morphostructurale, les données structurales acquises par les visites

de terrain et les levés au Lidar mobile et leur analyse réalisées au bureau constituent une source importante de caractérisation du milieu qui seront des outils pertinents à la gestion des parois rocheuses.

6.5. Classification MEDCP

Le danger MEDCP ($D_{MEDCP, SE}$) est obtenu de la multiplication des potentiels de rupture et d'atteinte. À partir de la valeur du $D_{MEDCP, SE}$, les parois sont classées dans des catégories représentant leur priorité d'intervention, tel que décrit à la section 4.9 de la méthodologie. Les limites numériques définissant les catégories sont fixées aux ordres de grandeur logarithmique:

- Priorité élevée: 0.1 à 1 (catégorie 1);
- Priorité modérée : 0.01 à 0.1 (catégorie 2);
- Priorité faible: 0.01 à 0.001 (catégorie 3);
- Priorité très faible (faible) : 0.001 à 0.0001 (catégorie 4);
- Priorité nulle (très faible à nulle) : < 0.0001 (catégorie 5).

Dans cette section, les résultats sont présentés pour les secteurs éloignés, puis pour les coupes de roc.

6.5.1. Danger MEDCP des secteurs de parois éloignées ($D_{MEDCP, SE}$)

Le Danger MEDCP ($D_{MEDCP, SE}$) obtenu de la multiplication des potentiels de rupture (S_{SE}) et d'atteinte (A_{SE}) est présenté au tableau «Secteurs_eloignes_MEDCP.xlsx» et à la figure 6.42. Les secteurs jugés plus susceptibles de générer des chutes de pierres pouvant atteindre la voie ferrée se retrouvent dans le coin supérieur droit du graphique de la figure 6.42. Les secteurs sont ensuite classés en catégories définies en fonction du $D_{MEDCP, SE}$ (fig. 6.42). Les catégories 1 et 2 regroupent les secteurs avec les scores les plus élevés. Quatre secteurs sont catégorisés 1 et dix-huit sont catégorisés 2. Les secteurs avec un pointage de 27 ou 81 au paramètre évaluant le potentiel de volume de plus de 20 m³ (P_C) sont indiqués par un symbole rempli (fig. 6.42). Huit de ces neuf secteurs sont de catégories 1 ou 2, le neuvième est de catégorie 3.

Certains secteurs ont des scores situés près de la limite entre deux catégories. Ainsi, le classement séquentiel sous forme graphique (fig. 6.42) permet au gestionnaire de reconnaître ces secteurs et d'en tenir compte au besoin.

Le classement des secteurs n'est évidemment pas le même que celui présenté pour les potentiels de rupture ou d'atteinte. Certains secteurs sont de catégorie faible malgré un potentiel de rupture moyen à cause de leur faible potentiel d'atteinte. Il peut être pertinent pour le gestionnaire de différencier les secteurs en fonction de leur potentiel de rupture et d'atteinte. Par exemple, les travaux de mitigation peuvent cibler l'un ou l'autre. L'agrandissement d'un fossé ou la mise en place d'un mur de retenu vise à diminuer le potentiel d'atteinte alors que l'écaillage et le boulonnage vise à diminuer le potentiel de rupture. La figure 6.43 présente les résultats en mettant en relation le potentiel de rupture en fonction du potentiel d'atteinte. Les secteurs se trouvant dans le coin supérieur droit sont les plus susceptibles de générer des chutes de pierres pouvant atteindre la voie ferrée. Aussi, la représentation cartographique du $D_{MEDCP, SE}$ permet de distinguer les deux valeurs, par une représentation sous forme d'histogramme.

La présentation cartographique des résultats (fig. 6.44) montre d'abord l'étendue des secteurs de parois éloignées par l'affichage d'un polygone les délimitant. La couleur du polygone indique la catégorie de priorité à laquelle le secteur appartient. Finalement, l'histogramme présente les valeurs de S_{SE} et A_{SE} et permet de constater rapidement si l'une des deux contribue d'avantage à augmenter la valeur du $D_{MEDCP, SE}$. L'ensemble des cartes nécessaires pour couvrir le territoire étudié sont présentées à l'annexe numérique « Categorisation_secteurs_eloignes.pdf ».

Pour chacun des secteurs, une fiche récapitulative de l'évaluation MEDCP est présentée à l'annexe numérique « Formulaires_secteurs_eloignes.pdf » et un exemple est donné à la figure 6.45. Cette fiche pourrait aussi servir de fiche de saisie de données lors de l'application à de nouveaux sites ou pour la réévaluation d'un secteur. Tous les paramètres qui doivent être évalués pour calculer le potentiel de rupture sont présents en plus des caractéristiques de base (dimension, points milliaires, orientation). La description du secteur ainsi qu'une photo et une image du modèle numérique de terrain avec les trajectoires simulées y sont aussi présentées.

6.5.2. Danger MEDCP des coupes de roc ($D_{MEDCP, CR}$)

Le $D_{MEDCP, CR}^b$ obtenu de la multiplication des potentiels de rupture (S_{CR}) et d'atteinte (A_{CR}) est présenté au tableau numérique « Coupes_de_roc_MEDCP.xlsx » et à la figure 6.46. Les coupes de rocs les plus susceptibles de générer des chutes de pierres pouvant atteindre la voie ferrée, selon la méthodologie appliquées, sont situées dans le coin supérieur droit du graphique de la figure 6.46. Les figures 6.47 et 6.48 présentent l'information des cantons Able et Jig en exemple. Ceci permet d'afficher les noms des coupes de roc et de visualiser rapidement quelles coupes sont de priorité 1 dans le canton. Les secteurs sont ensuite classés en catégories de priorité définies en fonction de la valeur du $D_{MEDCP, CR}^b$ (figs. 6.46 à 6.48 et tableau 6.2). La couleur du point indique si un potentiel de volume de plus de 5 m³ a été identifié (figs. 6.46 à 6.48).

Il y a 102 coupes de roc qui sont classées priorité 1 et 158 qui sont classées priorité 2. Le $D_{MEDCP, CR}^b$ ne considère pas la mitigation en place. Les cantons Baker, Fox et Jig sont ceux avec le plus de coupes de priorité 1. L'histogramme des priorités (fig. 6.46) ne correspond pas à celui obtenu des cotes terrain ou de l'inspection de 2009 (Golder et al. 2009). Pour faciliter la comparaison et la discussion qui suivra et dans laquelle les différences entre les systèmes de catégorisation seront expliquées, la figure 6.49 a été élaborée. La figure présente sous forme d'histogrammes la quantité de coupes dans chacune des catégories.

Le système de catégorisation utilisé par Golder Associés (2009) comporte six niveaux allant de 0, représentant un risque nul à très faible, à 5, représentant un risque extrêmement élevé. Le MEDCP ne comporte pas de catégorie équivalente à celle de risque extrêmement élevé, qui est utilisée lorsqu'un glissement en cours est observé et que la rupture se produira dans un avenir rapproché. La description de leurs catégories considère la distance de visibilité, et donc, elles comportent des notions se reliant aux conséquences. L'approche utilisée dans ces inspections incorpore aussi une notion temporelle. En effet, elle vise à reconnaître les coupes de roc représentant un risque dans le court terme, en ayant deux catégories qui représentent des coupes pour lesquels des travaux doivent être réalisés rapidement (immédiatement ou dans la prochaine année). Les priorités obtenues du MEDCP n'incorporent pas une telle notion temporelle. La priorité 1 n'est pas équivalente aux niveaux de risque extrêmement élevé et élevé des inspections. Elle est probablement plus similaire au niveau de risque modéré, ou les éléments défavorables

à la stabilité sont présents et, éventuellement, la coupe de roc produira des chutes de pierres qui pourraient atteindre la voie ferrée.

Les cotes terrain ont été attribuées un peu à la manière d'une inspection, donc elles se différencient des priorités du MEDCP. La cote terrain 1 était réservée à des cas particuliers, où nous considérons qu'une étude plus poussée serait nécessaire pour bien évaluer la stabilité de la paroi. La catégorie 2 était attribuée à des coupes de roc avec plusieurs éléments défavorables et des historiques de chutes de pierres connues en plus d'avoir reconnu des masses précaires. La catégorie 3 regroupait les coupes de roc avec des caractéristiques montrant un potentiel important de génération des chutes de pierres, mais qui ont moins de potentiel de causer un arrêt de la voie ferrée que celles de catégories 2. Les coupes de catégories 4 ont été jugées peu problématiques pour la voie ferrée, alors que celle de catégorie 5 ne seraient pas du tout ou très faiblement problématiques.

Ainsi, les classes n'ont pas la même signification d'un système de cotation à l'autre, ce qui explique que l'histogramme n'a pas la même allure pour les trois méthodes, soit: le MEDCP, l'inspection et les cotes terrain. Le MEDCP ne différencie pas les coupes de roc par rapport à l'urgence de l'intervention nécessaire, mais reconnaît les coupes les plus susceptibles de générer une rupture qui pourrait atteindre la voie ferrée. Le D_{MEDCP} est plus systématique et moins influencé par l'imminence des ruptures.

La version cartographique du MEDCP indique, par la présence d'un astérisque rouge, lorsque qu'une coupe de roc a reçu une priorité plus élevée sur le terrain que celle attribuée par le MEDCP. Cette situation se présente très rarement. Dans cette étude, une telle situation survient pour quatre coupes de roc. L'une d'elles est la coupe de roc E20 E PM 71.82, qui est présentée dans la section 6.4 sur les potentiels de grands glissements. Dans ce cas précis, la différence entre la cote terrain et le D_{MEDCP} est expliquée par la complexité de la géométrie et des mécanismes de rupture en jeu dans cette paroi. Lors de l'évaluation terrain, c'est en raison de la complexité que la priorité 1 avait été attribuée à cette paroi et signifiait que sa caractérisation pourrait requérir une analyse plus détaillée. Les autres sont les coupes A14 W, D30 W et F29 E. Côté méthodologique, la présence de cet astérisque signifie qu'une attention particulière devrait être portée à cette coupe. Cette attention peut être requise pour diverses raisons, dont une observation d'un inspecteur qui indique une intervention à priorisée ou alors, qu'une analyse plus poussée est nécessaire pour bien évaluer le danger.

La version cartographique des résultats incorporent aussi des astérisques verts, qui signifient l'opposé du même symbole rouge. Le symbole est associé aux coupes de roc pour lesquelles le danger a été jugé très faible lors de l'observation terrain. Le symbole est associé à plusieurs parois et ceci reflète que le MEDCP ne tient pas compte de l'imminence de rupture.

Le classement des coupes de roc sera certainement modifié par l'intégration du facteur M , qui permet de prendre en considération l'impact des moyens de mitigation sur la diminution du danger (Eq. 6.5).

$$D_{MEDCP}^r = D_{MEDCP}^b \times (1 - M) \quad [6.5]$$

La base de données comprend 46 coupes, pour lesquelles de la mitigation a été observée lors des travaux de terrain. Des 102 coupes classées priorité 1 en utilisant $D_{CR, MEDCP}^b$, 29 ont eues des travaux de mitigation. Les méthodes de mitigations notées sont variées, allant de quelques boulons à des filets couvrant près de l'entièreté d'une paroi. Les travaux d'écaillage passés ne sont pas toujours reconnaissables lors de

l'observation terrain. Ainsi, ces travaux n'ont pas été considérés dans les résultats présentés dans ce rapport. Il serait pertinent de relier la base de données avec les informations sur les travaux d'écaillage.

Pour illustrer l'effet du facteur M sur le $D^r_{MEDCP, CR}$, deux scénarios sont présentés. Le premier fixe le facteur M à 0.5 pour toutes les coupes de roc avec mitigation, et ce, peu importe la mitigation en place. Le deuxième utilise un M de 0.9 qui est appliqué aux 46 coupes de roc avec mitigation. Le deuxième scénario représente une situation où les travaux sont très efficaces, alors que le premier illustre des cas de mitigation dont l'efficacité est incertaine. Les figures 6.50 et 6.51 illustrent l'effet du facteur M sur le classement des coupes classées priorité 1 selon $D^b_{MEDCP, CR}$. Dans les deux scénarios, les coupes de roc avec mitigation perdent des places dans l'ordre séquentiel (fig. 6.51) Les points bleus sont les $D^r_{MEDCP, CR}$, alors que les croix grises sont les $D^b_{MEDCP, CR}$. L'annotation associée aux points $D^b_{MEDCP, CR}$ pour lesquels il y a une correction M , est le nombre de positions perdues dans le classement. Par exemple, une coupe avec un symbole de -20, pourrait indiquer que la coupe est passée de la 10^e valeur de $D^b_{MEDCP, CR}$ la plus élevée à la 30^e valeur la plus élevée de $D^r_{MEDCP, CR}$. Les différences sont beaucoup plus marquées dans le cas $M = 0.9$ (fig. 6.51). L'effet sur le nombre de coupes par catégorie n'est pas très marqué pour le scénario $M=0.5$, par contre il est important lorsque le $M=0.9$, puisque les 29 coupes de priorité 1 avec mitigation passent dans la catégorie de priorité 2 (fig. 6.50). Il est intéressant de noter qu'il y a environ 56 coupes de catégorie 1 pour lesquelles il n'y pas de mitigation qui était apparente lors de l'étude et dont la catégorie demeure la même (i.e. $M = 0$). La prise en compte des travaux d'écaillage pourrait changer cette situation.

Les résultats sont aussi présentés de manière cartographique pour l'ensemble du territoire à l'annexe «Coupes_de_roc_Cartographie.pdf» et un exemple est présenté à la figure 6.52. La catégorie de priorité associée au $D^b_{MEDCP, CR}$ est indiqué par la couleur des traits représentant les coupes de roc. Les histogrammes indiquent la valeur des paramètres S_{CR} , A_{CR} et pour l'instant la présence de mitigation (0.5=mitigation en place et 0=aucune mitigation notée), qui devrait être remplacé par M lorsqu'il sera évalué. Il s'agit des trois paramètres de l'équation permettant de calculer $D^r_{MEDCP, CR}$.

Tableau 6-2. Quantité de coupes de roc classées dans chacune des cinq classes de priorité, pour tout le secteur étudié et par canton. Le chiffre entre parenthèses indique le nombre de coupes dans ce canton.

Priorité	Nombre de coupes de roc (425)	A (42)	B (36)	C (59)	D (49)	E (46)	F (74)	G, H et I (21)	J (90)	K (8)
1 (plus prioritaire)	102	5	16	6	13	8	17	1	35	1
2	158	16	10	27	21	17	26	11	30	0
3	75	11	5	10	7	15	7	5	13	2
4	87	9	2	11	3	4	14	3	7	5
5 (moins prioritaire)	81	1	3	5	5	2	10	1	5	0

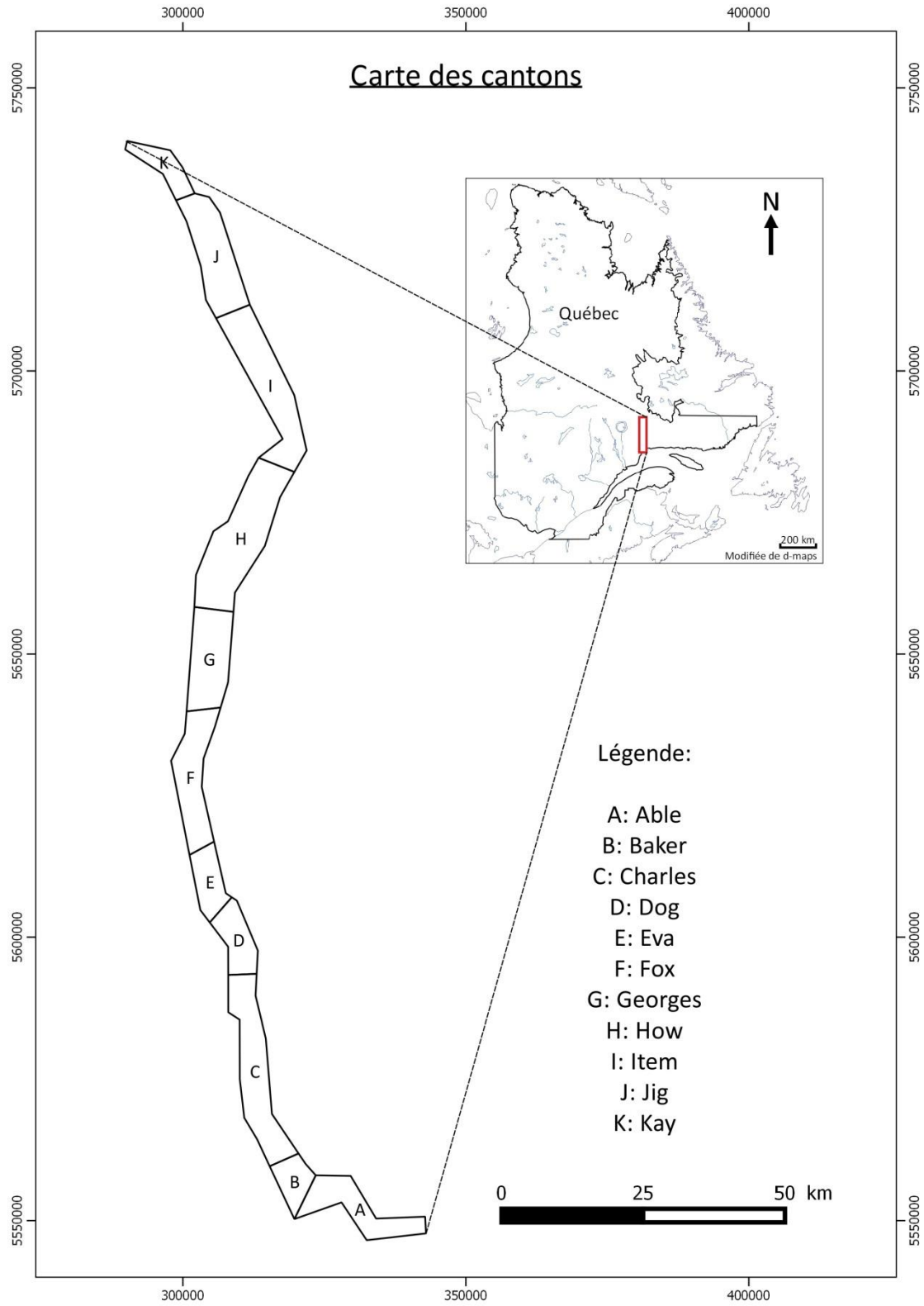


Figure 6.1. Carte générale du secteur à l'étude montrant les différents secteurs couverts par la carte morphostructurale.

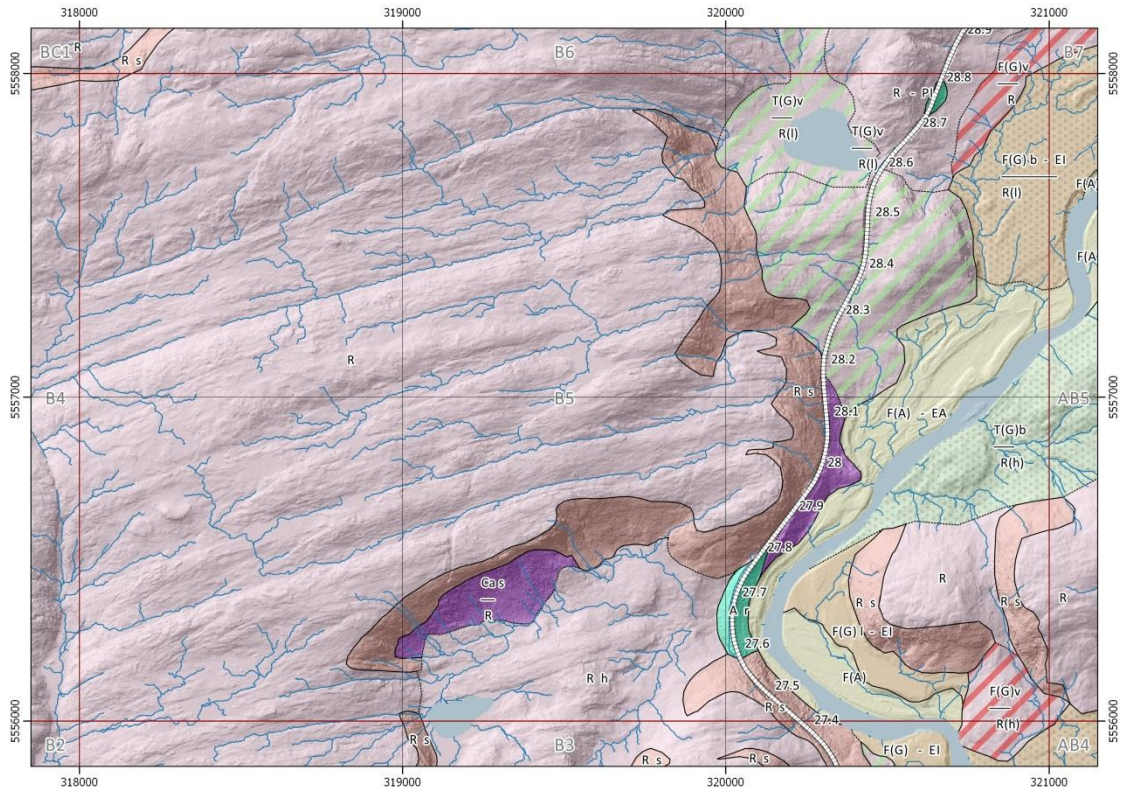


Figure 6.2. Exemple du contrôle de la roche en place sur le drainage (canton Baker).

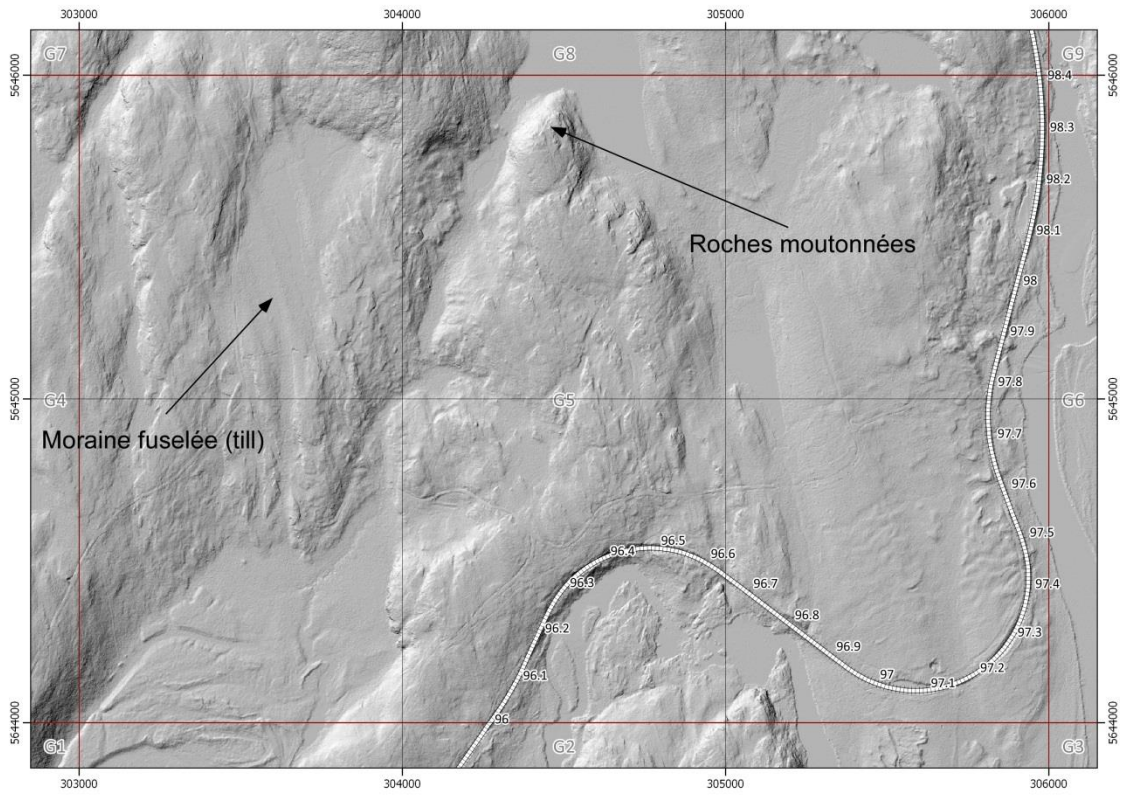


Figure 6.3. Illustration de la trace laissée par l'écoulement glaciaire sur le substratum rocheux par l'érosion directe la roche en place sous la forme de roches moutonnées ainsi que par la mise en place de moraine fuselée. Tout est orienté vers le sud et n'est pas ici influencé par la structure de la roche en place (canton Georges).

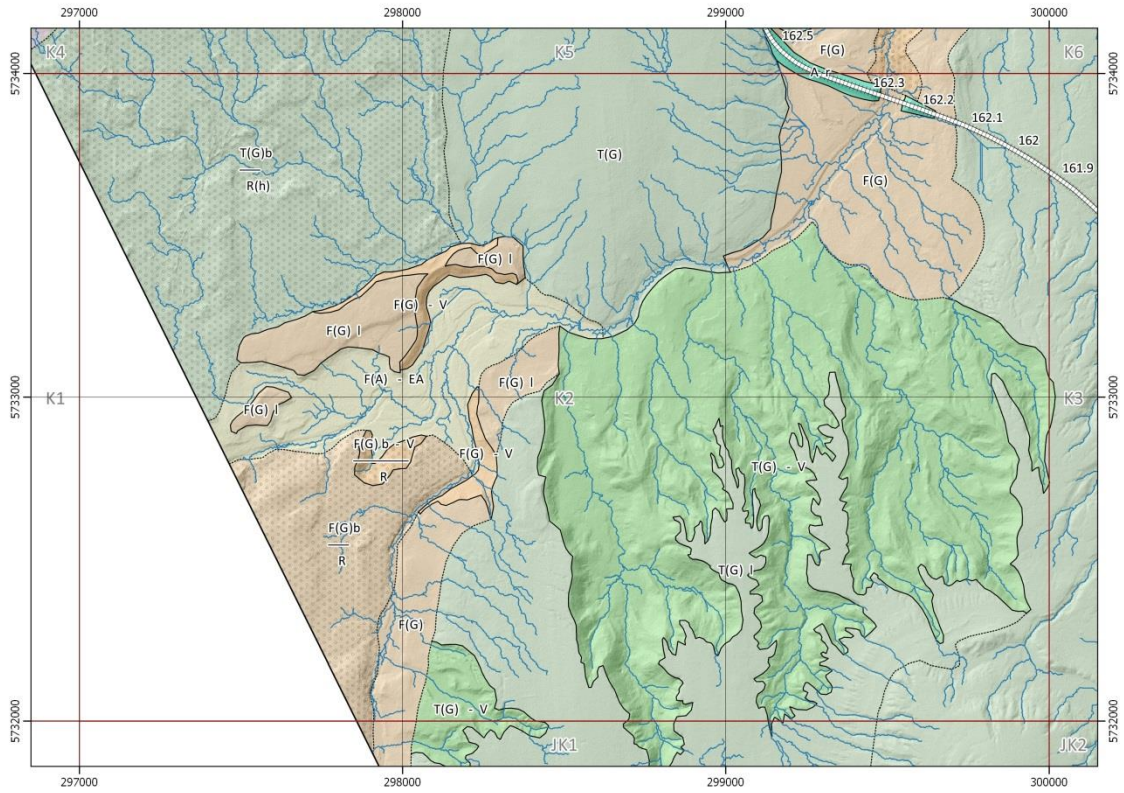


Figure 6.4. Exemple de dépôts morainique (till) formé principalement de sables et de graviers (au centre de la figure, T(G)-V) et qui est fortement disséqué par du ravinement (V).

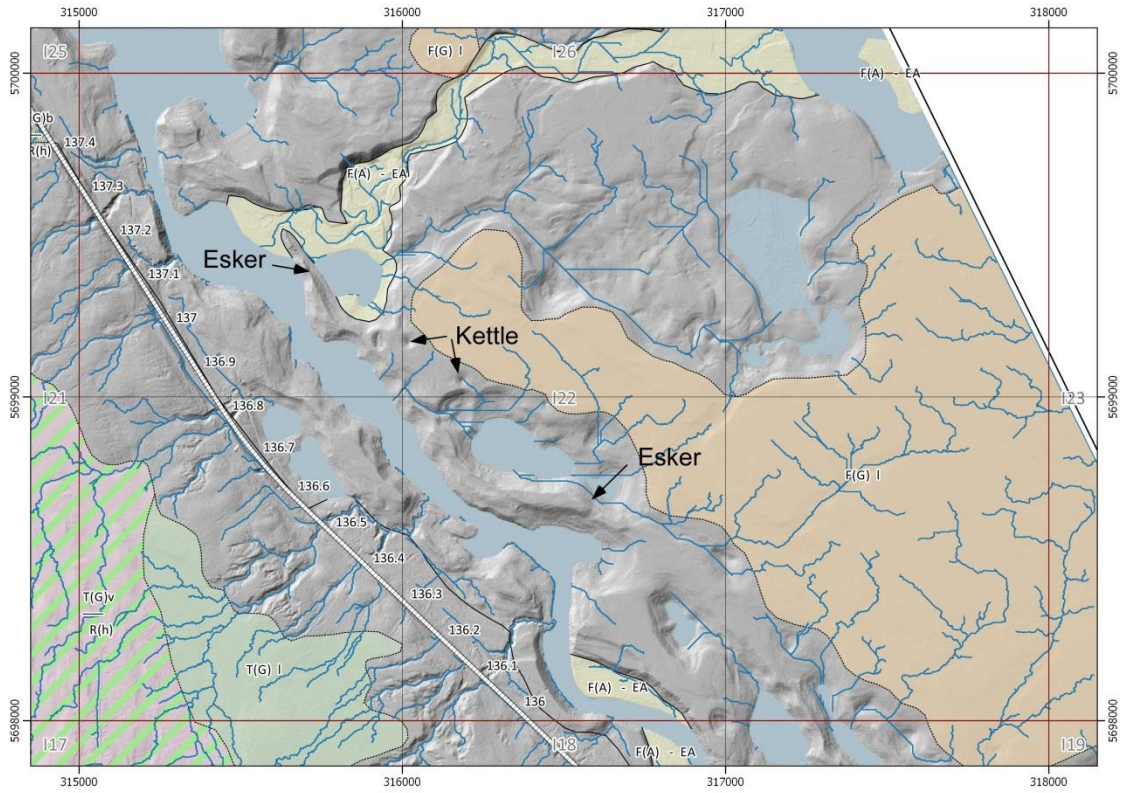


Figure 6.5. Exemple spectaculaire de dépôts fluvioglaciaires de contact de glace mis en place lors de la déglaciation du territoire. On y retrouve un esker le long duquel d'autres dépôts fluvioglaciaires de contact de glace ont été mis en place. La proximité de la glace lors de la déposition est mise en évidence par la présence de multiples kettles (lacs plus ou moins circulaires) (canton Item).

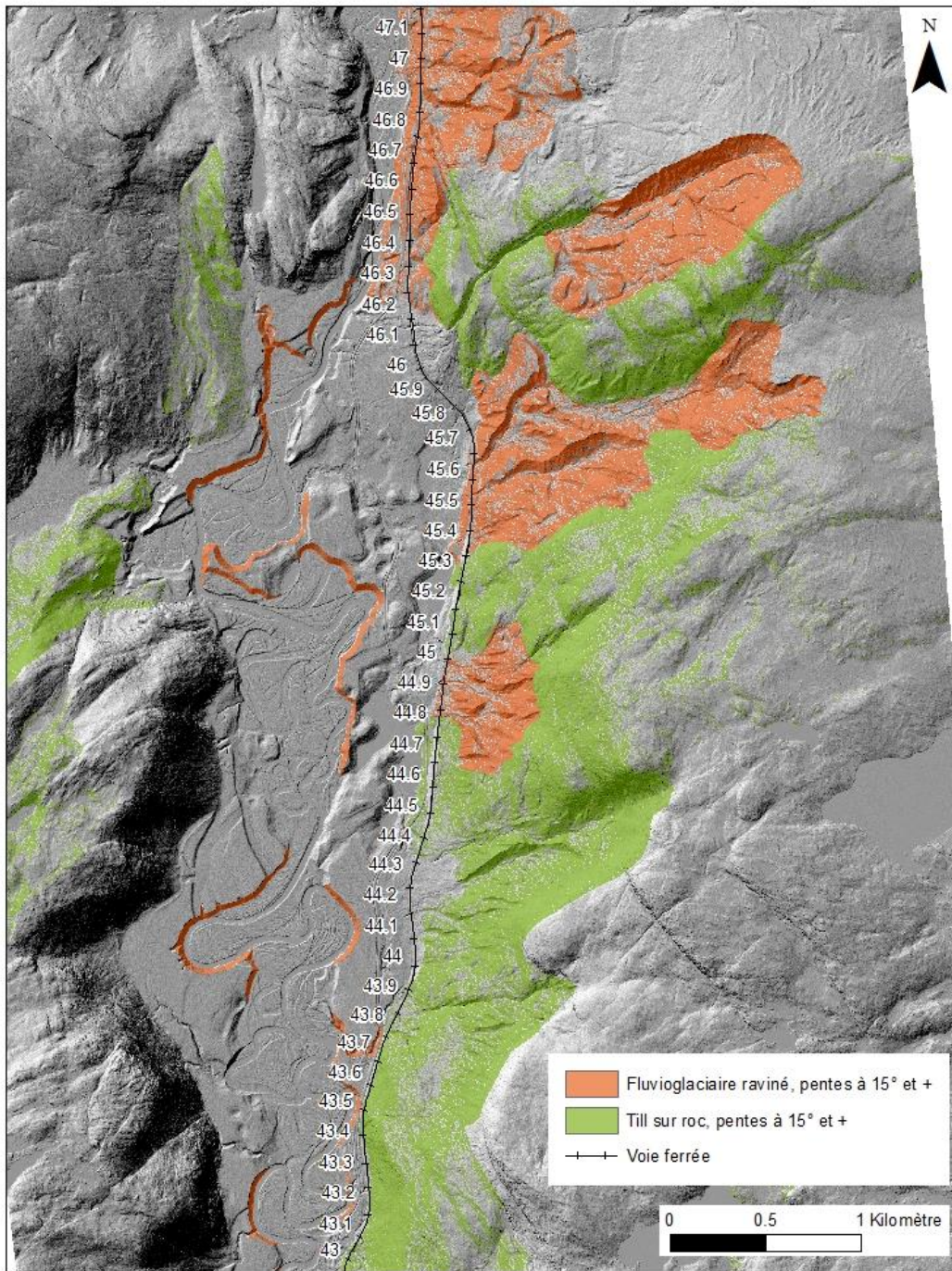


Figure 6.6a Exemple de carte thématique montrant les secteurs pouvant potentiellement être des sources pour des coulées de débris ou des glissements rotationnels.

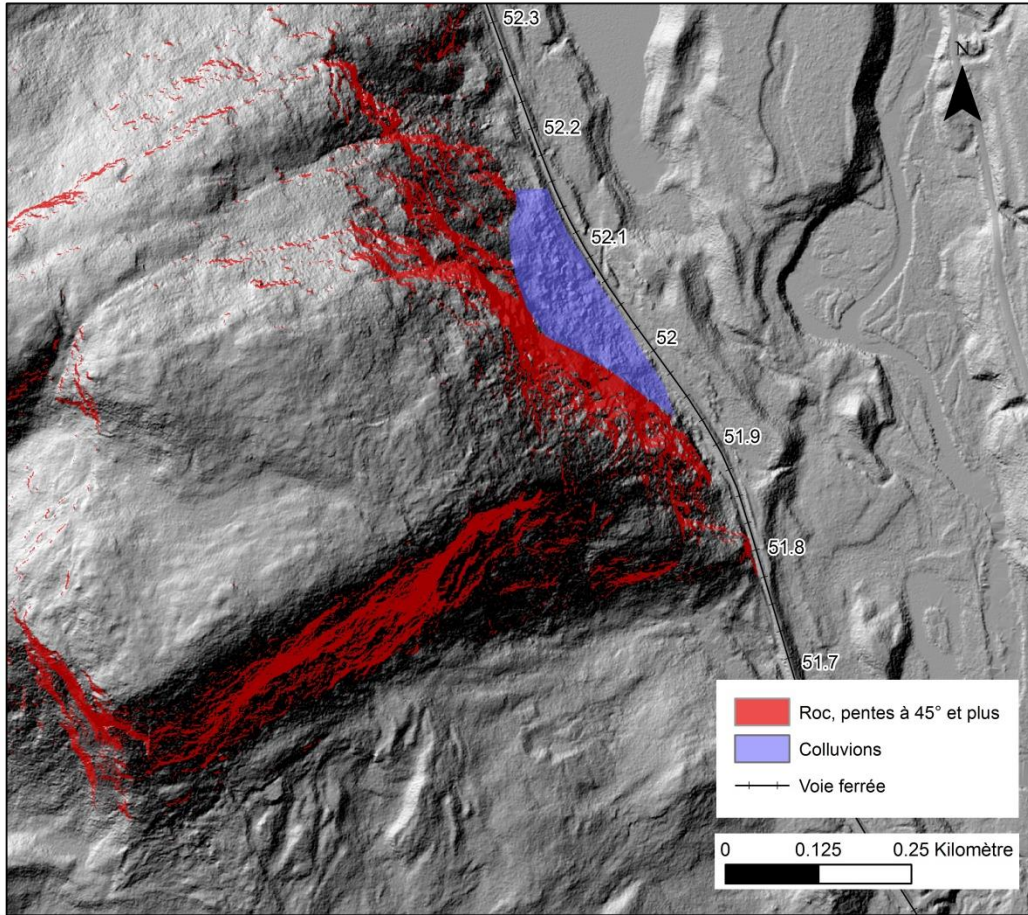


Figure 6.6b. Exemple de carte thématique montrant un dépôt de colluvions associé aux débris provenant d'une falaise rocheuse.

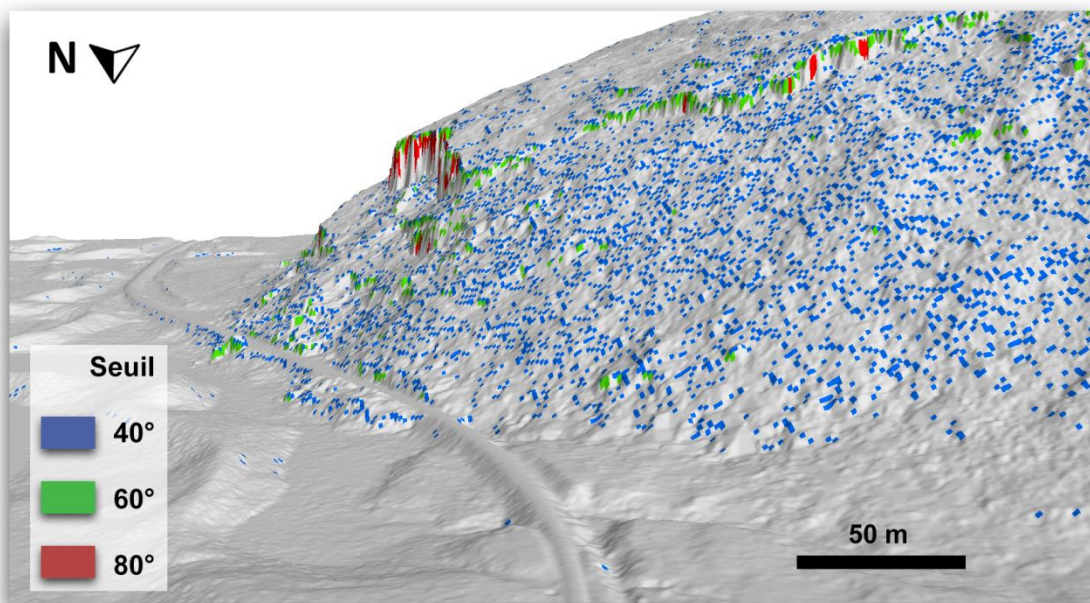


Figure 6.7. Sommets automatiquement identifiés pour le PM 50.3. Les sommets identifiés avec les seuils de 40°, 60° et 80° sont respectivement représentés en bleu, vert et rouge.

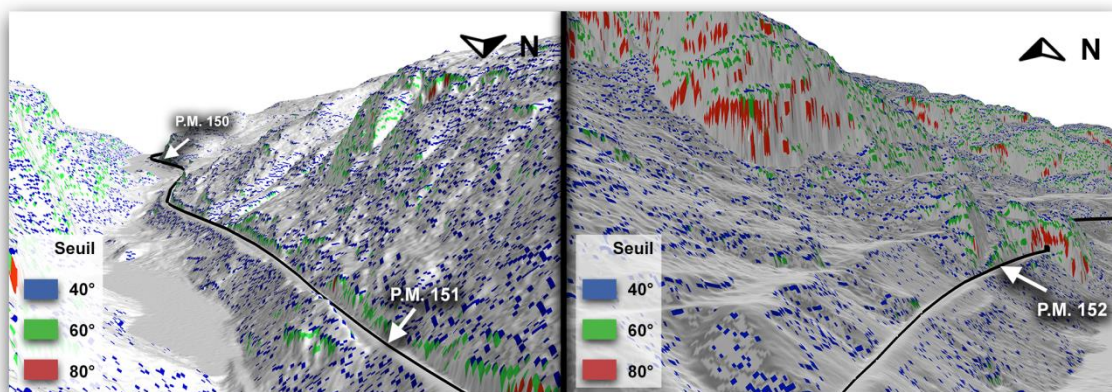


Figure 6.8. Sommets automatiquement identifiés pour les secteurs des environs des PM 151 (à gauche) et 152 (à droite). Les sommets identifiés avec les seuils de 40°, 60° et 80° sont respectivement représentés en bleu, vert et rouge. On remarque aussi que les pixels au niveau des pentes abruptes couvrent une plus grande surface que ceux des pentes moins importantes.

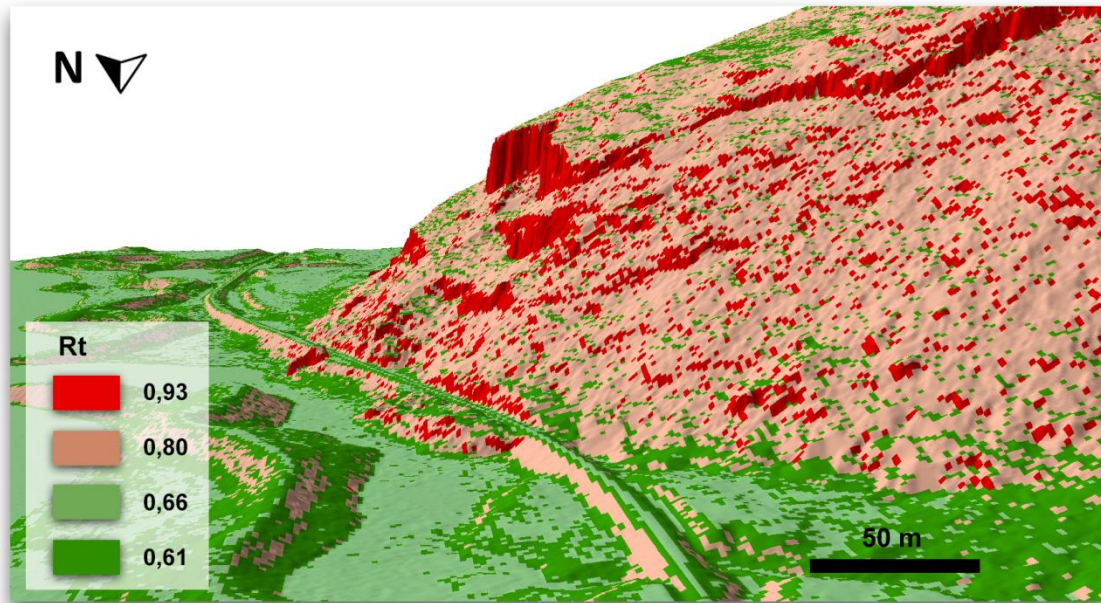


Figure 6.9. Carte des coefficients de restitution tangentiels correspondant aux rugosités de terrain automatiquement identifiés par les outils développés en fonction des classes de pentes choisies pour le secteur du PM 50.3. Pour les valeurs de Rn (coefficients de restitution normaux se référer à la fig. 4.11).

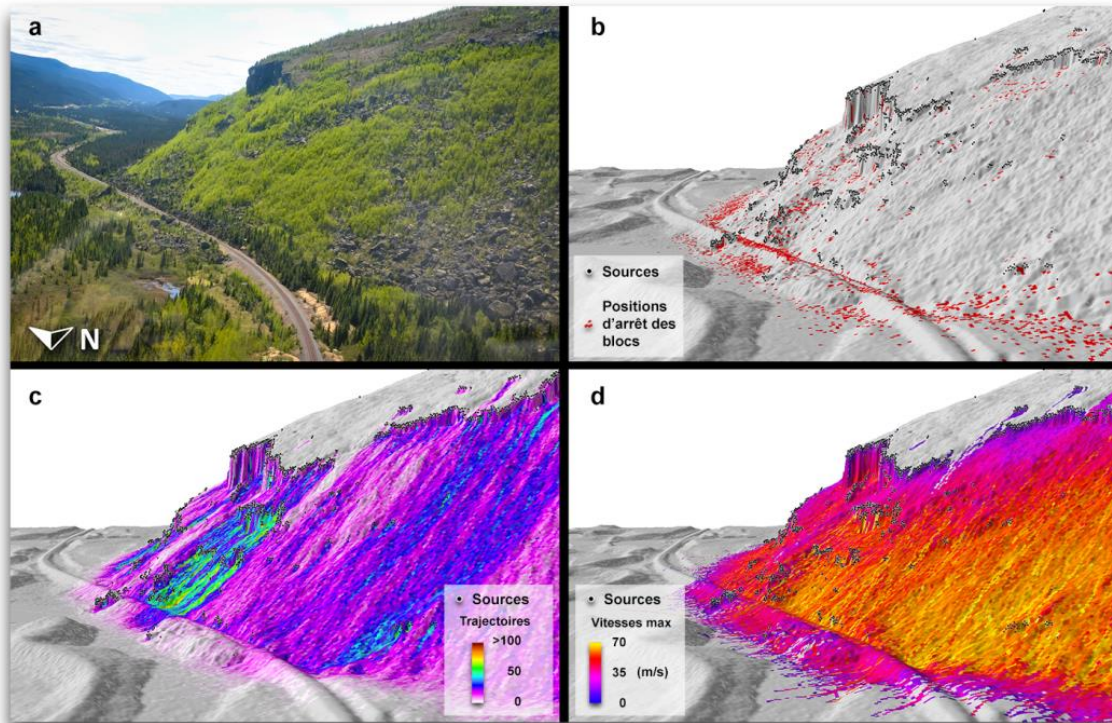


Figure 6.10. Différents résultats des simulations pour le PM 50.3 pour le scénario des sources identifiées aux sommets avec un seuil de 60° . En a), photographie du secteur en guise de référence. En b), l'accumulation des blocs simulés est représentée par les pixels colorés en rouge. En c), le nombre de trajectoires passant en chaque pixel est représenté par le large spectre de couleurs. Les sources à partir desquelles les trajectoires sont simulées sont représentées par les points noirs. En d), la vitesse maximale des trajectoires en chaque pixel est représentée, avec les couleurs froides correspondant aux faibles vitesses et les couleurs chaudes aux vitesses élevées.

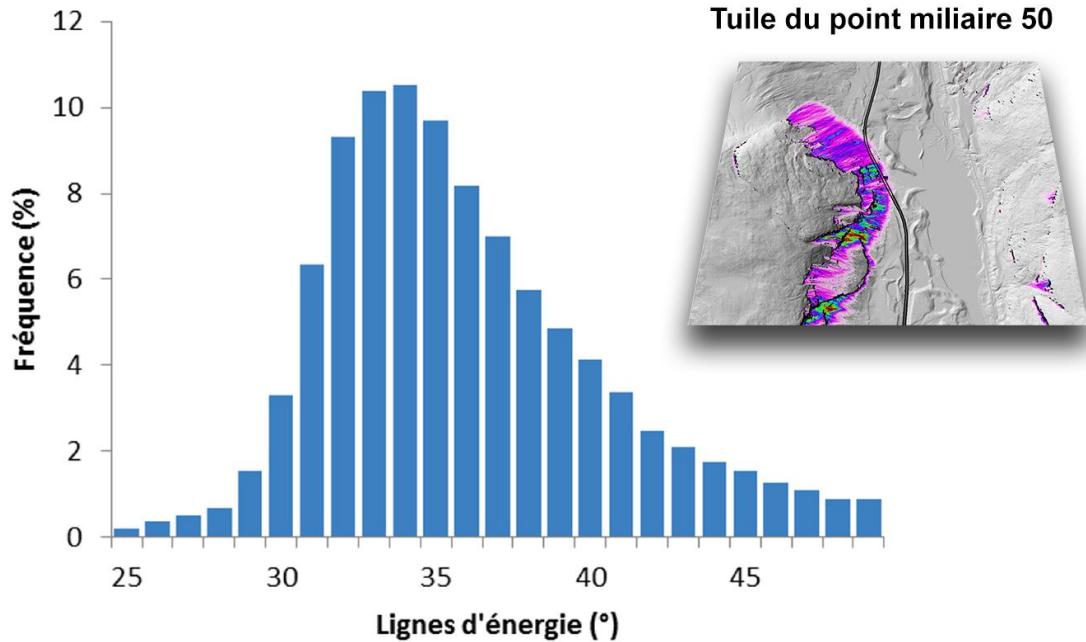


Figure 6.11. Lignes d'énergies des trajectoires simulées avec les sources identifiées avec un seuil de 60°, pour le secteur du PM 50.3.

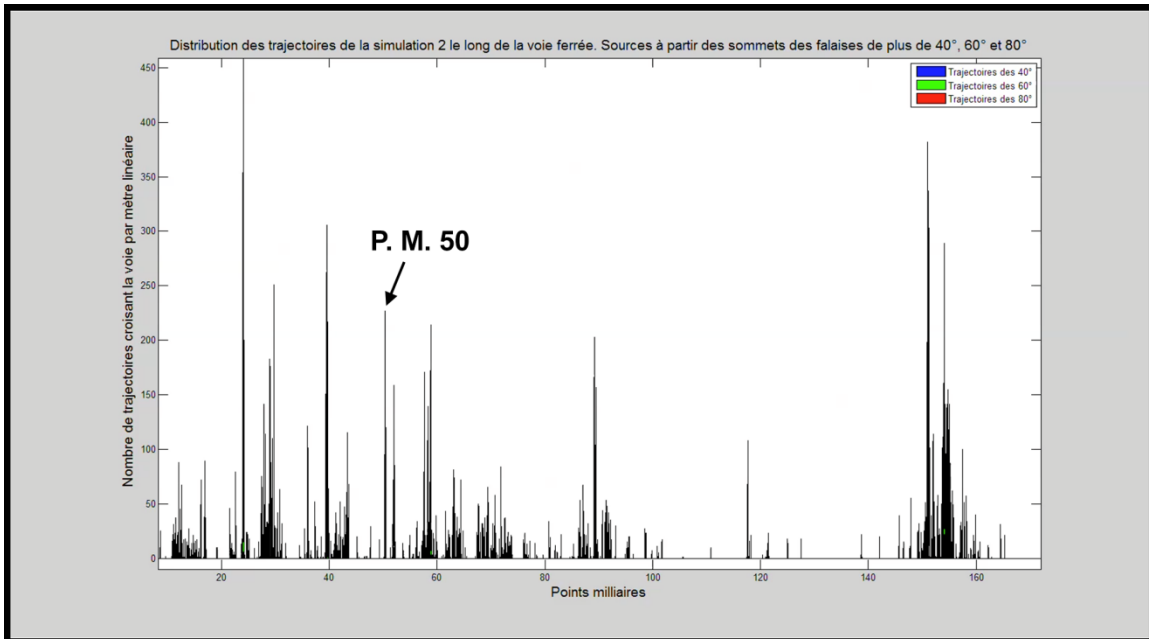


Figure 6.12. Histogramme compilant l'ensemble des trajectoires simulées atteignant l'ouvrage en chaque mètre pour les trois scénarios de sources (avec des seuils de 40°, 60° et 80°). Le secteur du PM 50 est indiqué par une flèche. Le large secteur peu affecté par les trajectoires entre les miles 100 et 145 correspond principalement aux cantons How et Item et est suivi par les canyons où il y a de nombreuses atteintes. Le terme « simulation 2 » utilisé ici dans le titre correspond aux simulations réalisées en plaçant les sources aux sommets, contrairement à la « simulation 1 » réalisée sur l'ensemble des terrains en plaçant les sources au niveau des pentes abruptes et non présentée dans ce rapport.

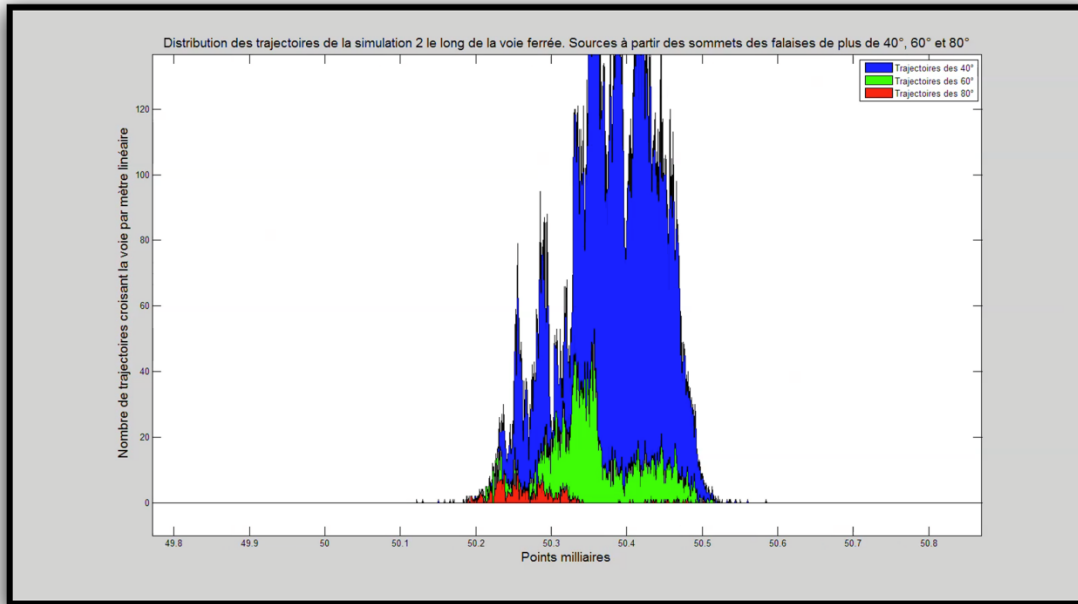


Figure 6.13. Histogramme des trajectoires simulées atteignant l'ouvrage en chaque mètre pour les trois scénarios de source. Secteur agrandi pour montrer le mile du PM 50. Le nombre de trajectoires croisant l'ouvrage provenant du premier scénario, avec les sources identifiées pour un seuil de 40°, est représenté par les barres bleues. Celles représentées par les barres vertes correspondent au second scénario, utilisant un seuil de 60°. Celles représentées par les barres rouges correspondent au troisième scénario, utilisant un seuil de 80 ° pour définir les sommets des falaises pour l'emplacement des sources.

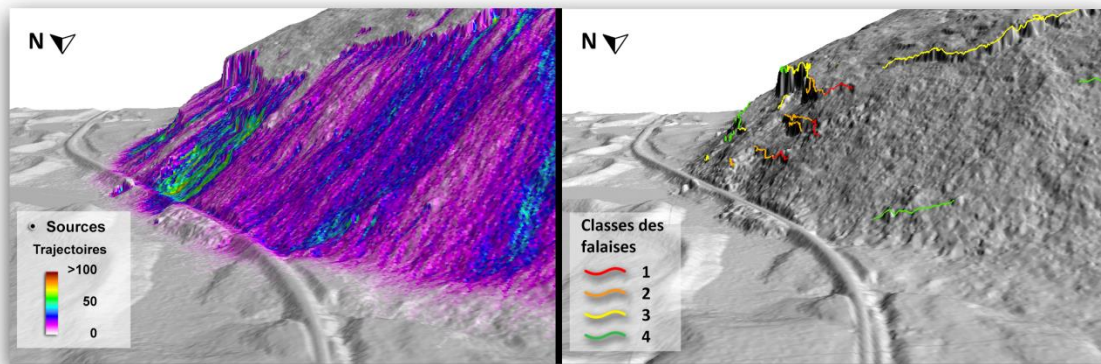


Figure 6.14. Nombre de trajectoires passant en chaque pixel (à gauche) avec la classification des sommets de falaise associée pour les environs du PM 50 (à droite). Elle se base sur l'analyse des trajectoires atteignant l'ouvrage, faite à l'aide des histogrammes et des cartes des trajectoires pour les scénarios de sources avec les seuils de 60° et 80°. Les sommets produisant des trajectoires simulées qui atteignent l'ouvrage sont classés en fonction du nombre de trajectoires au niveau de l'ouvrage. Plus le nombre est élevé et plus la catégorie s'approche de 1 (fig. 6.16).

Classe	Potentiel d'atteinte préliminaire	Critères de classification du second scénario (sources avec seuil de 60°)	Critères de classification du troisième scénario (sources avec seuil de 80°)
1	++++	Parois dont les trajectoires atteignent en majorité l'infrastructure, avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel dépassant les 50 trajectoires.	Parois dont les trajectoires atteignent en majorité l'infrastructure, avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel dépassant les 30 trajectoires.
2	+++	Parois dont les trajectoires atteignent régulièrement l'infrastructure, mais avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel situé entre 20 et 50 trajectoires.	Parois dont les trajectoires atteignent régulièrement l'infrastructure, mais avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel situé entre 10 et 30 trajectoires.
3	++	Parois dont les trajectoires atteignent régulièrement l'infrastructure, mais avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel ne dépassant pas les 20 trajectoires.	Parois dont les trajectoires atteignent régulièrement l'infrastructure, mais avec un nombre de trajectoires au niveau de la voie en chaque pixel ne dépassant pas les 10 trajectoires.
4	+	Parois produisant quelques rares trajectoires uniques qui atteignent l'infrastructure exceptionnellement.	Parois produisant quelques rares trajectoires uniques qui atteignent l'infrastructure exceptionnellement.

Figure 6.15. Récapitulatif des critères de classification arbitraires des parois rocheuses en fonction du nombre de trajectoire atteignant l'ouvrage vis-à-vis la paroi.

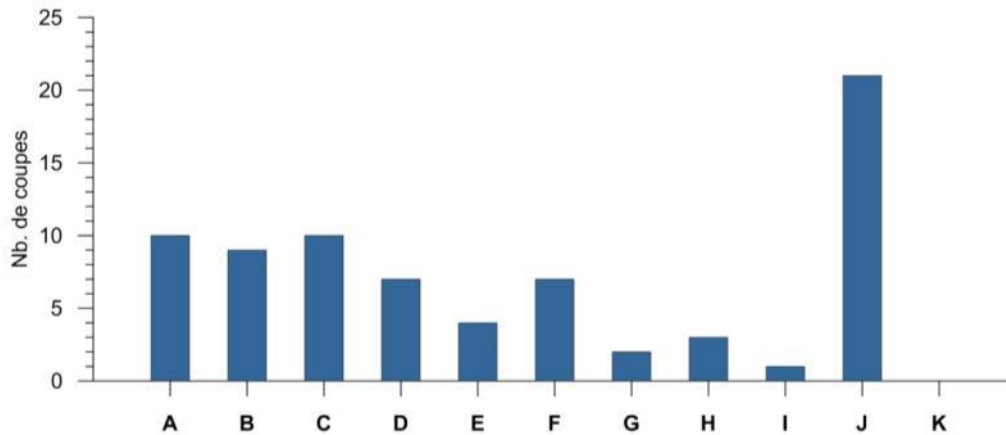


Figure 6.16. Répartition des secteurs de parois éloignées par canton.

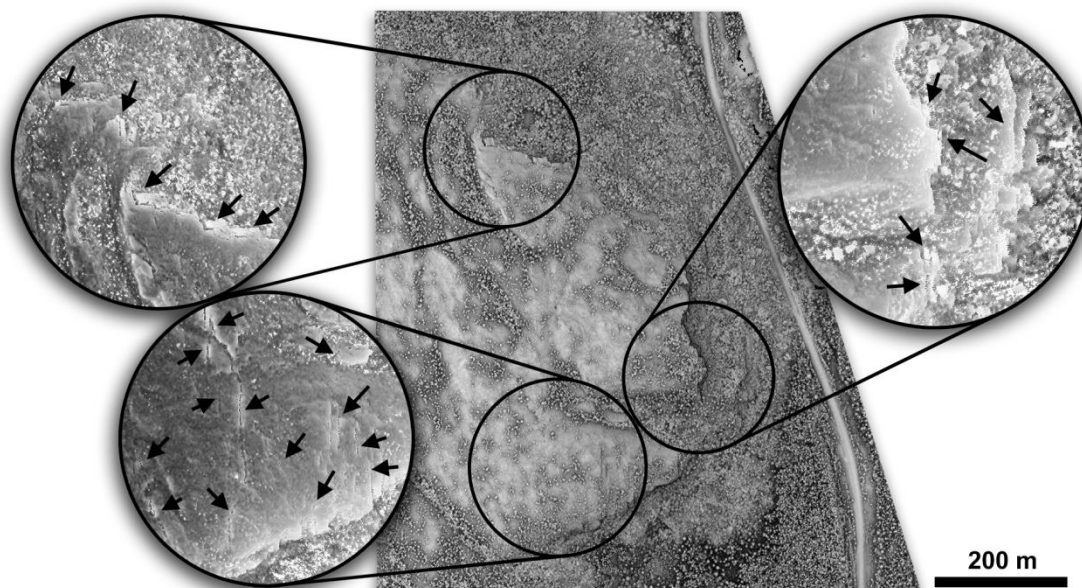


Figure 6.17. Analyse des traces éventuelles de chutes de pierres sur nuage de points brut (avec les arbres) provenant des données LiDAR aéroportées du secteur du PM 50.3. L'observation des données brutes permet d'atteindre un niveau de détail supérieur par rapport aux données rasterisées (MNT). Il est possible d'y observer la taille des arbres et leur densité, de même que les blocs en pied de falaise. Ici, la végétation est peu mature (petits feuillus) et éparpillée au niveau du talus d'éboulis. Les portions agrandies sont réalisées à partir des données brutes. Elles sont cependant observées par en dessous afin de faire ressortir le sol sous la végétation et les éventuelles fissures subverticales. Les flèches noires pointent ici ce qui semble être des fissures ouvertes et des blocs désolidarisés.

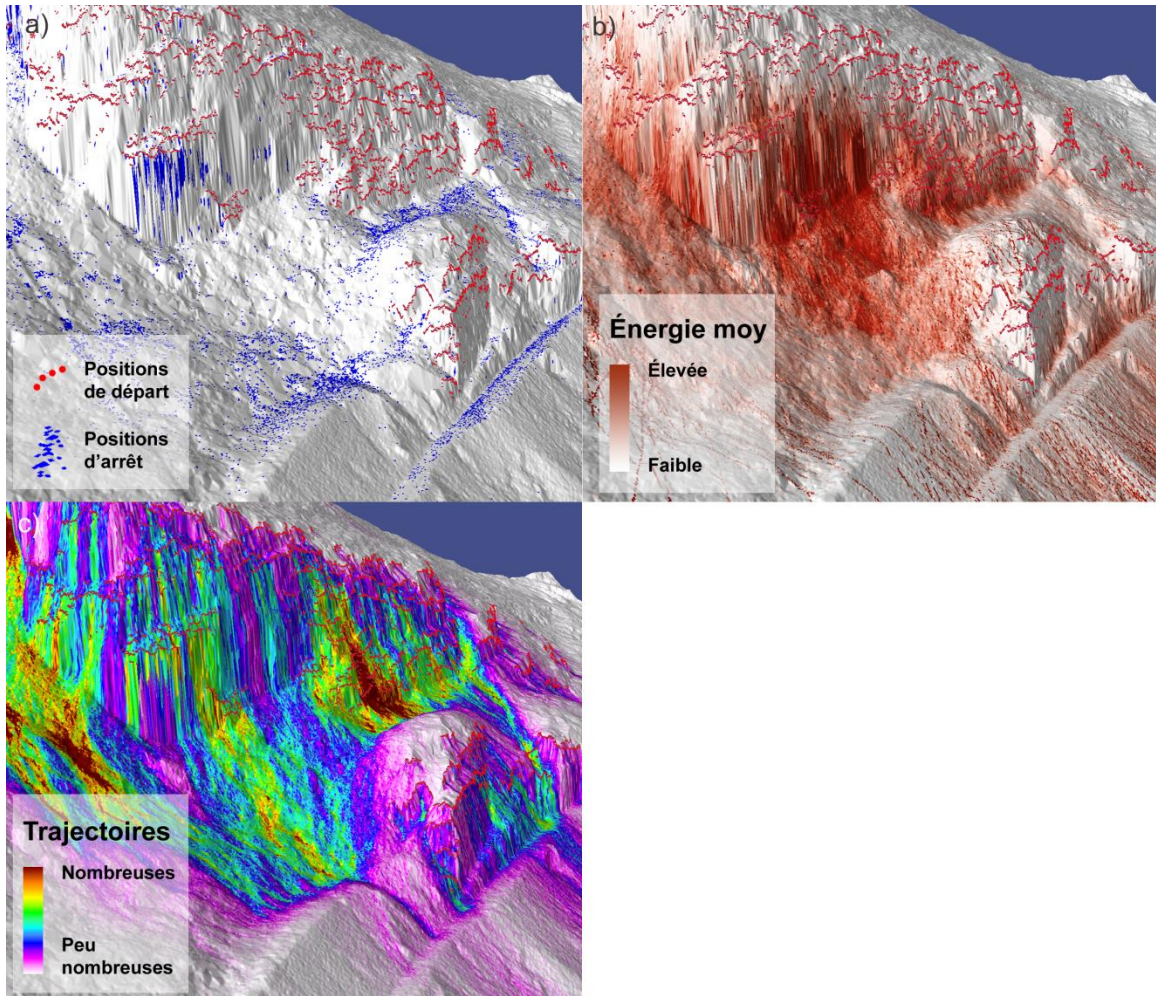


Figure 6.18. Résultats des analyses trajectographiques au PM 157.5. La figure (a) montre la position de départ et la position d'arrivée des blocs, la figure (b) montre l'énergie relative qu'ont ces blocs. La figure (c) montre les densités de trajectoires des blocs. Les images a et c pour chacun des secteurs de parois éloignées se trouvent dans l'annexe «Atteinte_Secteurs_Eloignes.pdf»

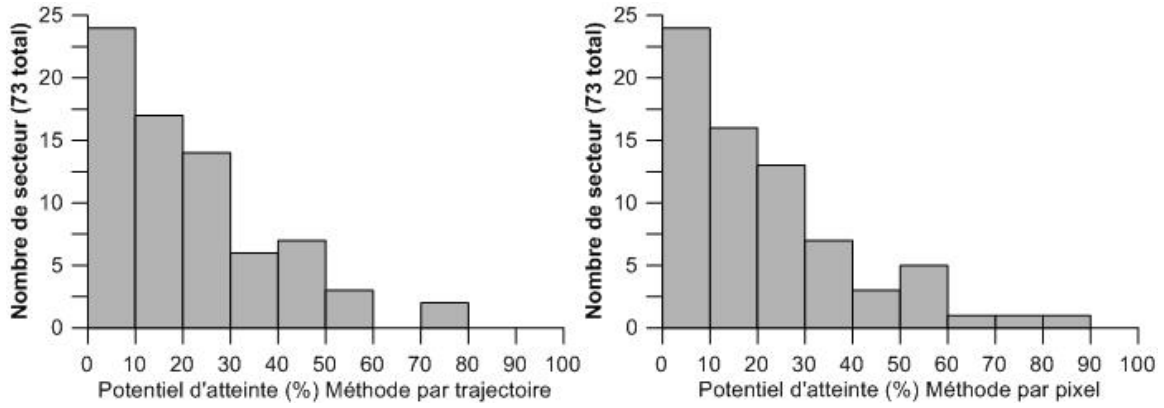


Figure 6.19 Histogramme du potentiel d'atteinte des parois éloignées en fonction du nombre de coupes pour les méthodes par pixel et par trajectoires.

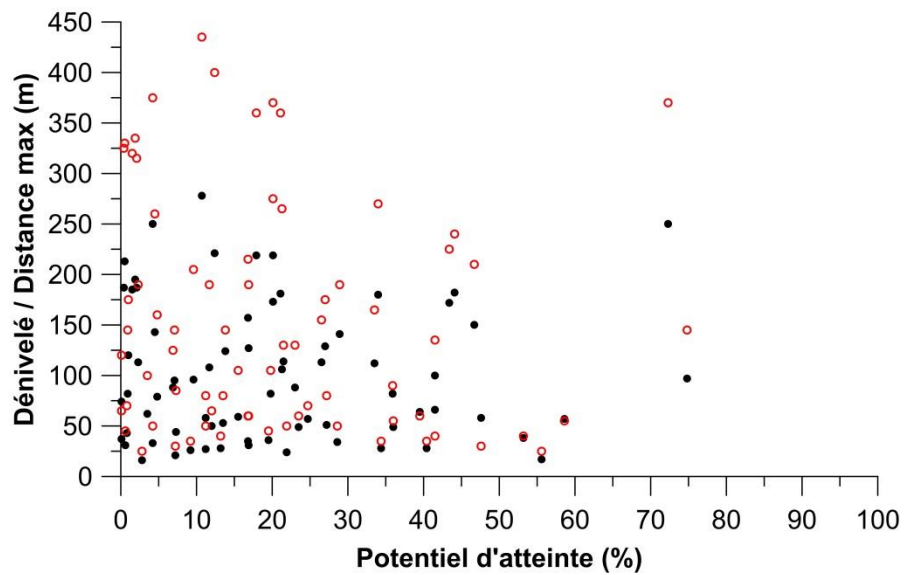


Figure 6.20. Les potentiel d'atteinte obtenus ne semblent pas dépendent du dénivelé (disques noirs) des secteurs éloignés, ni de la distance horizontale maximale séparant les crêtes de la voie ferrée (cercles rouges).

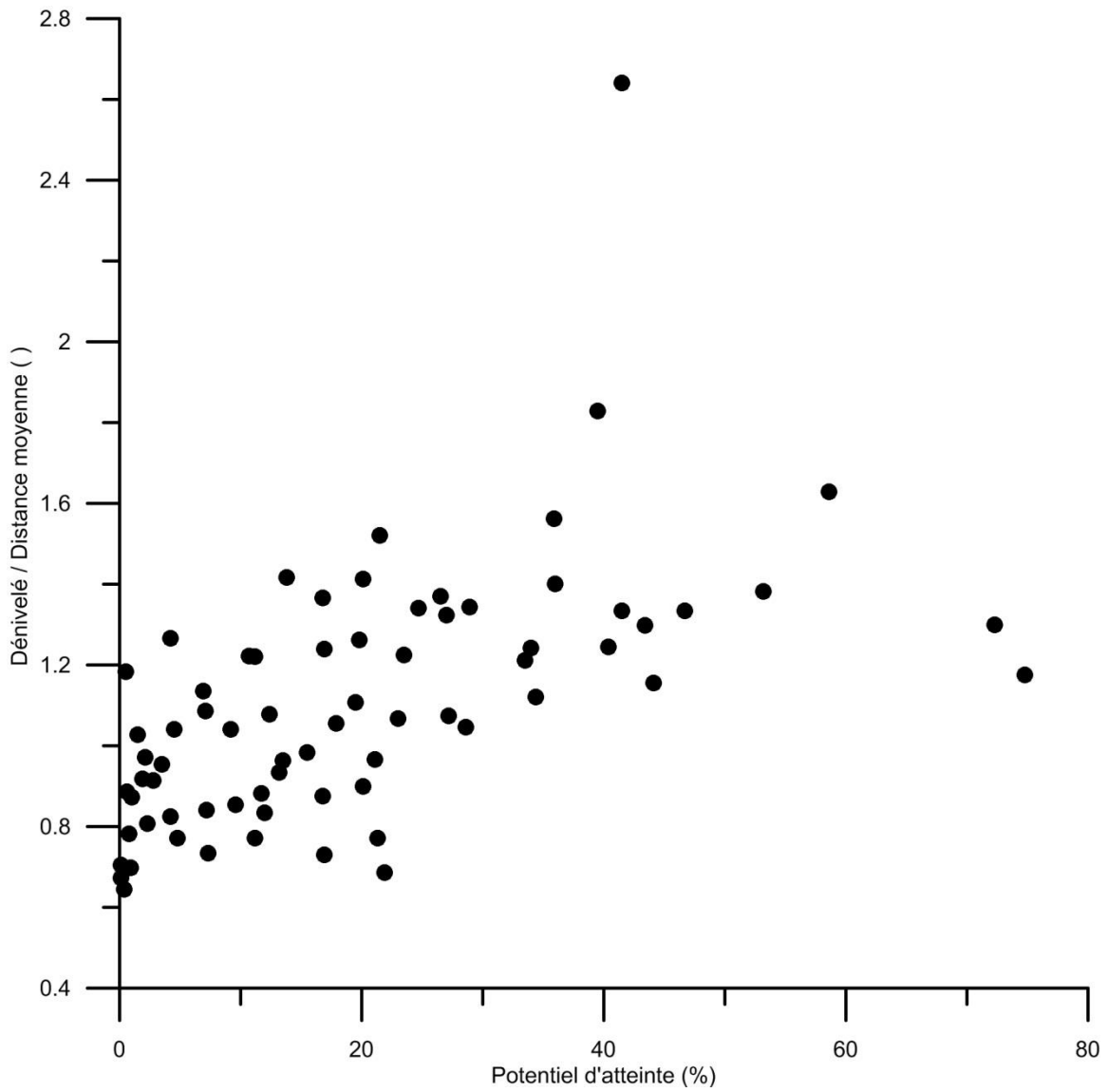


Figure 6.21. Une corrélation est obtenue entre le potentiel d'atteinte et le rapport dénivelé sur distance moyenne entre la paroi et la voie ferrée.

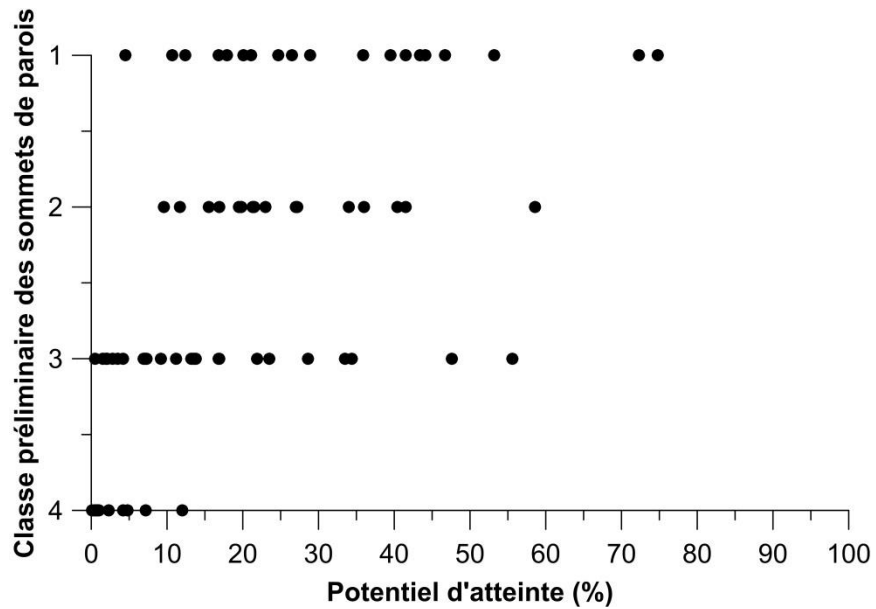


Figure 6.22. Une faible corrélation est trouvée entre le classement préliminaire des crêtes formant les secteurs éloignés en fonction du potentiel d'atteinte du secteur éloigné.

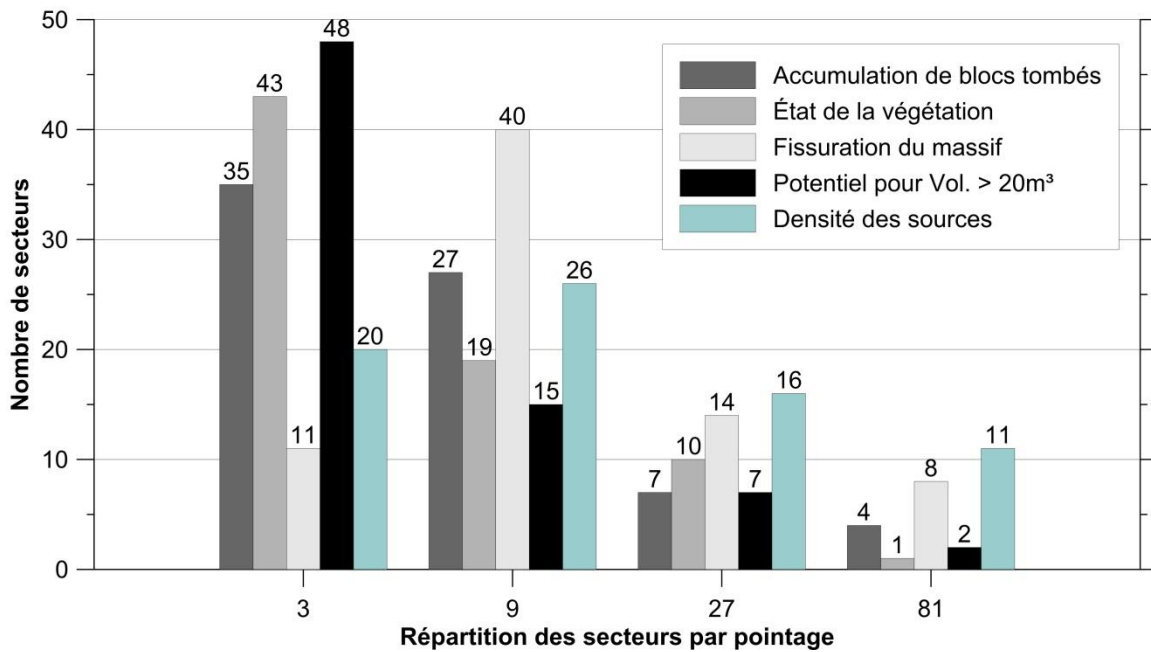


Figure 6.23 Distribution des pointages attribués aux paramètres du potentiel de rupture (S_{se}) pour les 73 secteurs de parois éloignées.

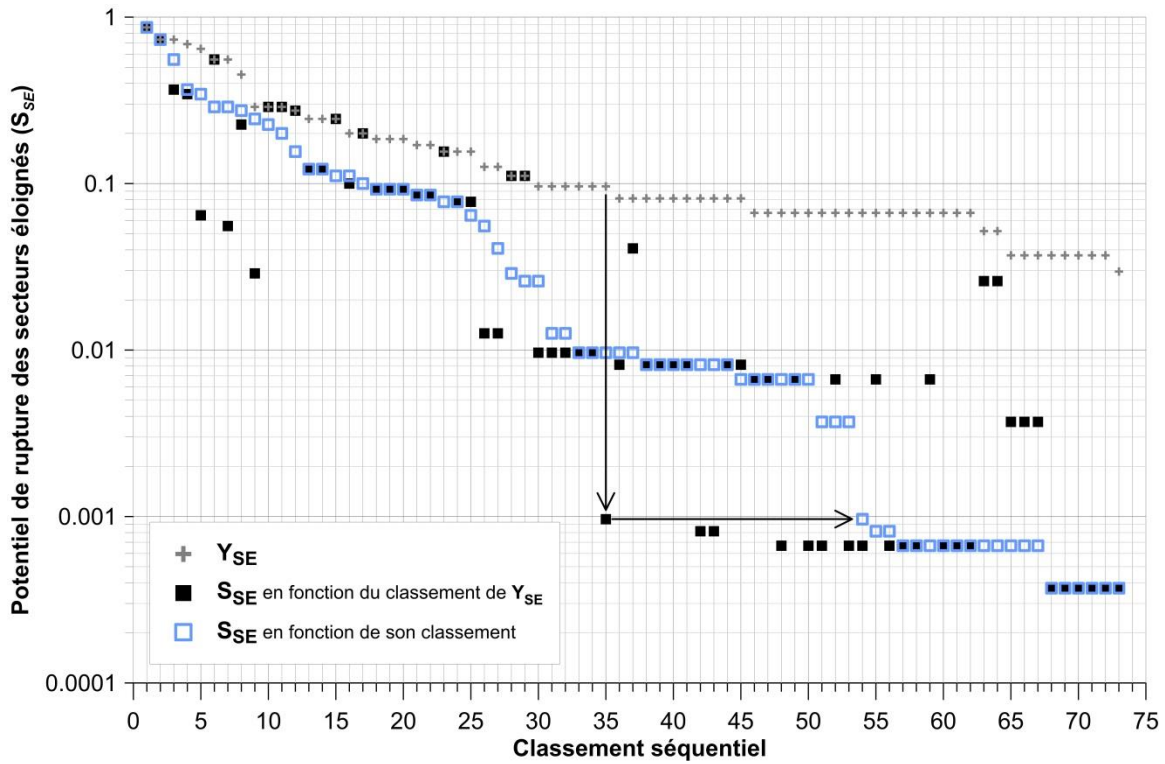


Figure 6.24 Ce graphique présente l'impact sur le classement de (S_{SE}) de la multiplication par le facteur de correction de la densité de parois ($F_{DENSITE}$). En croix grises, la valeur du terme Y_{SE} est mise en graphique en ordre décroissant. Puis, le résultat de la multiplication de Y_{SE} par $F_{DENSITE}$ (S_{SE}) est présenté par les carrés noirs, dans le même ordre séquentiel que les croix grises. Le désordre apparent des carrés noirs met l'accent sur les parois qui ont changé de place dans le classement séquentiel. Puis, S_{SE} est mis en graphique en fonction de son ordre décroissant (carrés bleus). Les carrés noirs et bleus sont les mêmes valeurs, mais ordonnées différemment.

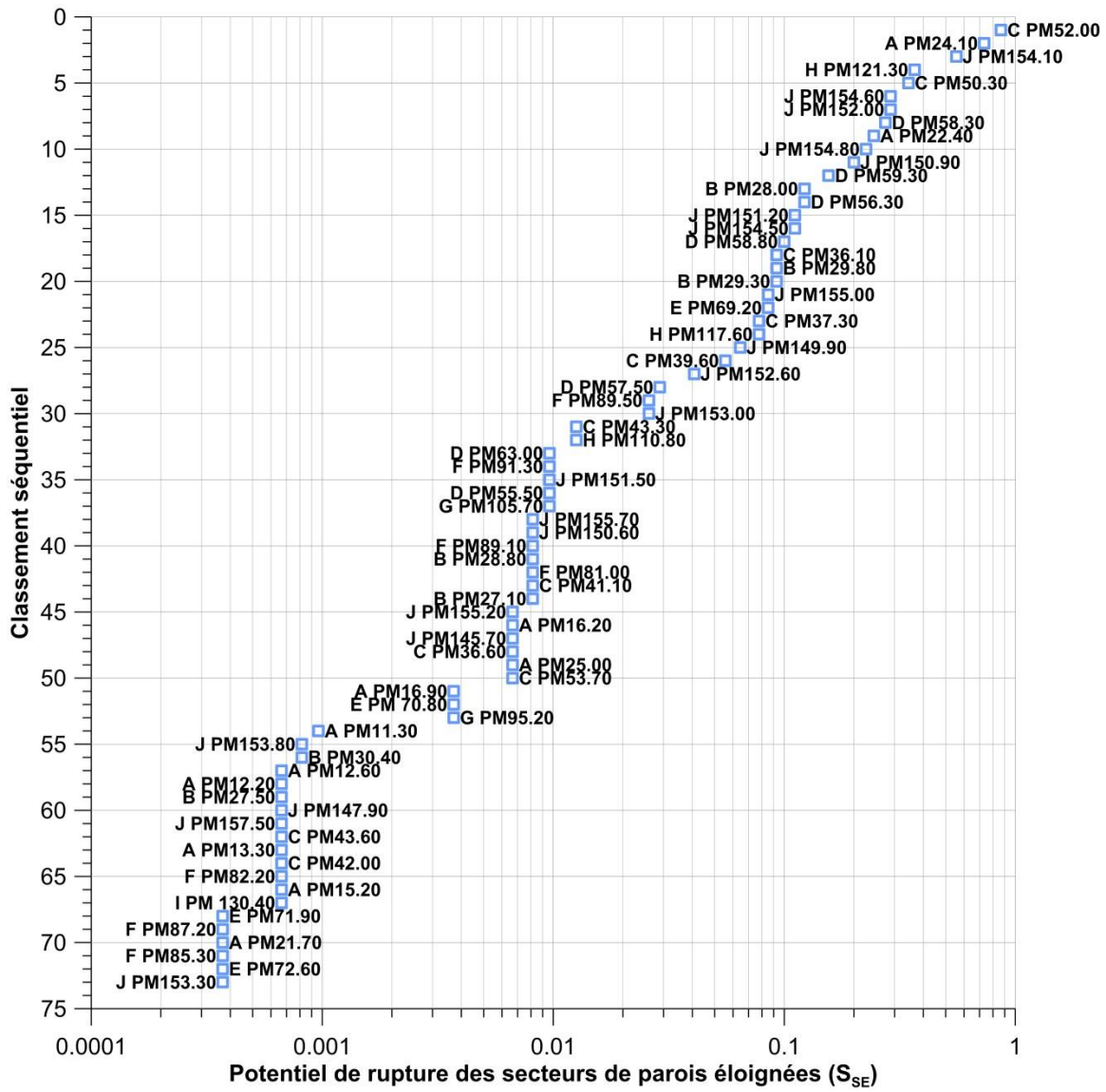


Figure 6.25 Présentation des résultats du classement de S_{SE} .

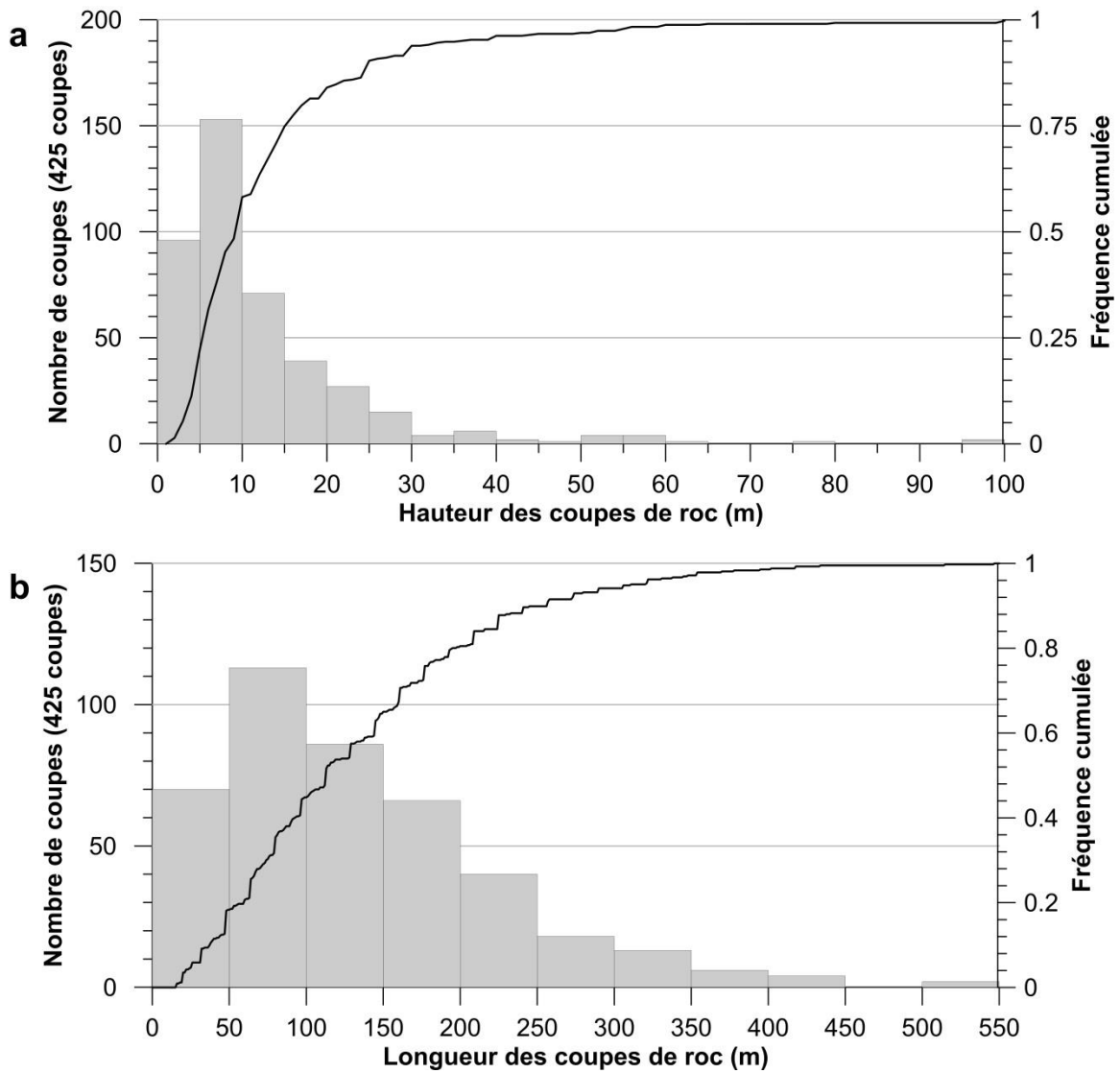


Figure 6.26. Histogrammes et courbes de fréquence cumulée de la hauteur (a) et la longueur (b) des 425 parois répertoriées.

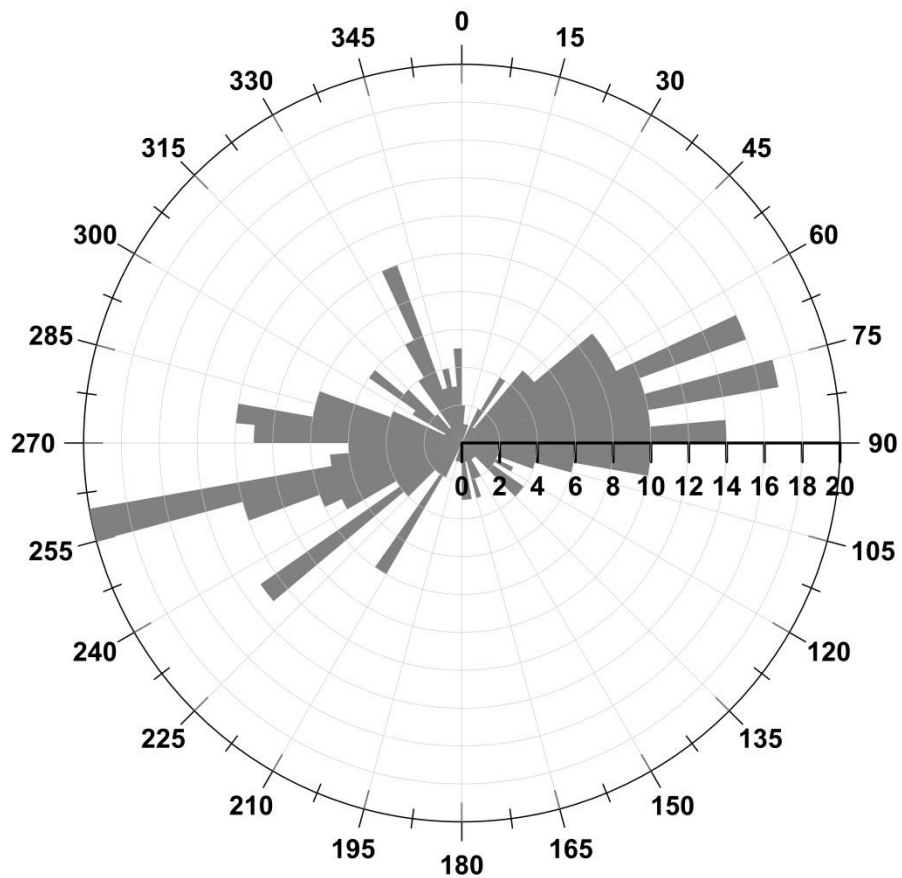


Figure 6.27. Rosette présentant la direction de pendage des coupes de roc répertoriées. La direction de pendage indique le côté où fait face les parois.

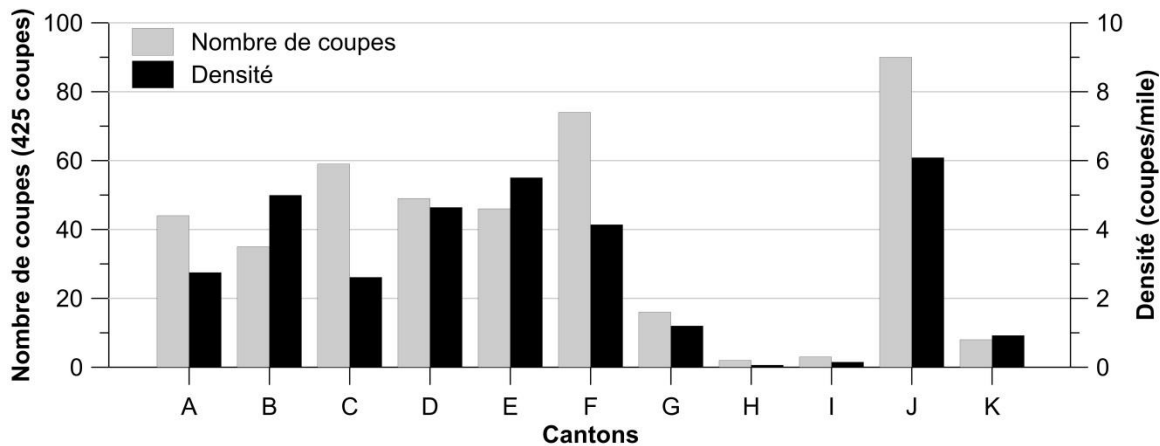


Figure 6.28. Cette figure présente le nombre de coupes de roc répertoriées par canton ainsi que la densité de coupes par mile à l'intérieur du canton.

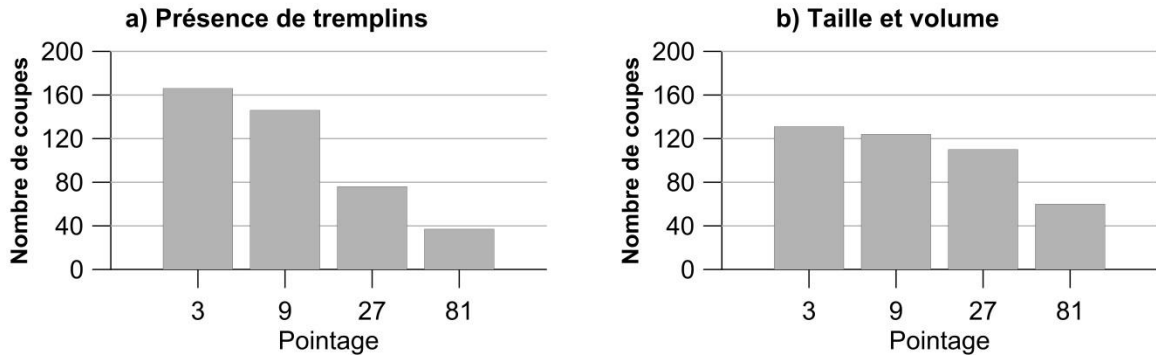


Figure 6.29. Histogrammes présentant la répartition des pointages de 3, 9, 27 et 81 attribués aux deux paramètres utilisés pour l'évaluation du potentiel d'atteinte des coupes de roc: a) Présence de treplins et b) Taille des blocs et volume disponible. La définition des critères associés aux pointages sont indiquées au tableau 4-4, section 4.8.2.

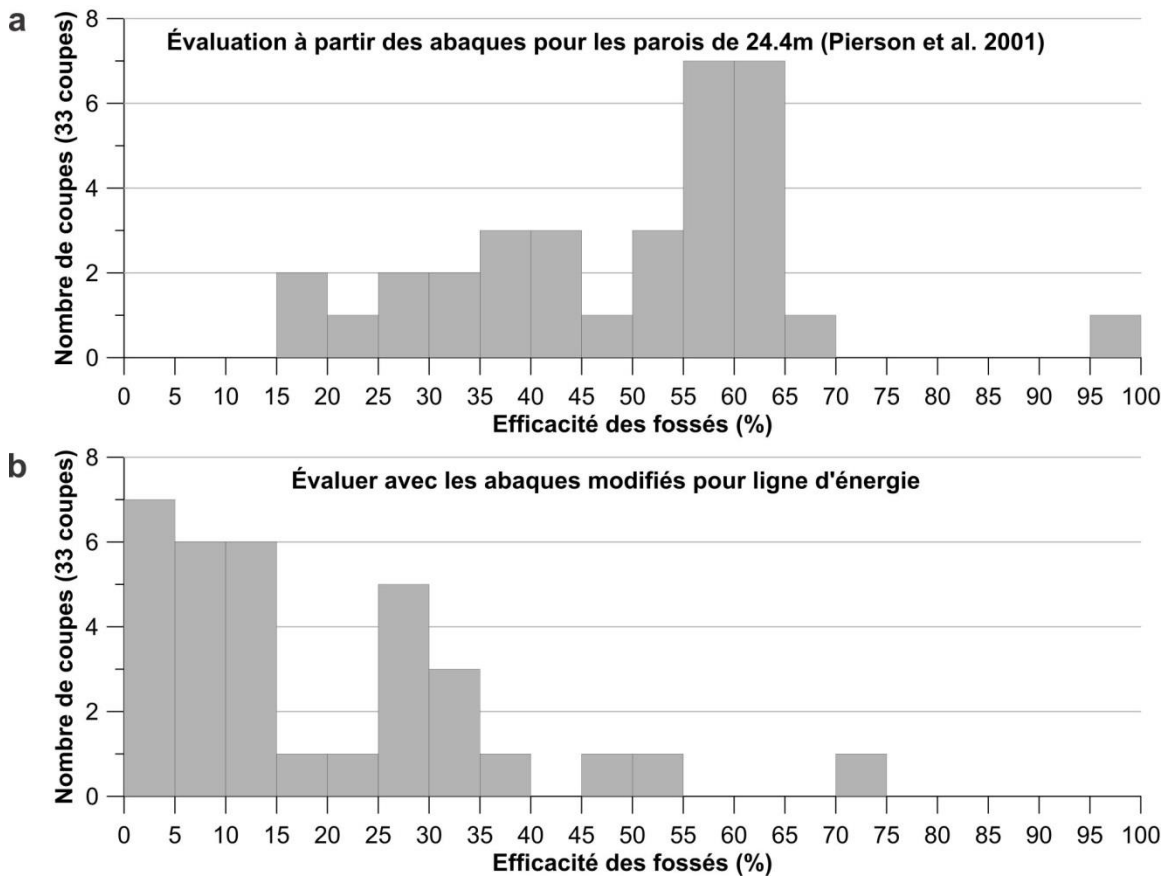


Figure 6.30. Histogrammes présentant les efficacités de fossés évaluées pour les parois de plus de 26 m de haut. En a, l'évaluation est faite à partir des abaques non-modifiés de Pierson et al. (2001), soit des abaques pour des coupes de 24.4m de haut. En b, l'évaluation est faite à partir des abaques modifiés par le principe des lignes d'énergie. Ce sont les valeurs en b qui sont utilisées dans le calcul du potentiel d'atteinte (A_{CR}).

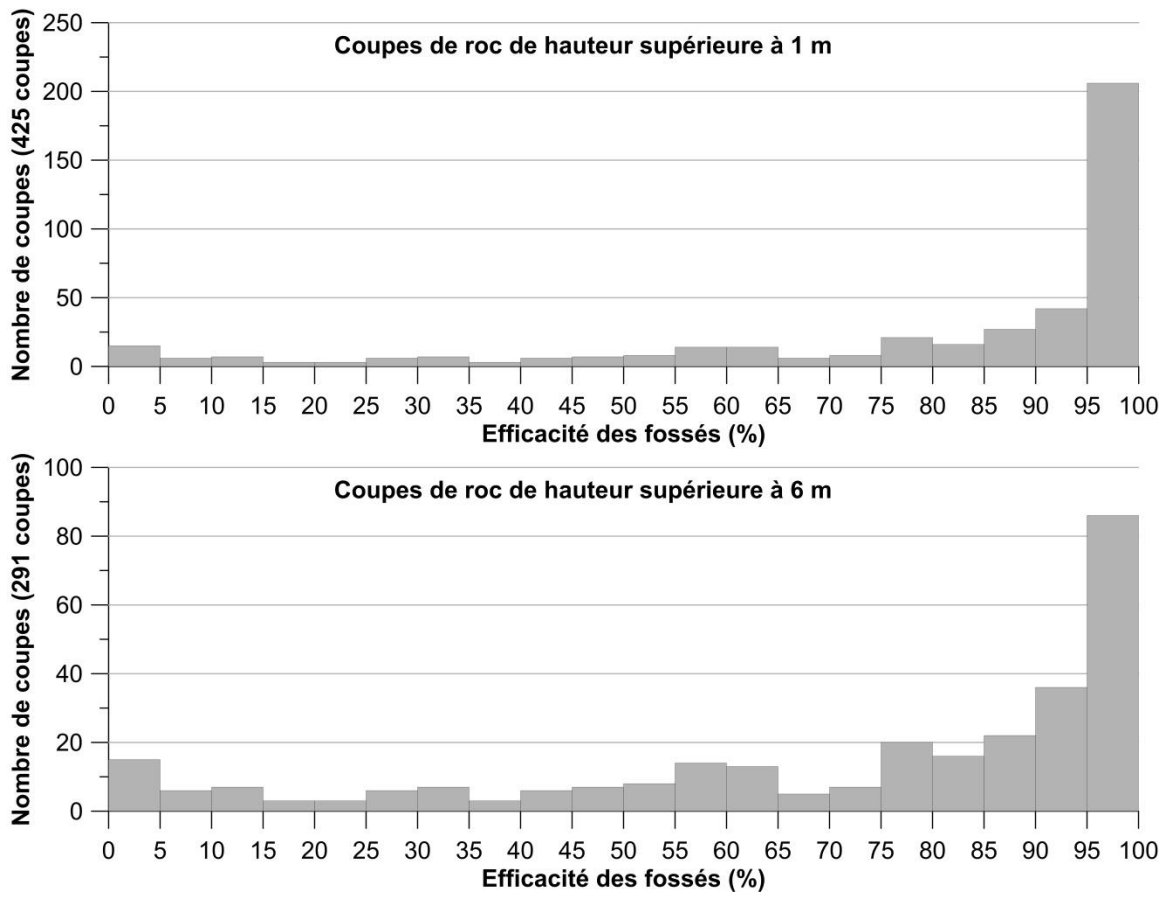


Figure 6.31. Histogrammes de l'efficacité des fossés de toutes les coupes de roc étudiées (a) et de celles de plus de 6 m de haut (b).

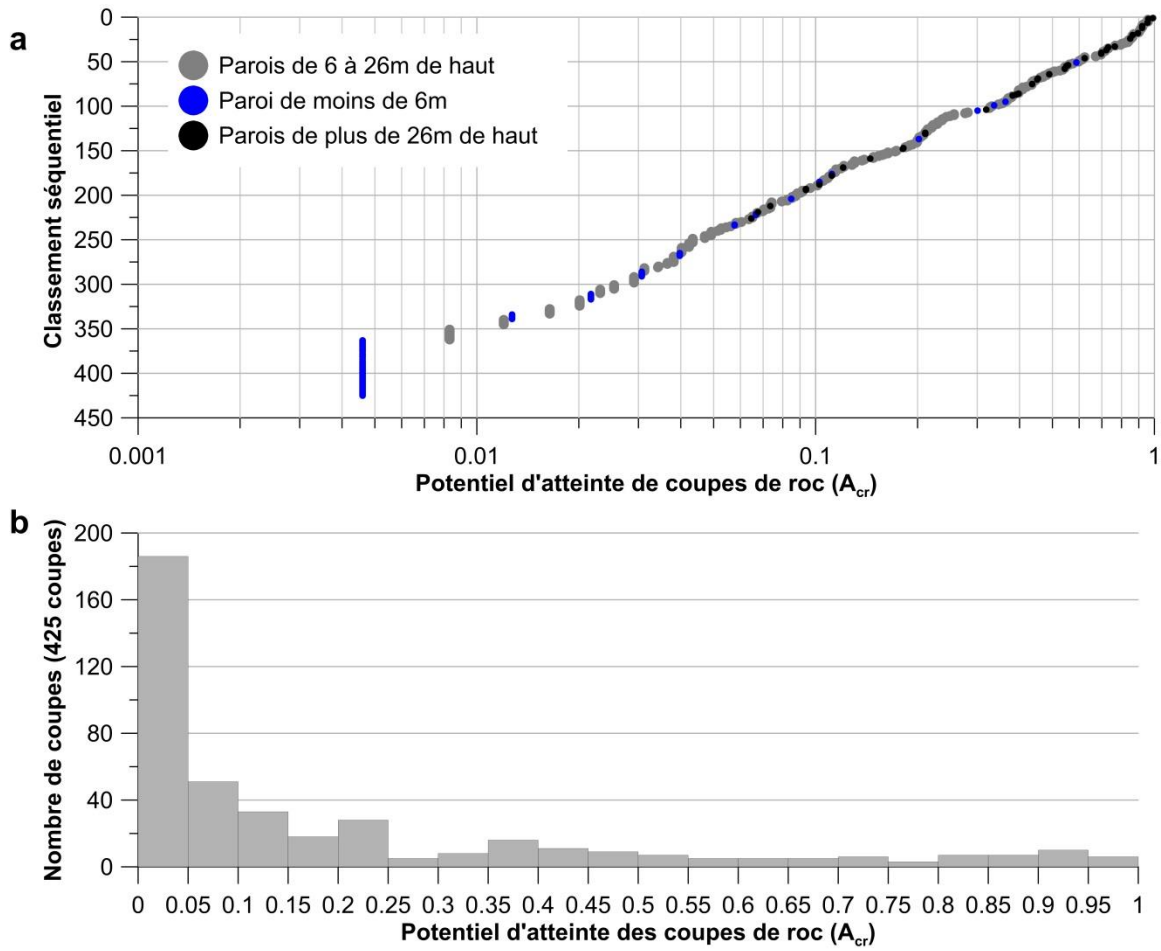


Figure 6.32. Distribution du potentiel d'atteinte des 425 coupes de roc étudiées. Elles sont présentées en ordre séquentiel de gauche à droite de la plus faible valeur (#425) à la plus grande valeur (#1). b) Histogramme du potentiel d'atteinte des 425 coupes de roc étudiées.

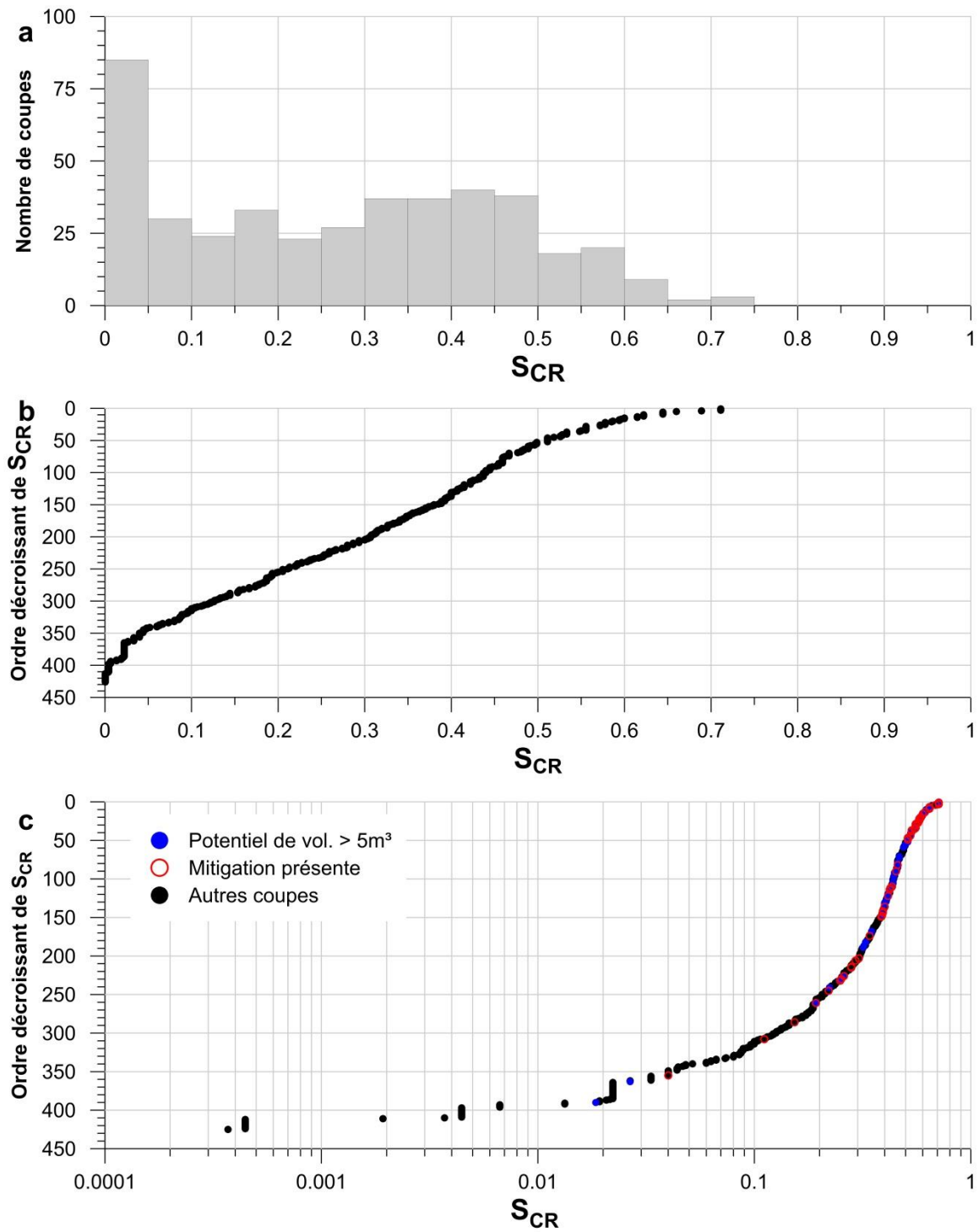


Figure 6.33. Présentation des valeurs de S_{CR} par un histogramme (a), par la distribution en ordre décroissant sur une échelle linéaire (b) et logarithmique (c) de S_{CR} .

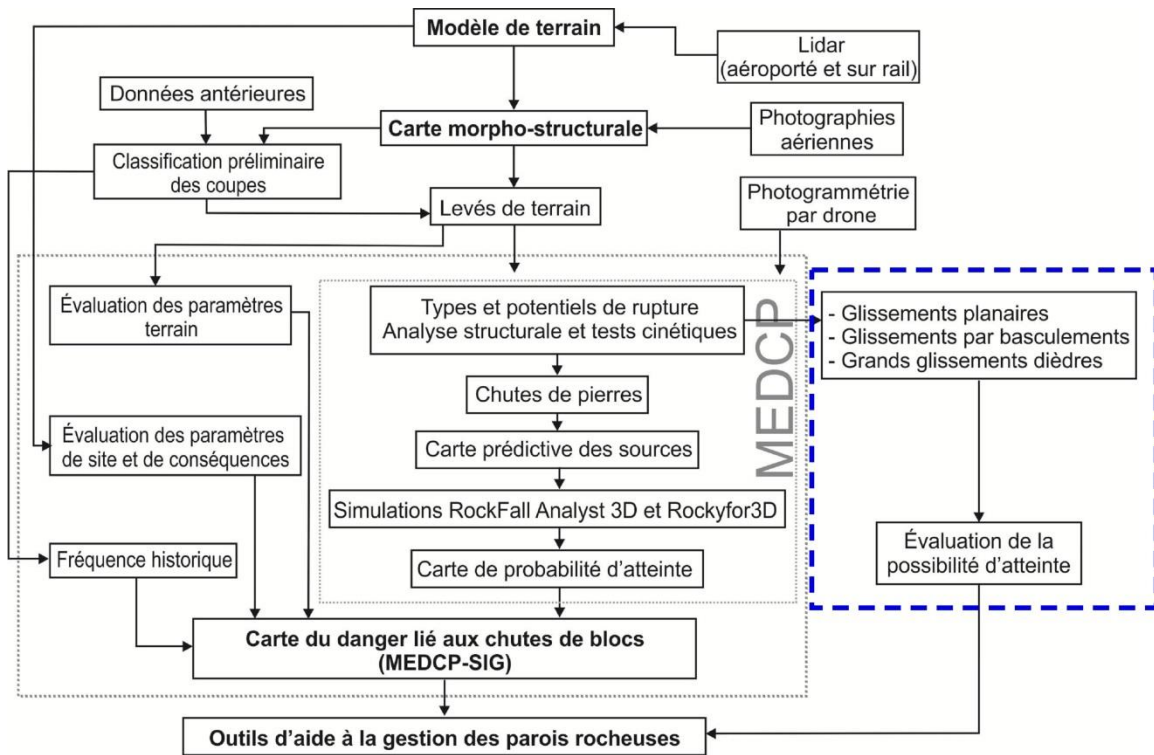


Figure 6.34. Schéma général du projet ParaChute et la portion reliée aux grand mouvements de terrain rocheux encadrée en bleu.

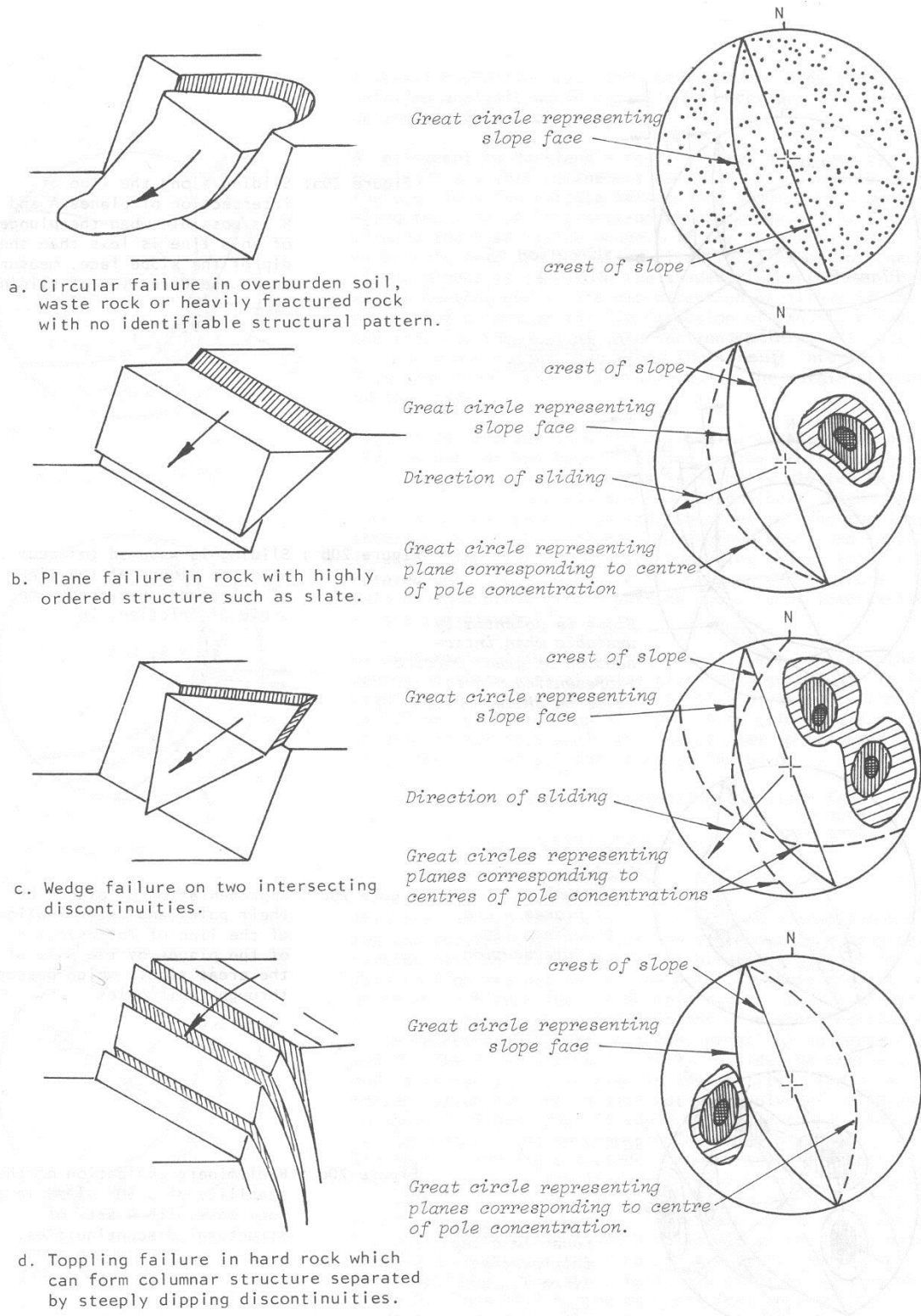
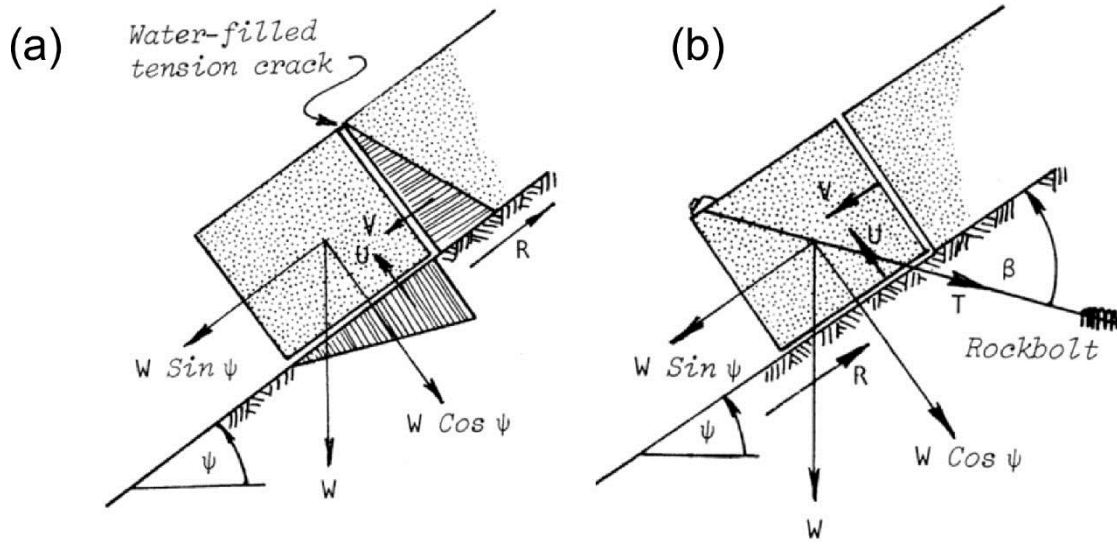


Figure 6.35. Illustration des modes de ruptures dans un massif rocheux (tiré de Hoek et Bray 1981).



Figure 6.36. Exemple d'une coupe (a) où le mode de rupture est clairement identifiable (planaire) et (b) à la coupe de roc (E7 W, PM 69.1) il ne l'est pas et on y trouve surtout des surplombs (mode associé surtout à des chutes de pierres, Mayers 2017).



$$F = \frac{c A + (W \cos \psi - U + T \sin \beta) \tan \phi}{W \sin \psi + V - T \cos \beta}$$

Figure 6.37. Schéma simplifié d'une rupture planeaire d'un bloc sur un plan incliné à un angle ψ et illustrant le rôle de l'eau (U et V) ainsi que celui de l'ajout d'une force d'ancrage (T)(modifié d'après Hoek et Bray 1981).

Eva, PM 72.95

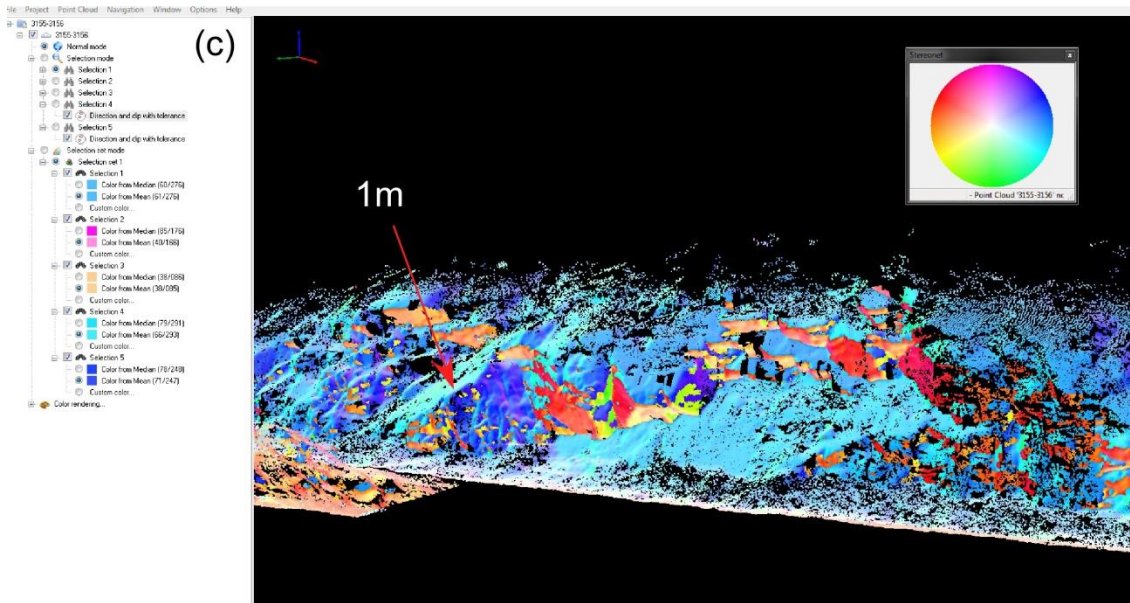
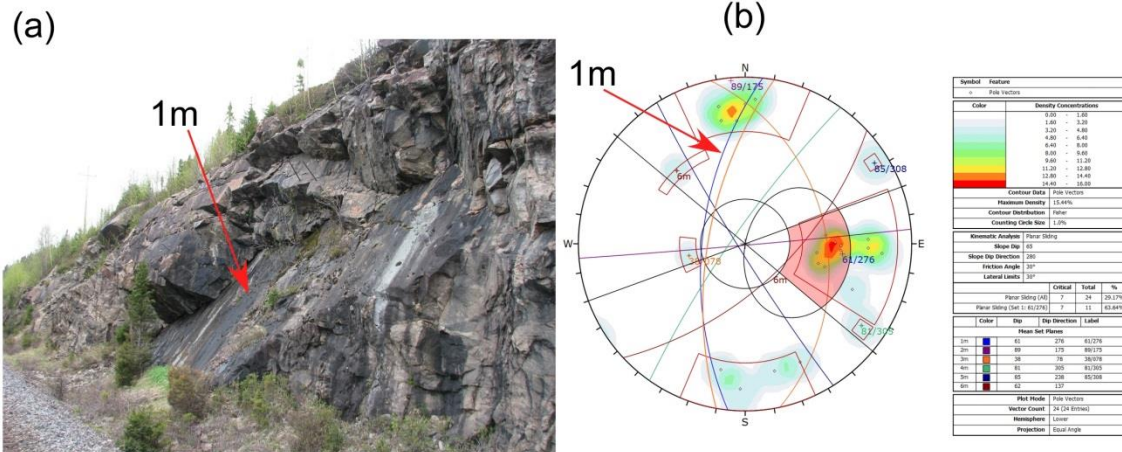


Figure 6.38. Rupture planaire potentielle au PM 72.95 dans le secteur Eva; (a) : photographie d'une partie de la coupe de roc et une surface panaire bien visible (famille 1m) sur laquelle des ancrages ont été placés, (b) : stéréonet des principales familles de discontinuités et (c) image du nuage de points analysé avec Coltop et qui présente les plans associés aux principales familles de discontinuités observées sur la paroi. On notera en bleu pâle les surfaces sur lesquelles une rupture planaire pourrait se développer.

E20 E, PM 71.82

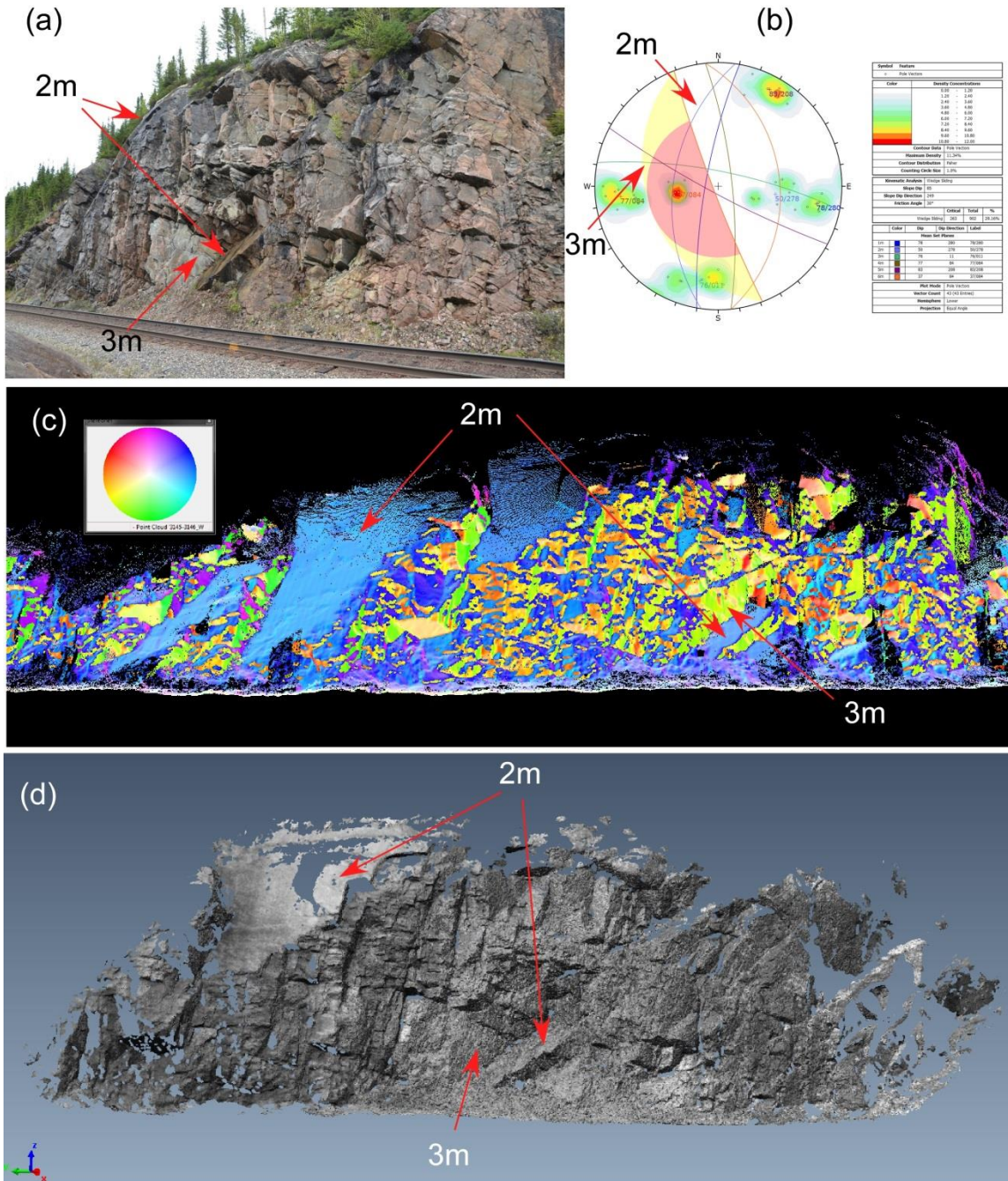


Figure 6.39. Rupture par dièdre potentielle au PM 71.82 dans le secteur Eva; (a) : photographie d'une partie de la coupe de roc, (b) : stéréonet des principales familles de discontinuités et (c) image du nuage de points analysé avec Coltop et (d) image en nuage de points obtenus par le Lidar terrestre lesquels présentent les plans associés aux principales familles de discontinuités observées sur la paroi. On notera en bleu pâle (2m) et en vert (3m) les principales familles de discontinuités qui permettent le développement de ruptures dièdre sur la paroi.

Analyse du Basculement *Toppling Analysis*

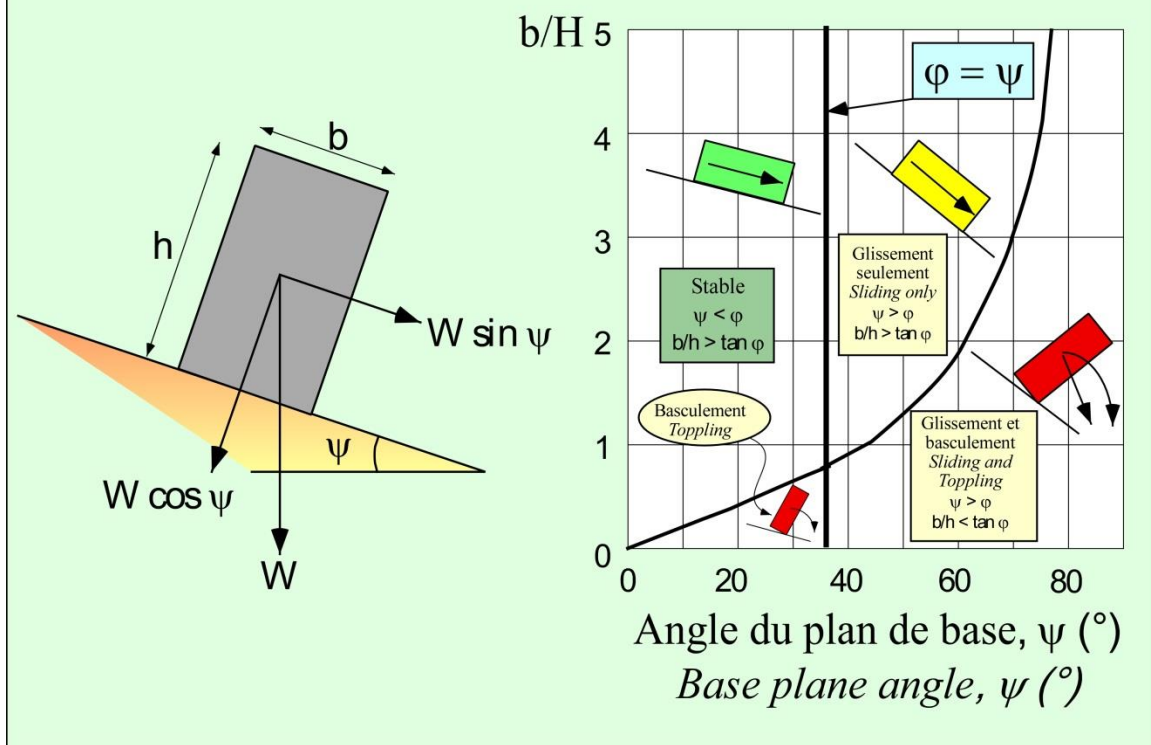


Figure 6.40. Illustration des conditions permettant une rupture pas basculement pour un seul bloc. Les blocs en rouge indiquent les conditions géométriques le permettant.

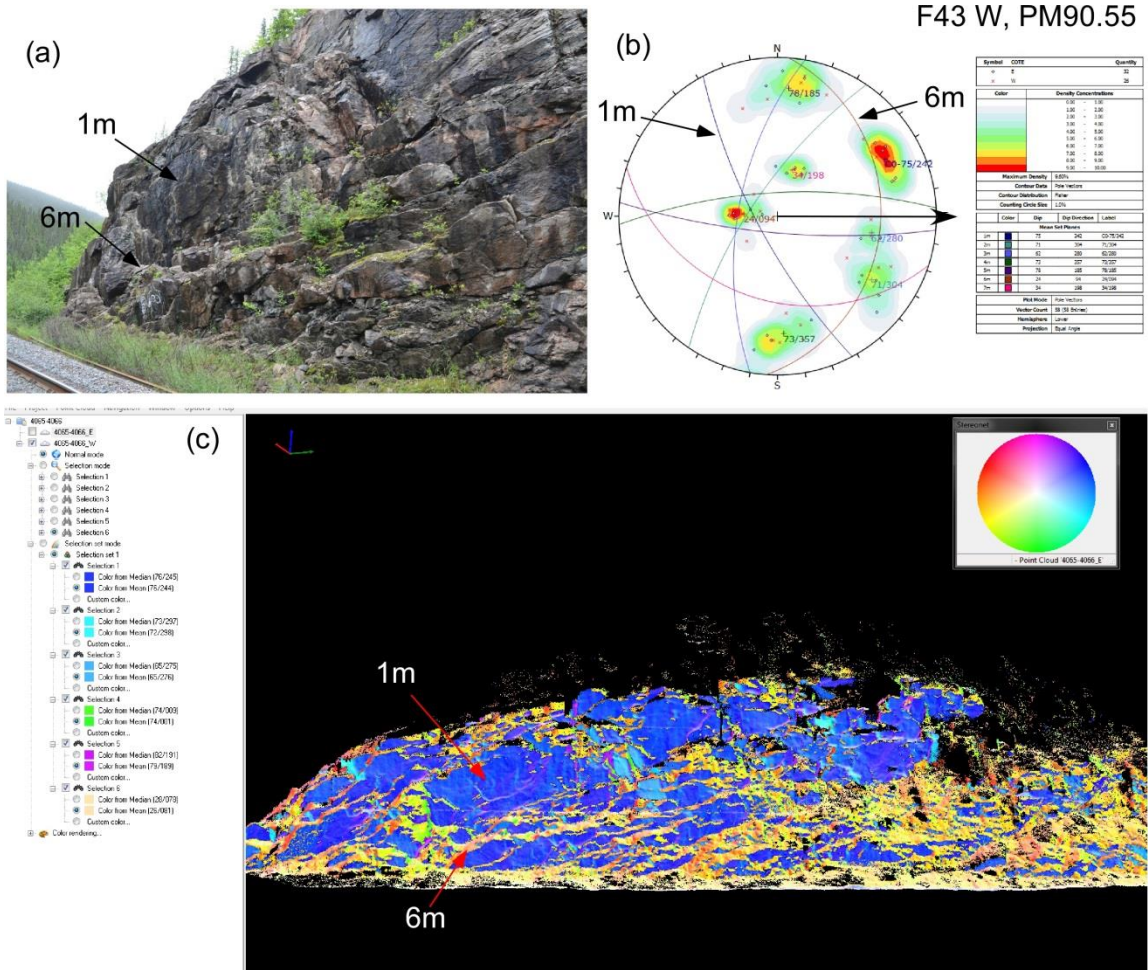


Figure 6.41. Rupture par basculement potentielle au PM 90.55 dans le secteur Fox; (a) : photographie d'une partie de la coupe de roc, (b) : stéréonet des principales familles de discontinuités et (c) image du nuage de points analysé avec Coltop et qui présente les plans associés aux principales familles de discontinuités observées sur la paroi. On notera en bleu la famille de discontinuités fortement pentue qui s'appuie sur celle en jaune qui est de faible pendage.

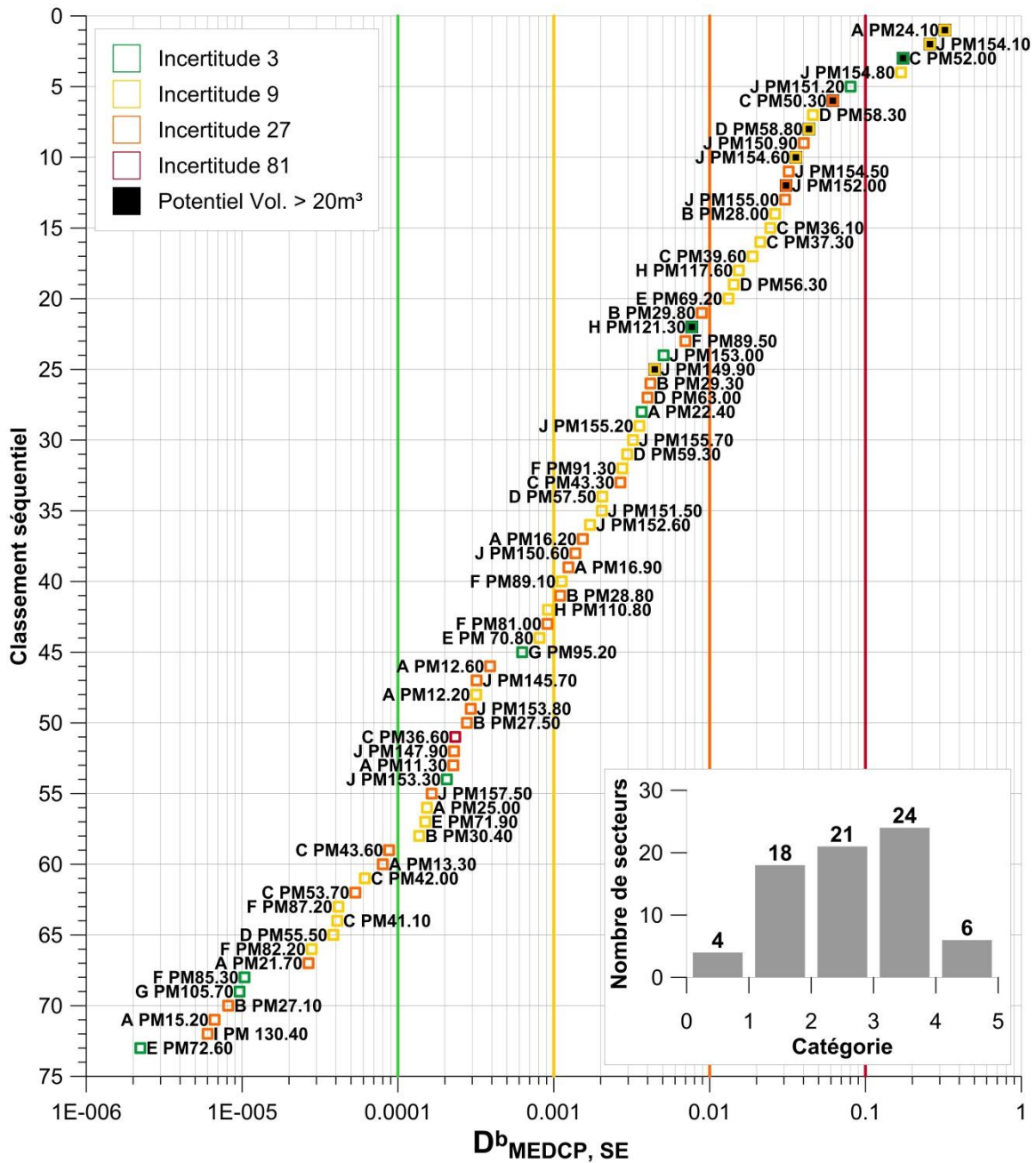


Figure 6.42. Présentation des résultats du classement $D^b_{MEDCP, SE}$. Les barres verticales de couleur indiquent les limites des catégories de priorité. Les coupes de priorité 1 sont celles situées à droite de la ligne verticale rouge située à l'abscisse 0.1. L'histogramme indique le nombre de parois par catégorie de priorité.

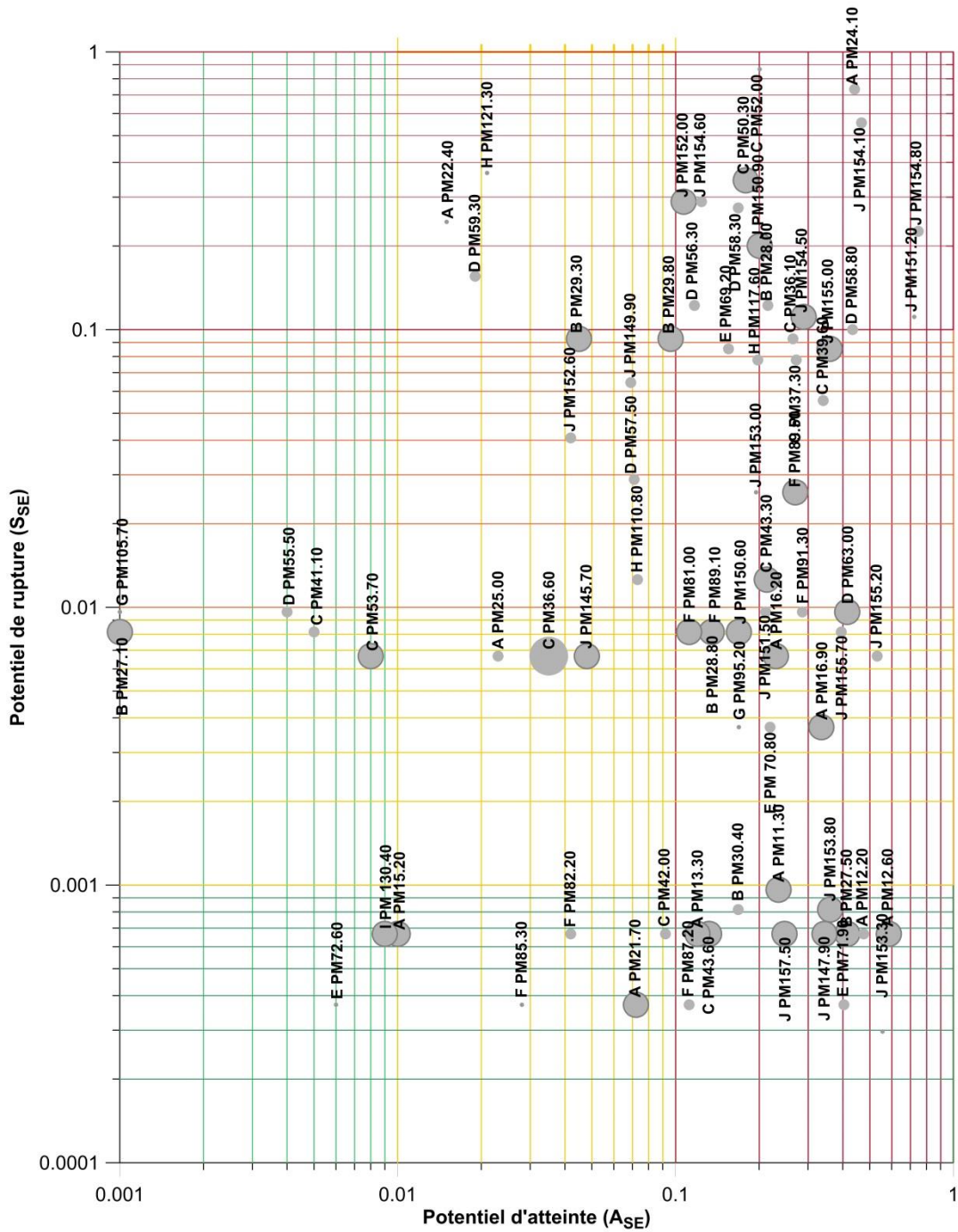


Figure 6.43 Mise en graphique du potentiel de rupture en fonction du potentiel d'atteinte des secteurs de parois éloignées. La grosseur du symbole représente le pointage associé aux paramètres incertitude. Les disques de plus grand diamètre sont associés au pointage de 81.

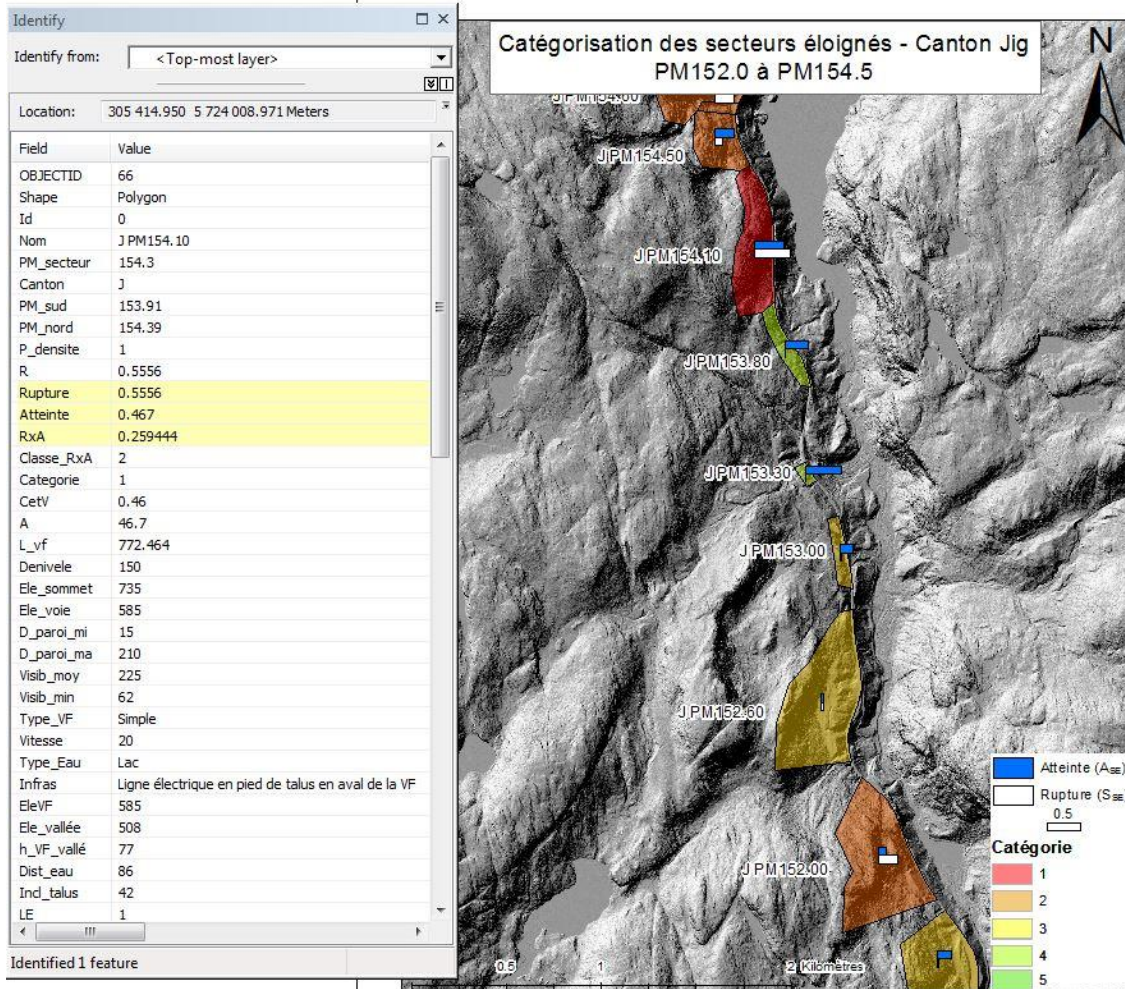


Figure 6.44. Exemple de représentation graphique du MEDCP pour les secteurs éloignés, avec la table attributaire montrant une partie de l'information disponible pour chacun des secteurs éloignés.

Paroi éloignée: A PM11.30 Canton: A PM: 11.30 L VF: 869.02 m
 Dénivelé: 49 m Dist. min.: 20 m Dist. max.: 60 m Angle α: 50.77°
 Inclinaison: 32° Orientation: N h max: 10 m h min: 6 m

Données
 Photo hélico 2014 Photo hélico 2015 Photo/vidéo UAV Modèle 3D Autres données:
 1 0 0 0 Photo 2014: peu nombreuses

Description du secteur
 7 crêtes de parois de moins de 10 m de haut distribuées dans un long secteur et situées par-dessus 5 coupes de 15 à 22 m (PM11.03 à PM11.55). Présence de deux petits amas de blocs métriques dont la source n'a pas été repérée. Peu d'information visuelle disponible, mais sur photo hélico 2014, on voit des fractures verticales ouvertes qui délimitent des blocs, qui reposent sur des plans qui semblent peu pentus. Avec l'info disponible, une seule des crêtes est fracturée.

Description incertitude
 (1) peu d'info. visuelle disponible (2) précarité des blocs désolidarisés visibles sur la photo hélico 2014
 OSC_2764.jpg Degré d'incertitude
 3 9 27 81

Commentaire:

Rupture	3	9	27	81
Présence débris:	Aucun bloc en pied de pente ou de talus d'éboulis	Quelques blocs, ou amas de blocs qui n'atteignent pas la voie ferrée	Talus d'éboulis présent; un ou des événements de rupture sont connus	Voie ferrée traverse le talus d'éboulis, ou des événements connus ont atteint la voie ferrée
État végétation:	Pas ou peu d'arbres morts. Si il y en a, dispersés et ne forment pas de couloir	Arbres cassés ou morts concentrés aux pieds des parois	Couloirs de feuilles. Forêt clairsemée et arbres morts concentrés aux pieds des parois	Couloir d'arbres cassés frais, Forêt de feuilles clairsemée
Fissuration:	Peu ou pas de fissures. Peu de surplombs. Aucun bloc libre	Fracturation intense sur moins de 10%. Aucun volume complètement étagé	Fractures ouvertes. Surplombs. Quelques blocs délimités par des fractures ouvertes	Blocs délimités par des fractures. Coarctées visibles. Forte densité de fracturation
Vol > 20m³:	Aucun observé	Potentiel, non observé	Potentiel reconnu	Potentiel reconnu. Plusieurs ou rupture passée connue
Densité paroi:	Non-continu, un seul patier	Non-continu. Quelques parois étagées	Continu et quelques parois étagées. Non-continu et plusieurs parois étagées	Continu et plusieurs niveaux de parois étagées
Végétation:	Aucune dans des fractures	Peu ou petits arbustes sur la paroi	Mature dans fractures	Dans les fractures ouvertes délimitant des blocs

Potentiel de rupture $\frac{(P_A + P_B + P_D) \cdot 0.2 + P_C + 0.4}{81} \cdot F_{DENSITE} = 0.00096$ Potentiel atteint: 23.5%

* $F_{DENSITE}$: 3=0.01; 9=0.1; 27=0.5; 81=1

Conséquences
 Éléments à risque
 LE CT CP CH RO TU TR AI PT HA PN
 1 0.00

Autres:

Photo de la paroi éloignée

Trajectographie

Potentiel de rupture en fonction du potentiel d'atteinte

Figure 6.45. Exemple de fiche récapitulative de l'évaluation MEDCP pour les secteurs éloignés.

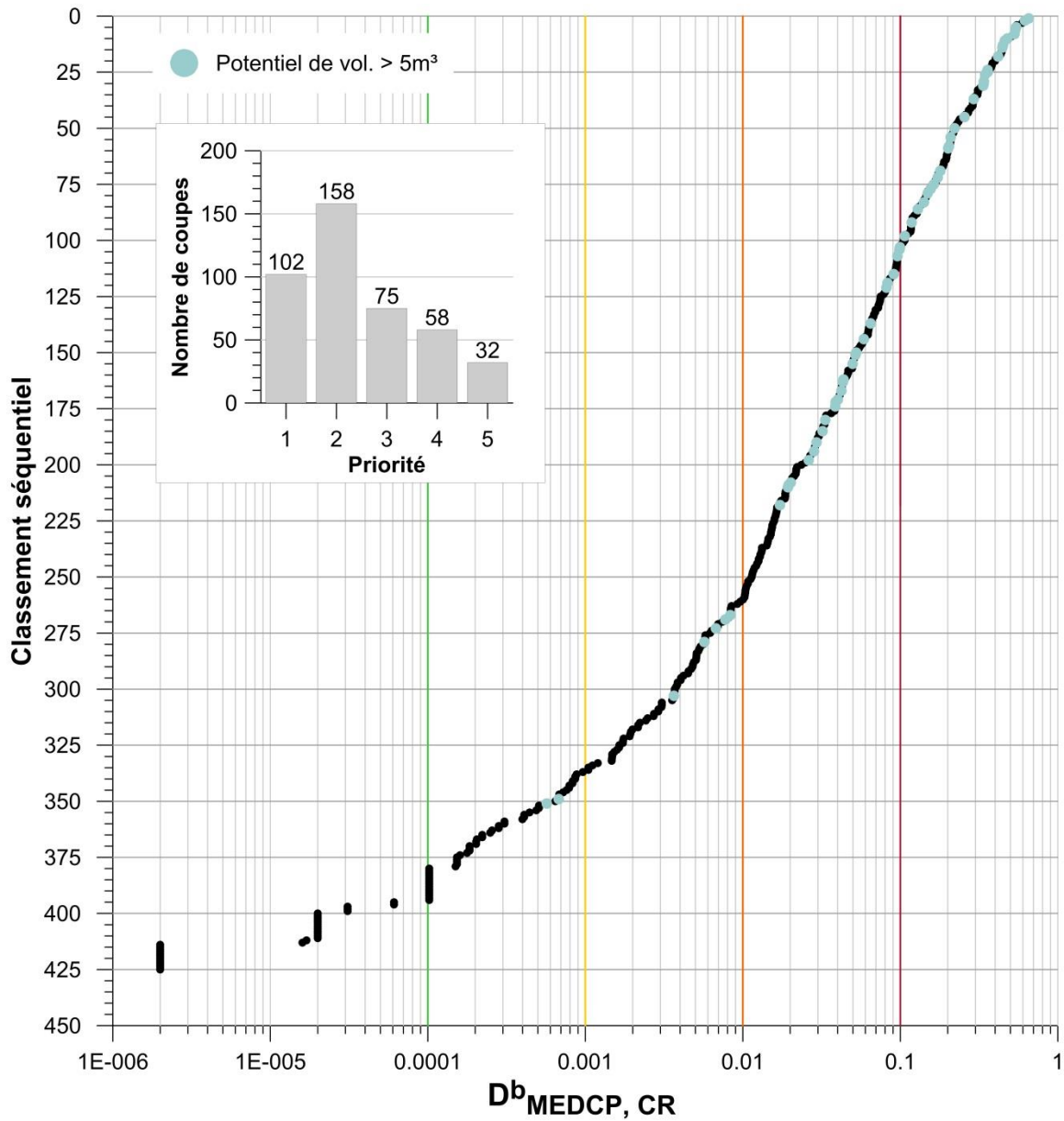


Figure 6.46. Résultats du classement MEDCP pour les coupes de roc. Le graphique présente $D^b_{MEDCP, CR}$ en fonction du classement séquentiel. Les barres verticales de couleur indiquent les limites des catégories de priorité. Les coupes de priorité 1 sont celles situées à droite de la ligne verticale rouge située à l'abscisse 0.1. L'histogramme indique le nombre de parois par catégorie de priorité.

ABLE

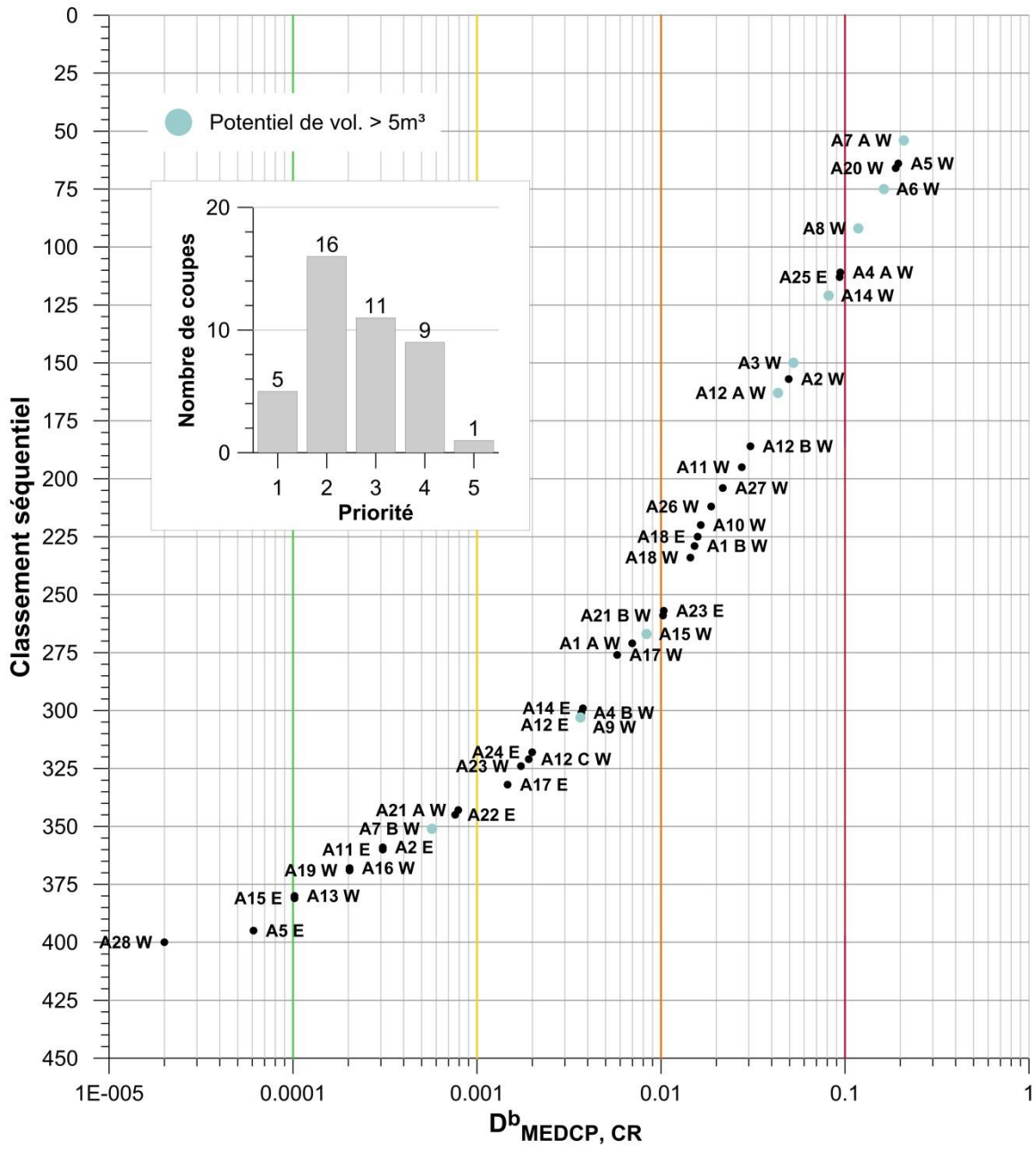


Figure 6.47. Figure similaire à la figure 6.46, mais uniquement pour le canton Able.

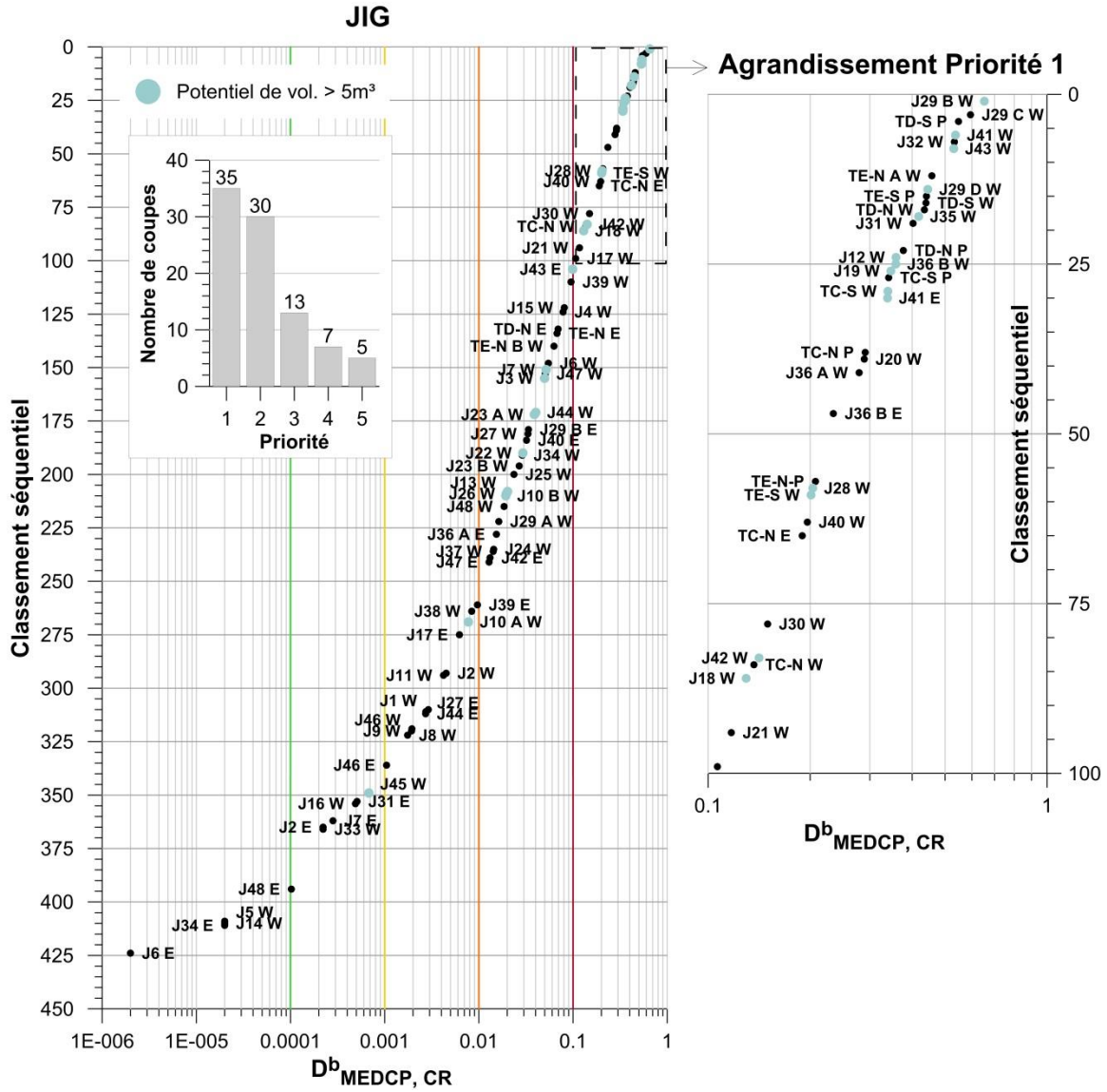


Figure 6.48. Figure similaire à la figure 6.46, mais uniquement pour le canton Jig avec agrandissement des coupes ayant la plus haute priorité.

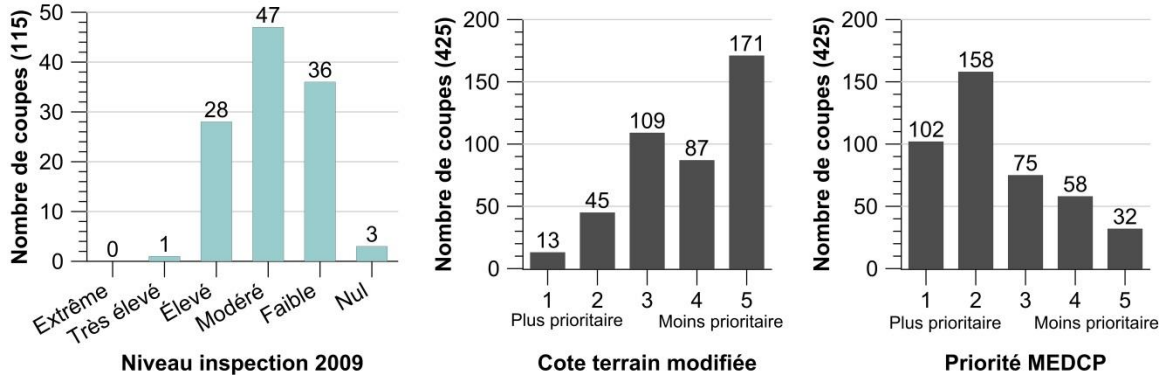


Figure 6.49. Histogrammes de la catégorisation des coupes de roc résultant de l'inspection de 2009 (a) par Golder et ass. (2009), de la cote attribuée sur le terrain lors des travaux du projet *ParaChute* (b)(Cloutier et al. 2016) et de l'application du MEDCP (c).

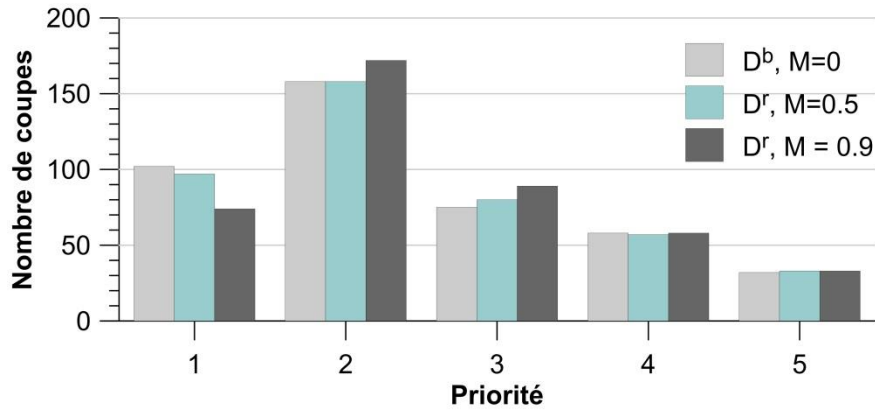


Figure 6.50. Effet de l'application du facteur M sur le nombre de coupes de roc par catégorie de priorité.

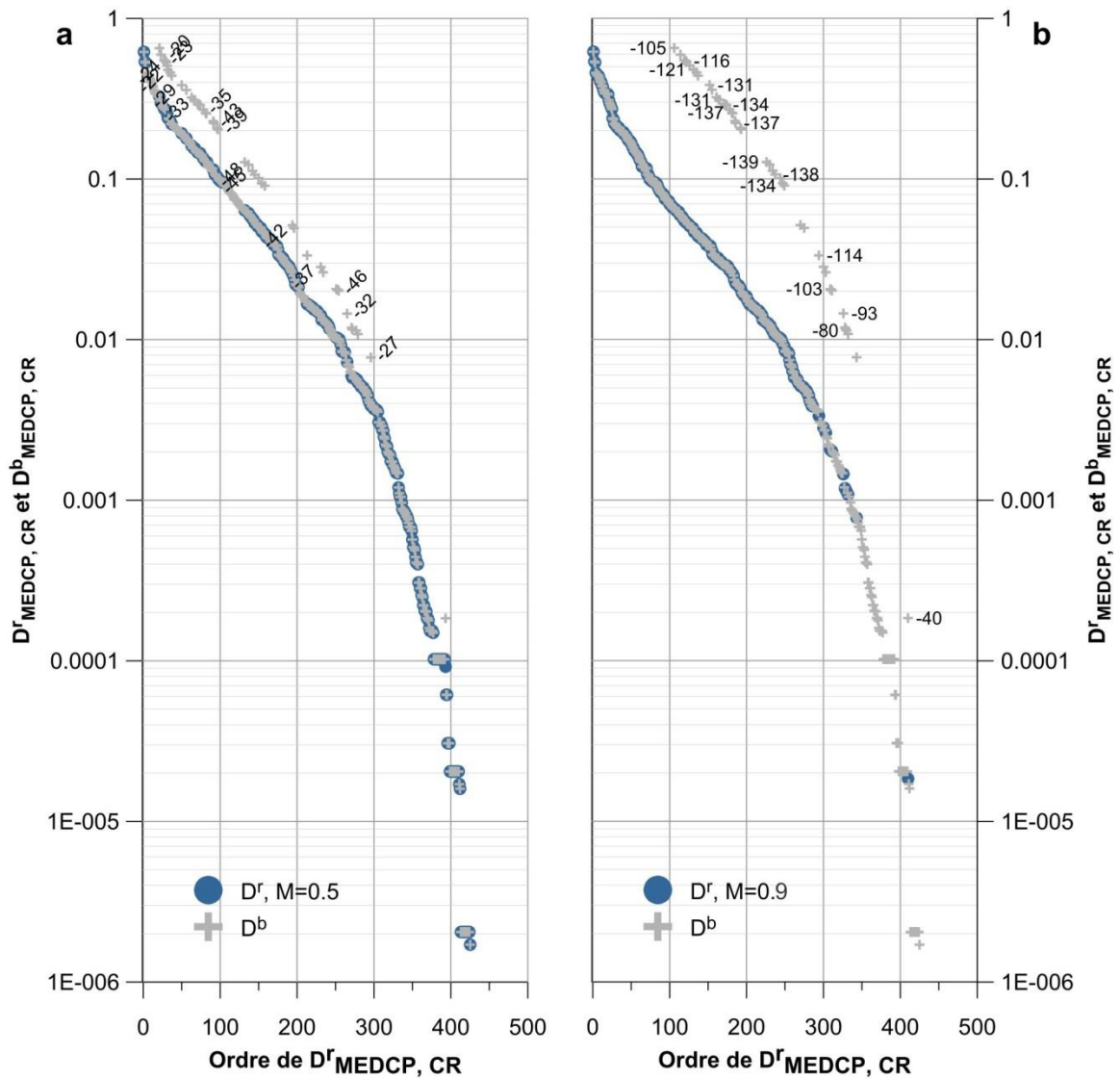


Figure 6.51. Effet de l'application du facteur M sur le classement séquentiel des coupes de roc. Les annotations indiquent, pour certaines coupes avec mitigation, le changement de position dans le classement, e.g. -20 indique que la coupe est passée de la 10^e à la 30^e position.

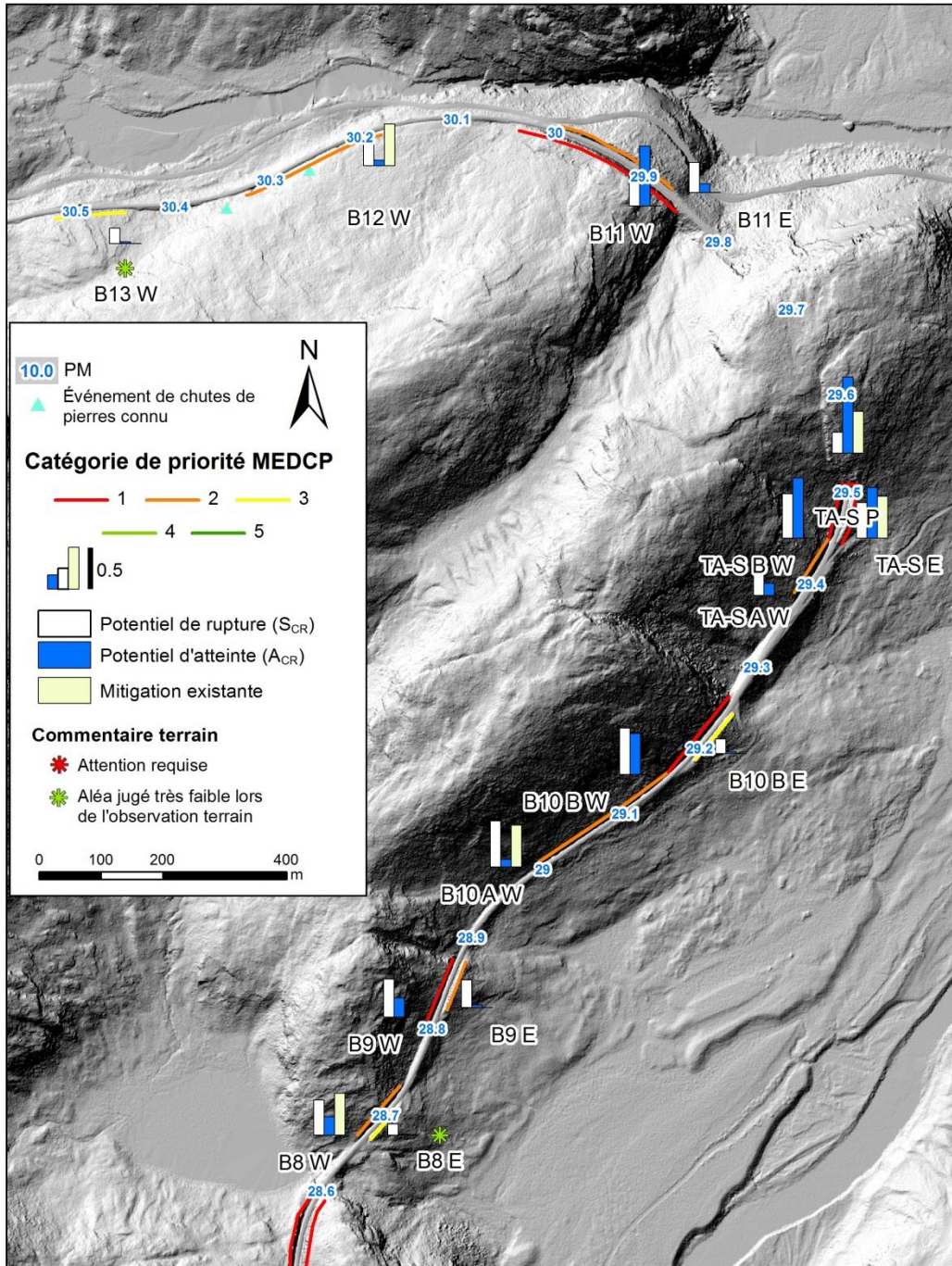


Figure 6.52. Exemple de représentation graphique du MEDCP pour les coupes de roc.

7. Discussions

7.1. Parois éloignées

La délimitation des secteurs regroupant des parois éloignées a une influence sur les valeurs du potentiel d'atteinte et possiblement sur la catégorie de priorité accordée en fonction de $D_{MEDCP, SE}$. Dans la majorité des cas, la délimitation des secteurs est sans ambiguïté. Toutefois, dans certaines situations la localisation des limites des secteurs prête à interprétation. C'est le cas, par exemple, le long du canyon dans le canton Jig, où les escarpements sont quasiment continus (fig. 7.1). Si la délimitation était différente, le rapport du nombre de trajectoires atteignant la voie ferrée sur le nombre de trajectoires simulées serait certainement différent. Pour le moment, les délimitations de ce secteur n'ont pas été variées pour étudier l'influence sur le potentiel d'atteinte. Cette situation se produit très rarement dans le territoire à l'étude.

La sélection des sources à conserver pour procéder à la deuxième série de simulations de trajectoires influence aussi le potentiel d'atteinte. La reconnaissance des sources potentielles se fait en plusieurs étapes, d'abord des simulations systématiques sont réalisées en utilisant l'ensemble des pixels identifiés par le script de reconnaissance basé sur la pente du MNT. Puis, les résultats de ces simulations sont interprétés pour identifier les pixels à partir desquels les trajectoires peuvent atteindre l'infrastructure. Puis, ces pixels sont ensuite omis s'ils représentent une coupe de roc. Enfin, la deuxième série de simulations est réalisée en conservant les sources restantes. Le résultat des simulations du secteur J PM154.3 sont un bon exemple de l'impact de cette sélection sur les résultats (fig. 7.2). Dans l'exemple du J PM154.3, quelques sources ont été simulées à partir d'un petit escarpement encerclé sur la figure. Toutes ces trajectoires n'atteignent pas la voie ferrée; elles contribuent donc à diminuer le potentiel d'atteinte, qui est de 46.7% pour ce secteur. Cet escarpement n'aurait pas dû être conservé car aucune trajectoire n'atteint la voie ferrée. Dans cet exemple, le nombre de source total (8674) est très grand, alors que les escarpements identifiés sont limités. Si l'on fait l'hypothèse que 200 sources sont identifiées en trop, le potentiel d'atteinte serait 2.3 % plus faible. Ainsi, cet impact est relativement limité. La sélection des sources n'a pas d'influence sur l'évaluation du potentiel de rupture (S_{SE}).

Le potentiel de rupture des parois éloignées (S_{SE}) est évalué strictement à partir d'observations de photographies et des informations tirées du LiDAR aéroporté. Les incertitudes sont liées au visuel, mais aussi à la complexité des mécanismes de rupture et de la structure rocheuse. Pour 30 secteurs éloignés, les parois n'étaient pas visibles, parfois parce qu'elles sont masquées par la végétation. Le potentiel de rupture pour les secteurs non-visibles pourrait avoir été surévalué ou sous-évalué, étant donné que le score mis par défaut pour certains critères n'était pas le score minimal. Pour ces secteurs, le seul moyen d'avoir un visuel et ainsi de pouvoir mieux apprécier le potentiel de rupture de la coupe serait d'y accéder à pied sur le terrain.

Sept secteurs de parois éloignées ont un potentiel d'atteinte (A_{SE}) faible de moins de 1%. Suite à une évaluation terrain et si le potentiel de rupture (S_{SE}) est lui aussi faible, il pourrait être envisagé de supprimer certains de ces secteurs de la base de données. Ces secteurs devraient être parmi ceux de catégorie 5.

7.2. Coupes de roc

La méthodologie appliquée pour la détermination du potentiel de rupture des coupes de roc (S_{CR}) s'inspire fortement des systèmes existant, tels que celui du Colorado et le RHRS de base, ainsi que de la

méthodologie adoptée par le MTMDET. Il en va de même pour l'évaluation du potentiel d'atteinte (A_{CR}) qui utilise les abaques de Pierson et al. (2001) pour déterminer l'efficacité des fossés, qui est combiné à deux paramètres de la fiche MTQ. Cette section discute cette méthodologie. La comparaison avec les systèmes existants sera abordée plus loin.

L'un des paramètres de la fiche MTQ est utilisé dans l'évaluation du S_{CR} et dans celle du A_{CR} . Il s'agit du paramètre *Taille des blocs et volume disponible*. Pour le potentiel de rupture, la *Taille des blocs et le volume disponible* donnent une indication de la quantité de matériel qui peut se détacher. Plus le volume est grand, plus la susceptibilité à générer des chutes de pierres est considérée élevée. Pour le potentiel d'atteinte, on utilise ce paramètre dans l'optique qu'il est plus probable que des volumes plus larges atteignent la voie ferrée, car ils auront plus d'énergie et pourront se propager d'avantage. Aussi, la force d'impact sera plus grande et il est plus probable qu'elle cause une déformation ou un bris des rails. De plus, un grand volume peut combler le fossé et donc diminuer l'efficacité de celui-ci. On peut se questionner à savoir s'il est rigoureux qu'un paramètre soit utilisé à deux reprises. Ceci a comme effet de lui accorder un poids plus important qu'à d'autres paramètres. Toutefois, dans le terme du potentiel d'atteinte (A_{CR}), seulement 5% de la valeur du terme provient de la *Taille des blocs et du volume disponible*, donc le poids de ce paramètre par rapport aux autres de la fiche MTQ n'est pas disproportionné. Nous croyons qu'il est justifié de le faire, car le volume disponible est un critère important qui peut influencer la fréquence de rupture et surtout le volume par rupture qui aura un effet sur les conséquences d'une rupture.

7.2.1. Potentiel d'atteinte (A_{CR})

Le potentiel d'atteinte des coupes de roc (A_{CR}) est principalement fonction du paramètre *Efficacité du fossé*, qui contribue pour 90% de sa valeur. L'utilisation d'abaques permet de rendre son évaluation systématique et reproductible d'un opérateur à l'autre. Toutefois, le paramètre est tout de même affecté par des incertitudes liées à la complexité du phénomène de propagation d'une chute de pierres. Les facteurs influençant les trajectoires des chutes de pierres, et qui pourraient être des sources d'incertitude du potentiel d'atteinte (A_{CR}), sont en partie en lien avec la géométrie de la paroi et ils sont énumérés ici :

- emplacement dans la paroi des sources potentielles (une rupture se produisant dans le bas de la paroi se propagera moins loin);
- variation du volume des ruptures;
- dimension de fossés variables et sections de fossés partiellement remplies;
- forme du fossé variable et ne correspondant pas aux formes de fossés de l'abaque de Pierson et al. (2001);
- mode de rupture, par exemple une rupture par basculement pourrait se propager plus loin et ceci n'est pas tenu en compte dans les abaques de Pierson et al. (2001), ni dans le MEDCP;
- tremplins inhomogènes.

Les abaques sont sensibles à la sélection de la forme du fossé (1V:4H, 1V:6H ou fossé plat). Toutefois, les fossés rencontrés sur le territoire étudié ne correspondent pas aux formes identifiées dans les abaques ce qui engendre une première source d'erreur. Lorsqu'on applique la méthodologie MEDCP, on doit sélectionner l'une des formes de fossé de l'abaque. Ceci est fait en se basant sur certains critères, dont le ratio largeur sur profondeur et la profondeur moyenne du fossé. Il s'agit certainement d'une source d'erreur de la méthodologie, car un changement de forme de fossé peut avoir un impact important sur l'efficacité

résultante. L'exemple du tableau 7.1 illustre l'impact de la sélection de la forme du fossé sur la capacité de captage résultante. Les dimensions des fossés de l'exemple les placent près des limites du choix de forme, qui occasionne une différence de 21% d'efficacité du fossé si l'on passe d'une géométrie 1V:4H à 1V:6H ou l'inverse.

Pour évaluer l'incertitude de l'efficacité des fossés, il serait possible d'évaluer une efficacité maximale et minimale en utilisant les dimensions maximales et minimales de la profondeur et de la largeur des fossés qui sont calculées avec les données LiDAR et disponibles dans la base de données. Toutefois, une seule valeur doit être déterminée pour la classification MEDCP, ce qui a été fait en utilisant les valeurs moyennes de profondeur et de largeur. La méthodologie a l'avantage d'être systématique et de donner les mêmes valeurs pour deux utilisateurs.

Deux paramètres de la fiche MTQ, évalués visuellement lors de la visite terrain compte pour 10% de la valeur du terme A_{CR} . Il s'agit de la *Taille des blocs et du volume disponible* et la *Présence de tremplins*. La végétation qui masque une partie des parois a contribué à augmenter l'incertitude et la variabilité de la sélection des critères.

Les abaques modifiés en appliquant les principes des lignes d'énergie donnent des résultats satisfaisants de l'efficacité des fossés. Cette modification est nouvelle et à la connaissance des auteurs n'a jamais été faite ailleurs. Il serait pertinent de faire plus de validations de cette transformation en testant l'applicabilité à des cas connus de rupture. Il serait aussi pertinent d'appliquer les abaques modifiés à des coupes de roc de moins de 26 m de haut, et de constater les différences dans les résultats. En théorie, les abaques modifiés peuvent aussi être applicables aux parois moins hautes.

Tableau 7-1. Évaluation de l'efficacité de deux fossés dont les dimensions les situent près de la limite des critères de sélection de la forme du fossé, soit de 1V:4H ou de 1V:6H. Cette limite est un ratio largeur sur profondeur de 4. L'abaque pour une paroi de 18.29 m de hauteur et incliné à 76° a été utilisé

Largeur (L)(m)	Profondeur (Pr) (m)	Ratio (L/Pr)	Sélection forme du fossé selon la méthodologie appliquée dans le MEDCP	Efficacité (%) si 1V:4H	Efficacité (%) si 1V:6H	Différence (%)
5.00	1.15	4.3	1V:6H	93	72	21
4.50	1.15	3.9	1V:4H	87	66	21

7.2.2. Potentiel de rupture (S_{CR})

Tel que présenté dans la méthodologie, treize paramètres de la fiche MTQ sont en lien avec le potentiel de rupture (S_{CR}). Dans ce rapport, le S_{CR} est calculé de la sommation de dix des treize paramètres divisée par la valeur maximale théorique. Le choix de conserver dix paramètres est basé sur leur relation avec les *Cotes terrain* et le jugement de leur validité. Lors du développement méthodologique, des tests ont été effectués en faisant la somme de 8, 9, 10, 11, 12 ou 13 paramètres et en faisant varier quels critères étaient conservés ou non. Bien entendu, le classement variait d'un essai à l'autre, mais en général, les différences n'étaient pas majeures.

Ici, nous discutons de certains des paramètres. Premièrement, le paramètre nommé *Rugosité* est jugé difficile à évaluer puisqu'une faible répétabilité était obtenue entre les opérateurs. Cette difficulté résulte en partie de la détermination du choix de la famille de discontinuité sur laquelle se produirait le glissement. Parfois, plus d'un mode de ruptures se produit sur la paroi et l'utilisateur doit sélectionner celui qui appert le plus problématique. Deuxièmement, les plages de critères d'évaluation du paramètre *Ouverture* devraient être modifiées, car la grande majorité des coupes obtiennent un pointage de 81. Le paramètre, tel qu'il a été évalué, ne permet pas de discerner les coupes entre elles. Les seuils d'ouverture, en millimètre, définissant les critères de la fiche étaient mal adaptés aux coupes rencontrées sur le territoire étudié. Effectivement, une ouverture de 5 mm est rencontrée pour un bon nombre de fractures sur la majorité des coupes, en raison des méthodes de sautage appliquées lors de leur création. Troisièmement, le paramètre *Déformation* a été jugé peu représentatif de la susceptibilité à générer des chutes de pierres et n'a pas été utilisé pour l'évaluation de S_{CR} . Ceci est principalement dû au fait que les lithologies rencontrées le long du territoire sont similaires entre-elles. Toutefois, si les lithologies étaient très variables ce paramètre pourrait être pertinent. D'ailleurs les systèmes de type RHRS sont fréquemment adaptés par les différentes agences, pour tenir compte des caractéristiques propre à une région.

L'une des sources d'erreur de l'évaluation du S_{CR} et donc du $D_{MEDCP, CR}$ découle de la sélection des critères de la fiche MTQ. Effectivement, il semble difficile d'obtenir une répétabilité parfaite entre des évaluateurs et même, il semble qu'un évaluateur doit évaluer un grand nombre de coupes avant de devenir lui-même constant. Puisque l'objectif du MEDCP est de comparer les parois entre-elles, il est essentiel que l'évaluation des dix critères soit faite de manière constante. Pour ce faire, nous recommandons que les évaluateurs soient formés et que des guides avec des exemples soient créés pour aider à rendre le choix de critères plus systématique. Dans le cas de l'évaluation faite dans le cadre du projet *ParaChute*, les évaluateurs ont acquis de l'expérience au cours du projet. Il est possible qu'il y ait des nuances entre les coupes de roc évaluées en début de projet par rapport à celles évaluées plus tard au cours du projet. La majorité des fiches ont été saisies par un même évaluateur ce qui assure une certaine constance dans les résultats.

Lors des travaux de l'été 2016, des fiches MTQ ont été saisies par deux nouveaux évaluateurs n'ayant pas participé aux travaux de l'été 2015 et cela, pour onze coupes. Les pointages sélectionnés varient, parfois peu, parfois de façon considérable entre les deux évaluations. Toutefois, la catégorie de priorité finale demeure la même pour neuf des onze parois, entre autre, parce que l'estimation du potentiel d'atteinte (A_{CR}) est en partie indépendante de l'évaluateur. Ainsi, ces changements impactent peu la gestion des coupes de roc. Les résultats sont présentés au tableau 7.2 et à la figure 7.3. De plus, il est important de noter que l'évaluateur B a reçu peu de formation quant à l'utilisation de la fiche et qu'il n'y a pas eu de période de calibration entre les évaluateurs pour assurer une constance. On suppose donc que les différences auraient été moindres si une période de calibration avait permis aux évaluateurs de s'accorder sur la définition des critères.

Le potentiel de rupture est aussi pondéré en fonction de la superficie de la paroi rocheuse. La superficie est approximée par l'aire d'un triangle calculée à partir de la longueur et de la hauteur maximale de la paroi. Puis, un facteur (F_{SUP}) est attribué en fonction de la valeur de la superficie. Les plages attribuées aux facteurs auraient pu être différentes. Pour les déterminer, nous avons fait quatre essais, présentés aux tableaux 7.3 et 7.4. Le scénario fort est le plus agressif, i.e. qu'il fixe le F_{SUP} à une valeur très faible, soit 0.01, pour un grand nombre de coupes de roc (201 coupes) comparativement au scénario faible (41

coupes), qui est le moins agressif. Le choix du scénario de F_{SUP} nous amène à nous questionner sur l'importance de la dimension de la coupe pour la détermination du potentiel de rupture (S_{CR}) et du danger ($D_{MEDCP, CR}$). À cet effet, le scénario fort a été supprimé rapidement, car des parois jugées de priorité élevée par la *Cote terrain* se retrouvaient dans les catégories de priorité 2 et 3. Au final, le scénario faible est celui qui a été conservé. Le terme F_{SUP} permet de diminuer le $D_{MEDCP, CR}$ des parois de faible superficie sans que ce facteur prenne le dessus sur la sommation des dix paramètres de la fiche MTQ (Y_{CR}).

Tableau 7-2. Évaluations de onze parois réalisées à un an d'intervalle par deux évaluateurs différents.

#	Évaluateur A (2015)				Évaluateur B (2016)			
	S_{CR}	A_{CR}	$D_{MEDCP, CR}^b$	Priorité	S_{CR}	A_{CR}	$D_{MEDCP, CR}^b$	Priorité
1	0.6000	0.8479	0.6000	1	0.5556	0.8368	0.4649	1
2	0.7111	0.9190	0.7111	1	0.5556	0.9079	0.5044	1
3	0.6444	0.9217	0.6444	1	0.4593	0.8735	0.4012	1
4	0.5778	0.6967	0.5778	1	0.2815	0.6522	0.1836	1
5	0.4444	0.0651	0.4444	2	0.2074	0.0762	0.0158	2
6	0.4963	0.5622	0.4963	1	0.3481	0.5474	0.1906	1
7	0.5963	0.6003	0.5963	1	0.4148	0.5892	0.2444	1
8	0.4593	0.4452	0.4593	1	0.2074	0.4341	0.0900	2
9	0.4667	0.4203	0.4667	1	0.3407	0.4092	0.1394	1
10	0.5111	0.2763	0.5111	1	0.4222	0.2652	0.1120	1
11	0.2667	0.0492	0.2667	2	0.1926	0.0344	0.0066	3

Tableau 7-3. Divers scénarios testés pour l'application du facteur de pondération pour la superficie des coupes de roc (F_{SUP}).

Superficie (m ²) Scénario faible	Superficie (m ²) Scénario moyen	Superficie (m ²) Scénario fort	Superficie (m ²) Scénario LOG	Facteur de pondération pour la superficie (F_{SUP})
Moins de 99	Moins de 199	Moins de 499	Moins de 100	0.01
100 à 199	200 à 399	500 à 999	101 à 500	0.1
200 à 499	400 à 999	1000 à 1999	501 à 1000	0.5
500 à 999	1000 à 1999	1999 à 4999	1001 à 5000	0.9
1000 à 1999	2000 à 3999			0.99
2000 et +	4000 et +	5000 et +	5000 et +	1

Tableau 7-4. Nombre de coupes de roc par plage de superficie pour les quatre scénarios de F_{SUP} .

Superficie (m ²) Scénario faible	Superficie (m ²) Scénario moyen	Superficie (m ²) Scénario fort	Superficie (m ²) Scénario LOG	Facteur de pondération pour la superficie (F_{SUP})
41	95	201	42	0.01
54	174	83	159	0.1
106	111	91	83	0.5
83	91	43	134	0.9
91	38			0.99
51	13	8	8	1

7.3. Classification MEDCP

7.3.1. Classification préliminaire vs classement MEDCP

Les classes préliminaires ont été évaluées au bureau avant les travaux terrain à l'hiver 2015. L'évaluation se fait en utilisant le MNT, les simulations de trajectoires préliminaires et la banque d'événements de chutes de pierres connus. Inspirée du système RHRS, cette classification doit aider à prioriser les évaluations terrain en vue de déterminer les $D_{MEDCP, CR}$. Les $D_{MEDCP, CR}$ s'accordent assez bien aux classes préliminaires attribuées aux coupes (fig. 7.4). Effectivement, aucune paroi classée C ne se retrouve dans la catégorie de priorité 1, ce qui est important, car ces parois seraient celles visitées en dernier lors des évaluations terrain. Dans une réalité de travaux de terrain où le temps est limité, il est possible que ces parois ne soient pas visitées et ce qui fait qu'il est primordial qu'aucune d'entre elles ne se situent dans la priorité 1. Un faible nombre (7 coupes de roc) est catégorisé priorité B. Ainsi, il semble que la classification préliminaire ne cerne pas suffisamment bien les parois de faibles priorités pour justifier que des évaluations terrain ne soient pas menées sur les coupes de roc classées C. Les parois de classe préliminaire A forment la majeure partie des coupes de roc dans la catégorie de priorité 1. Les parois classées B se retrouvent dans toutes les priorités. Ainsi, il semble que, selon ces critères, les coupes de roc classées B devraient aussi être évaluées sur le terrain en priorité, car certaines (19 coupes de roc) se retrouvent dans la catégorie de priorité 1.

7.3.2. Comparaison avec les autres systèmes de type RHRS

Le MEDCP est similaire concernant certains points à des systèmes de classification de coupes de roc existants et se distingue par certains éléments. La reconnaissance et l'intégration des secteurs de parois éloignées dans le MEDCP est l'une des distinctions majeures par rapport aux autres systèmes. L'utilisation des levés LiDAR aéroporté et mobile pour déterminer certains facteurs géométriques est aussi une nouveauté par rapport à d'autres systèmes qui effectuent l'analyse à partir de paramètres terrain uniquement. Puisque les autres systèmes ne considèrent pas les parois éloignées et les falaises naturelles, la comparaison se concentrera sur le MEDCP appliqué aux coupes de roc.

L'évaluation du potentiel de rupture, autant pour les coupes de roc que pour les secteurs de parois éloignées est en quelque sorte semblable à celle du RHRS de base et de plusieurs autres adaptations, car elle est basée sur des critères évalués visuellement. L'utilisation de pointage en base exponentielle (3, 9, 27 et 81) est aussi tirée du système du RHRS original. Ainsi, l'évaluation du potentiel de rupture (S_{CR}) est similaire à celle fait par le RHRS, mais elle est basée sur dix paramètres, alors que le RHRS en intègre cinq. Ces cinq paramètres sont les deux associés au caractère géologique (condition structurale et rugosité), celui de la taille et du volume des blocs disponibles; celui sur le climat et la présence d'eau sur la paroi et finalement, celui portant sur l'historique de chutes de pierres. Le MEDCP s'éloigne de l'approche adoptée par les systèmes du CN et de IOC-BGC qui déterminent une fréquence de rupture en se basant sur une évaluation visuelle. Il est aussi intéressant de noter que la cartographie des zones exposées aux mouvements de terrain au Québec est surtout basée sur la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain (Bilodeau et al. 2005, Demers et al. 2008) et non pas sur une probabilité de rupture. Ainsi, on cartographie les zones où des glissements peuvent se produire sous certaines conditions et à partir de certains paramètres et cela sans prendre en compte la notion temporelle, i.e. la probabilité de rupture. Ce type de cartographie demeure l'outil principal de gestion du risque de mouvements de terrain au Québec.

L'évaluation du potentiel d'atteinte intègre environ les mêmes paramètres que divers systèmes RHRS qui évalue l'efficacité des fossés en utilisant des abaques ou des critères de conception divers (RHRS, Colorado, IOC-BGC, CN). Dans le RHRS de base, le potentiel d'atteinte est déterminé par l'addition d'un pointage attribué en fonction de la hauteur de la paroi et d'un pointage attribué à l'efficacité des fossés. Ils indiquent que les trempins et la taille des blocs doivent être considérés dans l'évaluation de l'efficacité des fossés, mais la méthodologie exacte n'est pas expliquée. En ce point, notre système permet une évaluation plus simple, car elle propose une méthode systématique pour évaluer l'efficacité des fossés et des pointages sont attribués pour les paramètres *Présence de trempins* et *Taille des blocs et volume disponibles*. Les abaques de Pierson et al. (2001) sont utilisés dans d'autres méthodologies, telles que le système IOC-BGC. À notre connaissance, le MEDCP est le premier à proposer une modification des abaques pour leur application à des parois de 26 m et plus de hauteur. Il a été montré dans les résultats du potentiel d'atteinte des coupes de rocs que l'application de l'abaque de 24.4 m à des parois de plus de 26 m de hauteur engendre une surestimation de l'efficacité des fossés. La modification des abaques corrige ce biais.

Dans la majorité des systèmes, la partie associée aux conséquences et à la vulnérabilité se présente de façon très simplifiée. Le RHRS original y accorde trois de ses dix paramètres : le «Average Vehicle Risk», le «Percent of Decision Sight Distance» et la largeur de la chaussée incluant les épaulements. Le système IOC-BGC accorde une valeur entre 0 et 1 qui représente la probabilité qu'une rupture d'un certain volume engendre une condition de voie ferrée impassable, et donc, possiblement un déraillement. Au Québec, le MTMDET pourrait adopter une approche similaire à celle du MEDCP, c'est-à-dire, en mettant l'emphase sur l'aléa plutôt que sur les conséquences. Ceci concorderait à ce qui est fait pour la cartographie des mouvements de terrain où on cartographie plutôt la susceptibilité. Les conséquences potentielles permettent de prioriser les travaux pour des terrains de susceptibilités similaires et à l'intérieur d'une même région. Dans notre approche, les potentiels d'atteinte et de rupture, donc l'aléa, permettent de catégoriser les parois en classe de priorité, puis les conséquences peuvent aider à départir les parois d'une même catégorie. En ce sens, notre approche méthodologique suit une certaine tendance en mettant l'emphase sur la partie de l'aléa.

Le système RHRS a été appliqué aux coupes de roc étudiées dans le cadre du projet *ParaChute* pour comparer le classement obtenu avec celui du $D^b_{MEDCP, CR}$. Quelques ajustements ont été faits aux paramètres du RHRS de base, afin de les faire concorder avec ceux disponibles pour les parois étudiées dans le projet *ParaChute*. Premièrement, seuls les sept paramètres concernant le potentiel de rupture et le potentiel d'atteinte ont été conservés. Deuxièmement, le pointage attribué au paramètre *Rugosité* de la fiche MTQ a été utilisé pour le premier paramètre des caractéristiques géologiques et le paramètre *Orientation des familles défavorables* pour le deuxième. Les paramètres *Présence d'eau*, *Taille des blocs et volume disponible* et *Historique de rupture* complète la liste. Puis, les pointages attribués aux sept paramètres ont été additionnés, et enfin, classés en ordre décroissant. La plus grande valeur correspond à la coupe de roc la plus problématique selon le système RHRS.

Le classement ainsi obtenu a été comparé à celui obtenu avec le $D^b_{MEDCP, CR}$ pour les 425 coupes de roc (fig. 7.5). Les classements ne sont pas les mêmes, mais les parois les plus problématiques et les moins problématiques concordent assez bien ce qui vient appuyer la validité du MEDCP étant donné que le système RHRS a été utilisé et validé dans d'autres régions du monde. Les différences principales se retrouvent au centre du classement. Les différences sont normales et souhaitables, car l'équation générale

du MEDCP accorde une importance plus grande à l'atteinte que le RHRS qui y consacre trois paramètres sur dix. D'autres systèmes utilisent des approches par multiplications, tels que le NY, CN et IOC-BGC. En comparaison, le RHRS de base consacre 5 paramètres sur 10 à la rupture. La figure 7.6 met l'emphase sur les 50 coupes de roc avec les scores RHRS les plus grands. Les parois avec les plus grands écarts de classement sont celles qui se retrouvent dans la partie de droite du graphique. Celles-ci sont considérées moins prioritaires selon la méthodologie RHRS. Les potentiels d'atteinte de ces parois sont tous inférieures à 0.21 ce qui explique qu'elles soient considérées moins problématiques par le MEDCP que par le RHRS. Dans l'évaluation du MEDCP, 75% des potentiels d'atteinte (A_{CR}) sont supérieurs à 0.21.

7.3.3. Combinaison des secteurs de parois éloignées et des coupes de roc ($D_{MEDCP, SE}$ et $D_{MEDCP, CR}$)

Le principe derrière l'obtention des dangers MEDCP (D_{MEDCP}) des coupes de roc et des parois éloignées est le même : l'équation générale multiplie le potentiel d'atteinte au potentiel de rupture. De plus, les équations du potentiel de rupture sont de la même forme et les résultats s'étendent sur la même plage de valeurs. Aussi, les limites des catégories de priorité sont les mêmes dans les deux cas. Il devient donc intéressant de comparer les $D_{MEDCP, SE}$ AUX $D_{MEDCP, CR}$. Les coupes de rocs et les parois éloignées sont mises en commun et classée selon le D_{MEDCP} . Le résultat est illustré à la figure 7.7. Le gestionnaire peut donc considérer les priorités de la même façon. Toutefois, côté gestion les deux types de parois n'impliquent pas les mêmes considérations. Les parois éloignées se situent parfois hors de l'emprise de la voie ferrée et il s'agit souvent de falaises naturelles, où les chutes de pierres ne sont pas causées par les activités liées à la voie ferrée. Les gestionnaires devront élaborer une approche de gestion du risque pour considérer les secteurs de parois éloignées.

L'amalgame des secteurs de parois éloignées et des coupes de roc amènent une autre considération. Parfois, les deux types de parois bordent une même portion de la voie ferrée. Ainsi, cette portion de voie ferrée est soumise à deux sources distinctes de chutes de pierres et son danger total en est donc augmenté. Le même phénomène se produit lorsque la voie ferrée est située dans une tranchée. La visualisation cartographique des résultats permet de cerner ces portions de voie ferrée aisément.

7.3.1. Illustration de l'intégration du terme **Conséquence et Vulnérabilité (C&V)**

Afin d'illustrer l'utilisation du terme Conséquence et vulnérabilité (**C&V**), la visibilité moyenne déterminée par calculs numériques sur le MNT est mise en graphique en fonction de la valeur du D_{MEDCP}^p (fig. 7.8). L'exercice est fait pour les coupes de roc de la catégorie de priorité 1 uniquement. Ici, nous faisons l'hypothèse que la vulnérabilité du train augmente avec la diminution de la distance de visibilité. Effectivement, si la distance de visibilité est courte, l'opérateur disposera d'une plus courte distance pour freiner le train avant d'atteindre l'endroit affecté par une chute de pierres. Il serait plus adéquat de mettre cette distance de visibilité en relation avec la vitesse du train et d'autres facteurs qui pourraient influencer sa distance de freinage, mais ceci dépasse le cadre de cet exercice. Il s'agit ici d'une façon très simple d'illustrer ce que pourrait être un facteur qui prend en considération les conséquences et comment il pourrait permettre au gestionnaire de discriminer les parois à l'intérieur d'une même priorité.

Dans le graphique de la figure 7.8, la vulnérabilité augmente de bas en haut, avec la diminution de la distance de visibilité. Quatre coupes de roc ont des distances de visibilité supérieures à 300 m. Dans le cadre d'un exercice de priorisation, ces parois pourraient être considérées moins prioritaires que les autres

de la même catégorie. Ensuite, quatorze coupes de roc ont des distances de visibilité inférieures à 100 m. Celles-ci pourraient être considérées en premier lieu pour l'analyse des besoins futurs. Aussi, il est possible d'opter pour aller faire des travaux qui viendraient agir sur le paramètre de conséquences directement. Dans cet exemple, les visibilités moyennes sont majoritairement situées entre 100 et 200 m (53 coupes sur un total de 81). Ainsi, le paramètre ne permet pas de bien différencier les coupes entre elles. Ceci est en partie causé par le fait que les coupes de roc de la priorité 1 sont souvent hautes (50 font plus de 20 m de hauteur). Les hautes coupes font obstacles à la visibilité. Dans cet exemple, les tunnels ont été retirés, car la distance de visibilité à leur sortie ne peut pas être évaluée correctement du MNT.

7.4. Outils d'aide à la gestion des parois rocheuses

Dès sa conception initiale (fig. 7.9), la contribution principale du projet *ParaChute* visait l'établissement d'une cartographie de chutes de pierres provenant de deux types de parois rocheuses: les coupes de roc et les falaises éloignées. Cette cartographie est établie à partir d'un outil, le MEDCP. Le danger lié à l'instabilité de parois rocheuses doit aussi être considéré dans la gestion globale des parois rocheuses et la base de données fournit beaucoup d'informations à cet effet. La méthodologie générale pour le MEDCP s'inspire d'une approche basée sur l'analyse du risque selon l'équation générale suivante :

$$MEDCP = D_{MEDCP} \times \text{Conséquence et vulnérabilité (C\&V)} \quad [7.1]$$

Selon cette approche, le projet *ParaChute* s'intéresse à la première composante de l'équation, i.e. le danger. En plus du danger (potentiels de rupture et d'atteinte) dont la méthode a été développée ici, l'équation générale considèrerait les conséquences (C) et la vulnérabilité (V). Tel qu'indiqué auparavant, l'organisme responsable des infrastructures est le mieux placé pour quantifier les éléments liés aux conséquences et à la vulnérabilité.

Lorsque des données historiques sur les événements de chutes de pierres en quantité et qualité suffisantes seront disponibles, il deviendra possible de remplacer le danger par l'aléa et donc d'évaluer le risque dans le domaine temporel, par exemple, en coût annuels acceptables (e.g. Fell et al. 2005). Tel qu'indiqué plus haut, en l'absence de données temporelles sur la fréquence des chutes de pierre, le projet *ParaChute* considère plutôt la susceptibilité des parois rocheuses à générer des chutes de pierres.

La gestion des parois rocheuses peut déjà se baser sur les classes de priorité établies dans le cadre du projet *ParaChute*. Afin de raffiner l'évaluation du danger posé par des coupes de roc pour lesquelles des méthodes de mitigation ont été appliquées, nous avons introduit le paramètre *M*. Ce paramètre vient prendre en compte l'efficacité des interventions déjà réalisées quant à la réduction du danger pour diminuer, s'il y a lieu, le danger à un niveau résiduel plus ou moins important selon l'étendue et la performance des méthodes de mitigations. Cette valeur devra être déterminée par l'organisme en charge des infrastructures, pour le cas d'ArcelorMittal il s'agit de 46 coupes de roc. Une fois cet exercice complété, l'établissement final des D'_{MEDCP} pourra être complété et les priorités d'intervention identifiées. Tel que présenté lors des résultats, le cas des grands glissements devra éventuellement être pris en compte dans la gestion des parois rocheuse.

Ainsi, avec l'aide de la carte de danger résiduel à jour et les résultats de l'inspection, les conséquences d'une chute de pierres atteignant la voie ferrée pourront être évaluées et ces résultats utilisés pour sélectionner définitivement les parois qui méritent une attention prioritaire (fig. 7.10). On procédera alors à

des travaux de mitigation ou d'inspection selon le cas. Une fois ces travaux réalisés, il est impératif de réévaluer la valeur de M des parois considérées et mettre à jour la banque de données. La boucle de gestion sera complétée avec la mise à jour de la carte de danger résiduel (fig. 7.10). C'est ce qui fait que l'approche MEDCP est une méthode qui permet une gestion évolutive des parois rocheuses.

Le projet *ParaChute* a permis la création de divers outils (e.g. cartes), incluant une base de données impressionnante qui devra être utilisée par des personnes compétentes. Les finissants en génie géologique de l'Université Laval ont acquis des connaissances géomécaniques suffisantes d'analyse de la stabilité des parois rocheuses et utilisent sur une base régulière les outils SIG et ils devraient en être de même pour ceux d'autres universités offrant des programmes semblables. Le milieu des firmes de consultants devrait donc être en mesure d'optimiser l'utilisation des divers outils créés ici et d'aider les organismes responsables de la gestion d'infrastructures linéaires à réduire les conséquences de chutes de pierre. Il y aura lieu de considérer une formation pour la compagnie qui verra à faire les études subséquentes (e.g. inspection) afin de s'assurer qu'elle ait la maîtrise des outils et de la base de données générée pour la voie ferrée d'ArcelorMittal par le projet *ParaChute*.

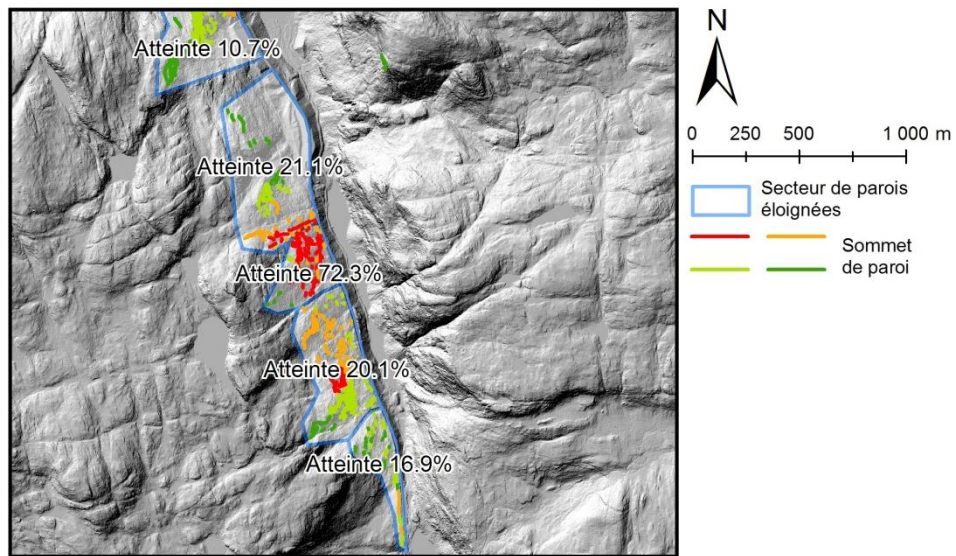


Figure 7.1. Secteur de parois éloignées du secteur des canyons dans le canton de Jig. À cet endroit, les secteurs sont en continu.

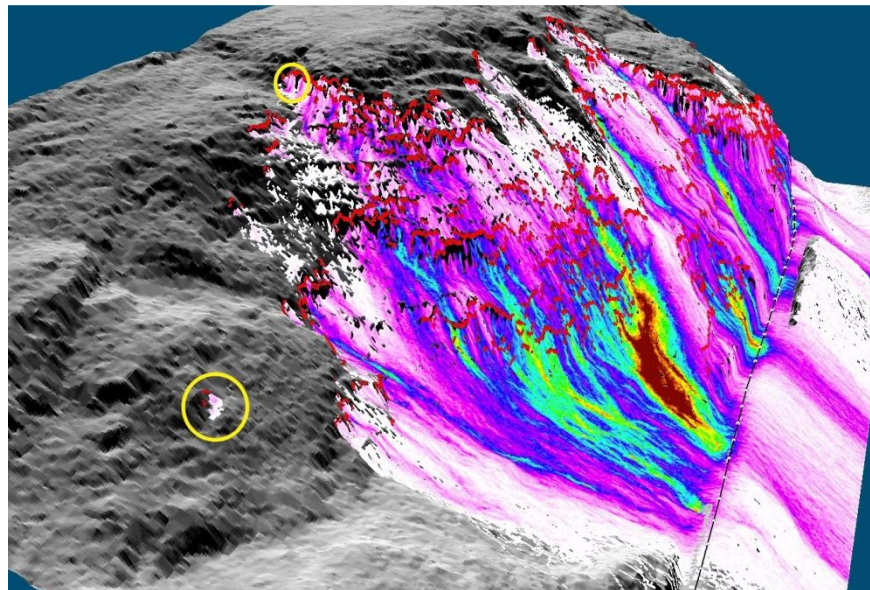


Figure 7.2. Trajectographie du secteur J PM154.3. Deux escarpements dont les trajectoires n'atteignent pas la voie ferrée sont identifiés.

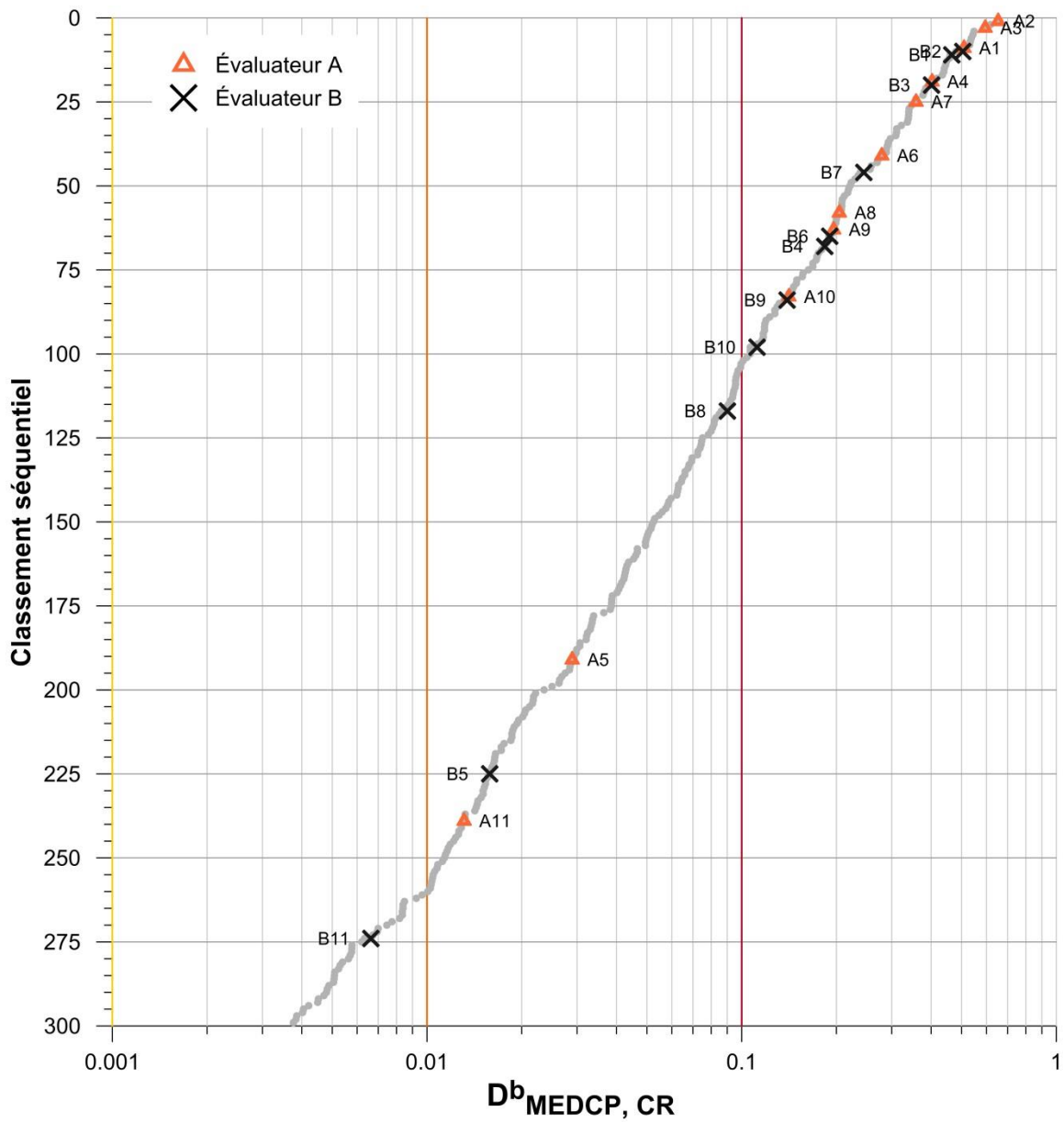


Figure 7.3. Classement obtenu pour onze parois évaluées par deux évaluateurs différents à un an d'intervalle.

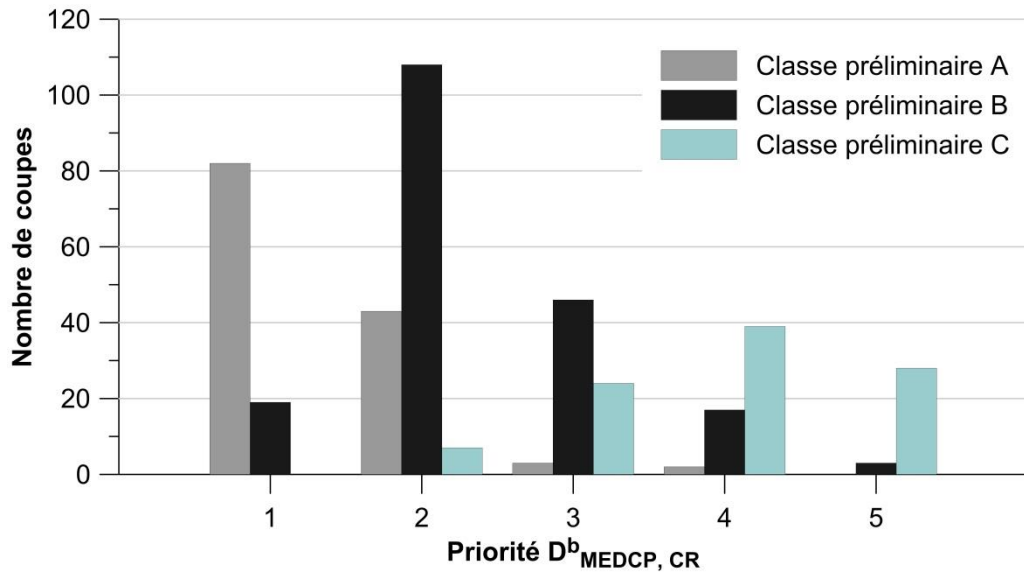


Figure 7.4. Pour chacune des classes préliminaires, un histogramme présente le nombre de coupes de roc qui ont été catégorisées dans chacune des cinq classes de priorité du MEDCP.

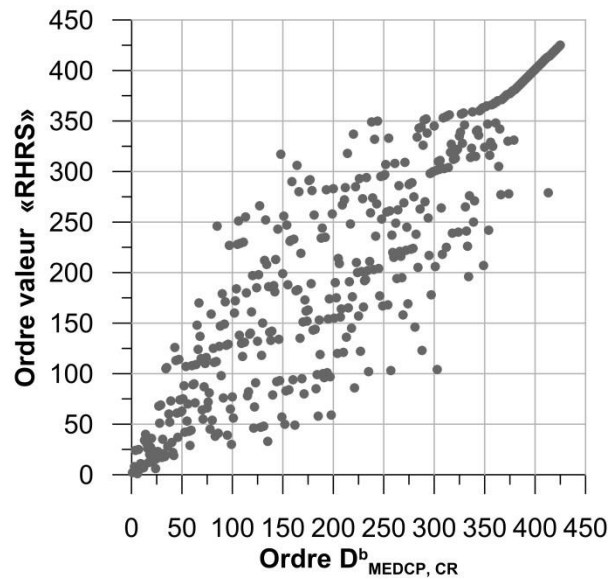


Figure 7.5. Ordre séquentiel obtenu par l'application de la méthode RHR aux coupes de roc du projet ParaChute en fonction du classement séquentiel obtenu par le MEDCP. Si le même classement était obtenu des deux systèmes, les points du graphique s'aligneraient sur une droite inclinée à 45°, ce qui est la tendance observée.

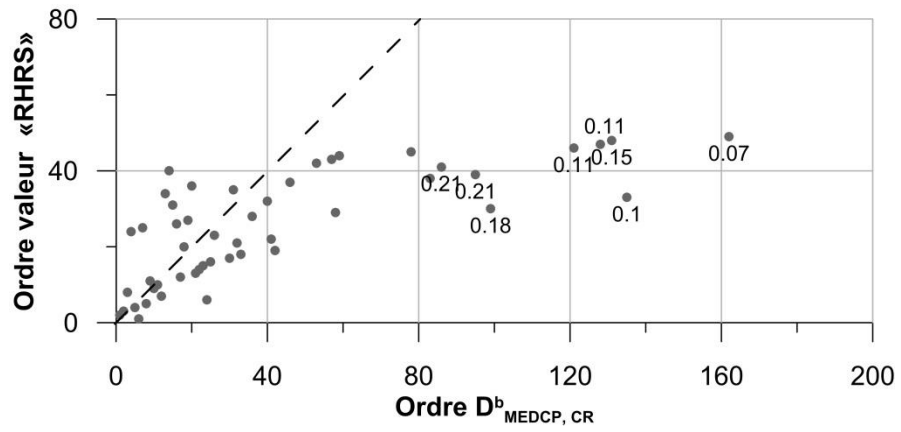


Figure 7.6. Ce graphique présente que les 50 coupes avec les scores RHRS les plus élevés et est le même que celui de la figure précédente. Les annotations indiquent la valeur du potentiel d'atteinte évalué par le MEDCP (A_{CR}).

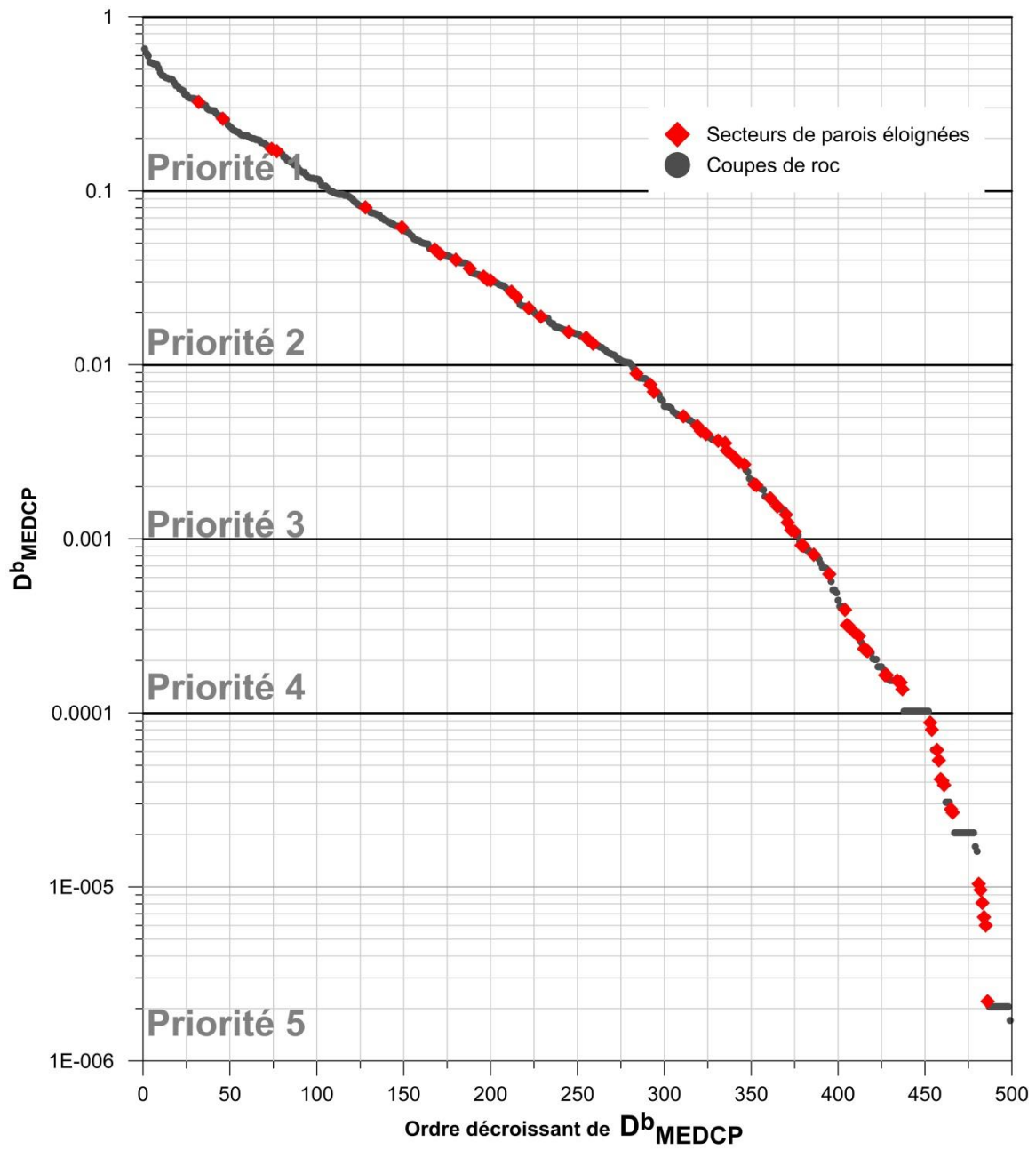


Figure 7.7. Intégration des D^b_{MEDCP} des secteurs de parois éloignées et des coupes de roc. Les secteurs de parois éloignées sont symbolisés en rouge. Les plages de valeurs sont les mêmes pour les deux types de parois.

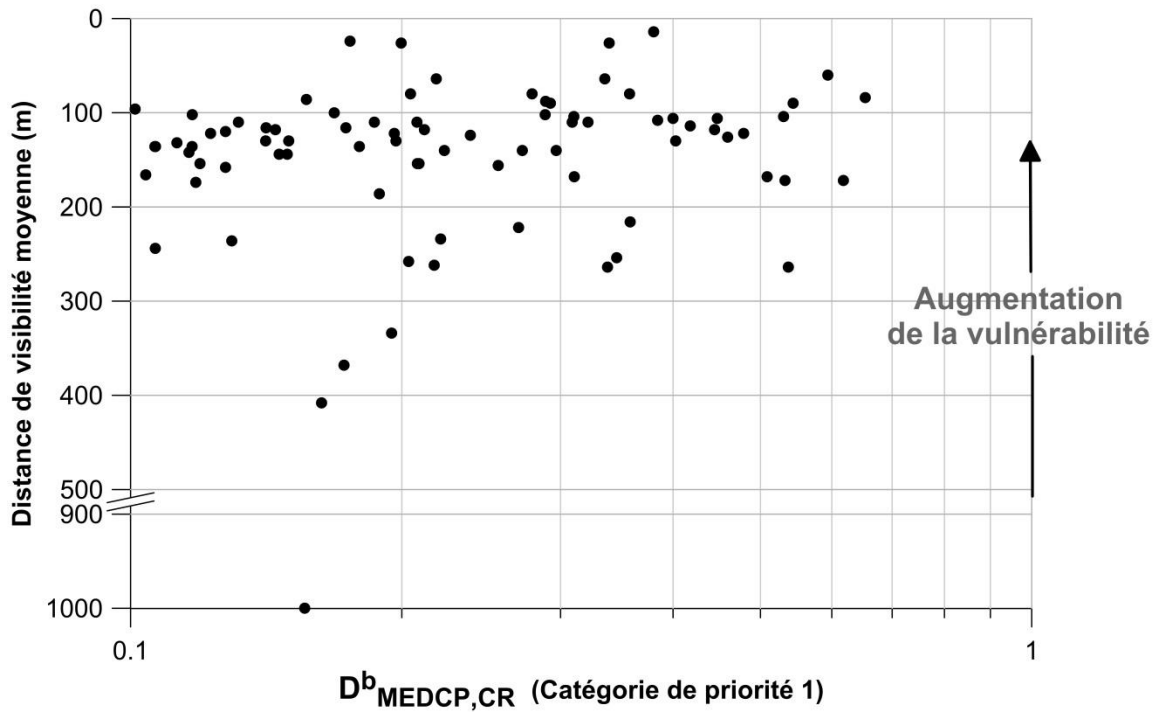


Figure 7.8. Ce graphique met en relation les D_{MEDCP} des coupes de roc de catégorie 1 avec la visibilité moyenne calculée à partir du MNT au droit des coupes de roc. Les coupes de roc situées dans la portion supérieure du graphique sont celles dont la visibilité est la plus faible, et donc, où l'opérateur de locomotive dispose d'une distance plus courte pour appliquer les freins avant d'atteindre l'endroit où une chute de pierres se serait immobilisée sur la voie ferrée.

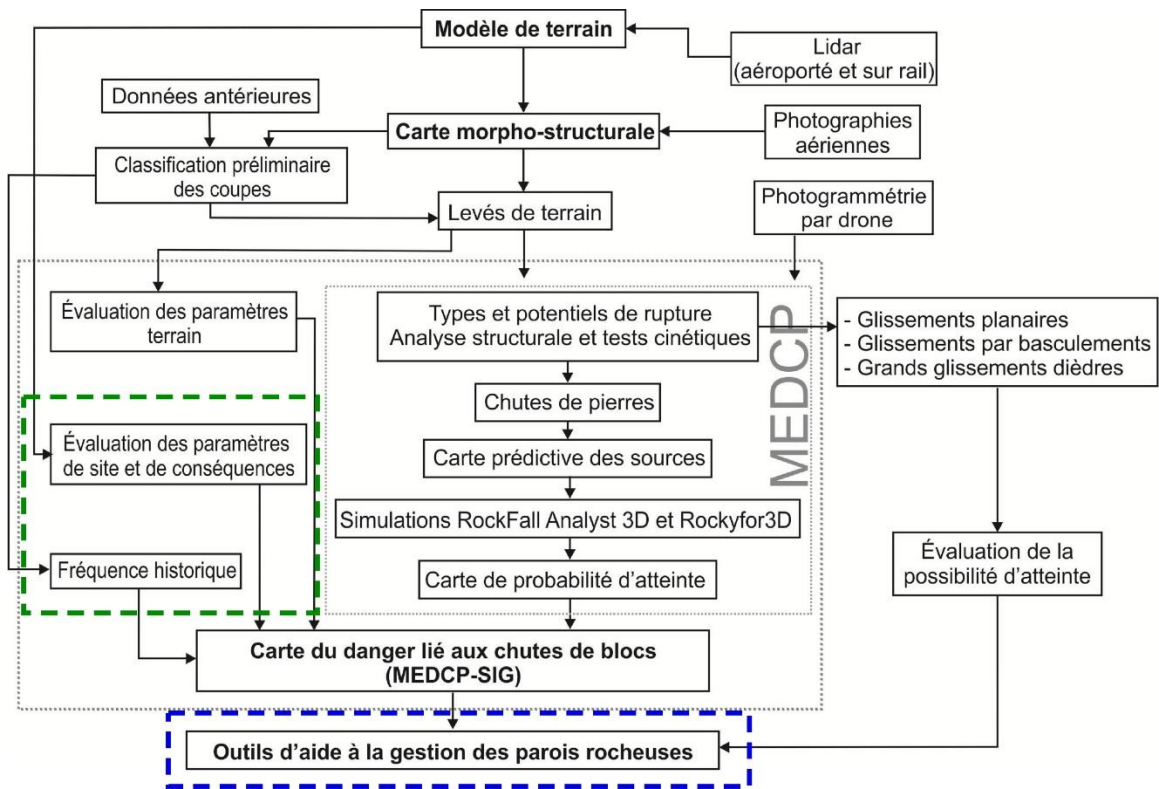


Figure 7.9. Organigramme du projet ParaChute et les éléments liés aux conséquences (encadré vert) et à la gestion (encadré bleu).

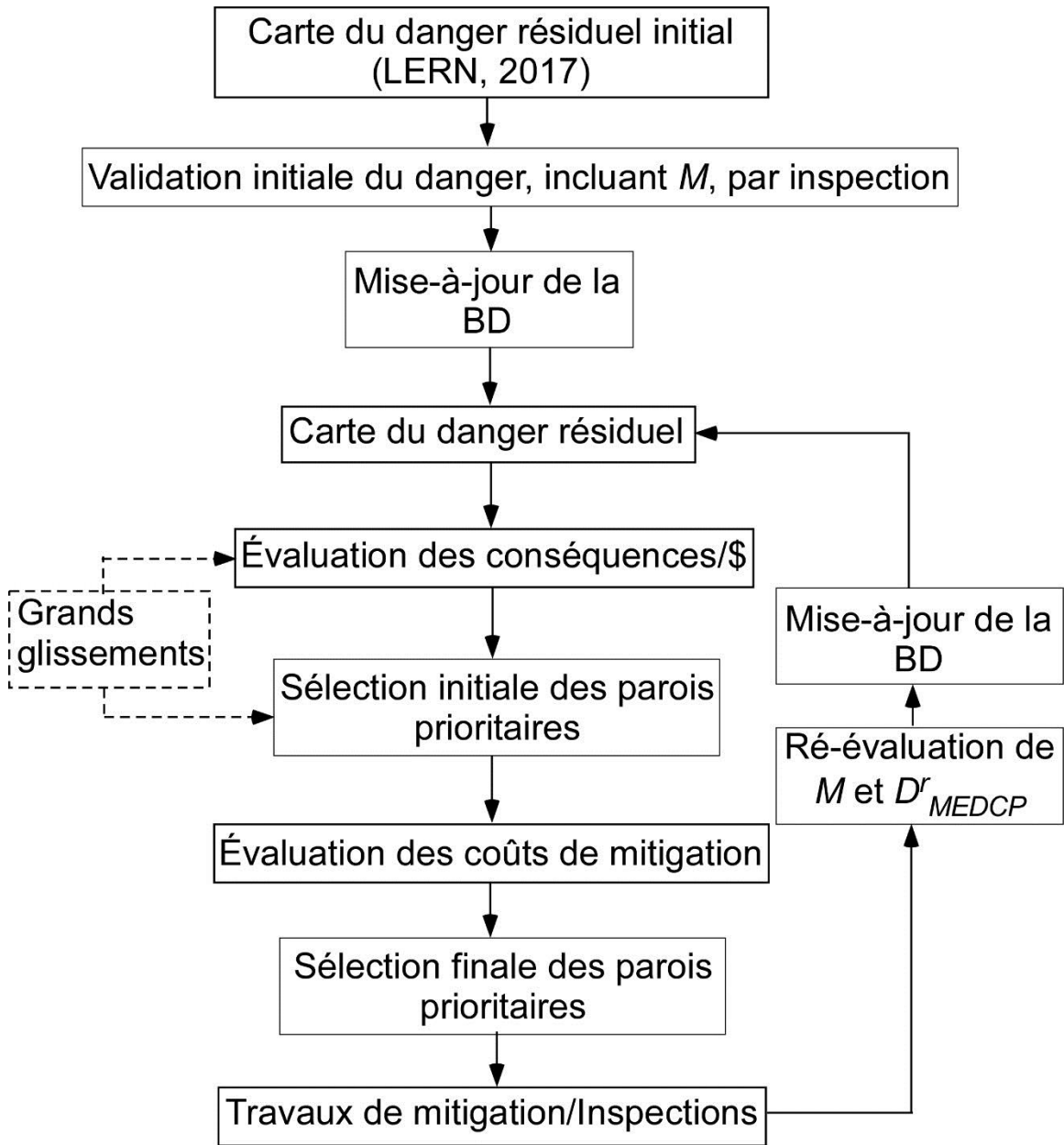


Figure 7.10. Approche suggérée quant à l'utilisation des outils de gestion dans la réduction du danger posé par les chutes de pierre le long de la voie ferrée d'ArcelorMittal.

8. Conclusions

La première visite de l'équipe du LERN de la voie ferrée d'ArcelorMittal a eu lieu en juin 2014 et a permis de définir les objectifs du projet ParaChute. Il s'agissait du début d'un projet d'envergure, qui a nécessité huit semaines de travaux de terrain, une analyse portant sur un territoire de 1244 km² et près de 2.3 To de données brutes. La collaboration entre les chercheurs de l'Université Laval, ArcelorMittal et le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports a permis d'atteindre les objectifs du projet, qui s'est déroulé sur une période d'un peu moins de trois ans.

Le devis du projet ParaChute avait fixé sept objectifs généraux et sept objectifs spécifiques. Les objectifs spécifiques sont issus des objectifs généraux et adaptés au contexte précis du projet ParaChute, de là une certaine redondance dans leur formulation. Les lignes qui suivent vont indiquer en concluant sur comment ces objectifs ont été atteints et cela à partir de objectifs généraux et spécifiques. De plus, des éléments novateurs se sont naturellement ajoutés en cours de réalisation et seront présentés par la suite. Aux conclusions présentées ci-après, il faut aussi considérer toutes les retombées réalisées dans le cadre du projet et qui ont été énoncées au chapitre 3.

8.1. Conclusion sur les objectifs généraux

Objectif 1(13) : Se doter d'une méthodologie et d'outils permettant de caractériser la susceptibilité d'endommagement d'un ouvrage linéaire par les chutes de pierres comme soutien à la gestion de ces dangers dans l'aménagement sécuritaire du territoire et cela tant pour les gestionnaires du territoire que pour ArcelorMittal : le MEDCP

Le projet ParaChute a réalisé le développement d'une nouvelle approche québécoise de l'analyse du danger posé par les chutes de pierres le longs des infrastructures linéaires (routes et voies ferrées) qui vient soutenir les organismes responsables dans l'aménagement et le maintien sécuritaire des ouvrages. Cet outil est le MEDCP (Méthode d'Évaluation du Danger de Chutes de Pierres) qui vient appuyer les organismes en charge de ces infrastructures afin d'en augmenter la sécurité basé sur la relation suivante :

$$\begin{aligned} \text{MEDCP} = & \\ & \text{Potentiel de rupture (S)} \times \text{Potentiel d'atteinte (A)} \times \\ & \text{Conséquence et Vulnérabilité} \end{aligned} \quad [8.1]$$

Objectif 2 : Développer des outils facilitant l'intégration des données dans un environnement SIG afin de faciliter la gestion de larges territoires

Le développement du MEDCP a nécessité l'adaptation d'outils numériques tels que Rockyfor3D aux modèles de terrain et son intégration dans un SIG afin de les appliquer à l'ensemble du territoire soit environ 1244 km² et qui traverse quatre zones climatiques (Ouranos, 2014). Plusieurs de ces éléments ont été développés dans le cadre du projet de maîtrise de François Noël (Noël, 2016). Toutes les données du projet sont directement accessibles dans un environnement SIG ce qui en facilite grandement l'accessibilité, la visualisation et la gestion.

Objectif 3 : Valoriser les modèles numériques de terrain haute résolution

Les modèles numériques de terrain sont au cœur du développement du MEDCP et ils ont été valorisés avec l'ajout de nouvelles méthodes utilisées pour la première fois au Québec telles que le LiDAR mobile et l'usage de drones. L'utilisation d'un drone en milieu ferroviaire a permis l'acquisition d'images et de vidéos de hautes parois rocheuses en vue de générer des modèles photogrammétriques et d'augmenter la qualité et la résolution des modèles numériques de terrain qui sont aussi mis en valeur dans le cadre du projet de maîtrise de Mélanie Mayers (Mayers 2017). Ces mêmes modèles de terrain ont aussi été valorisés en les utilisant intensivement dans l'évaluation du potentiel d'atteinte des chutes de pierres ce qui a permis de réduire sensiblement les incertitudes liées à l'évaluation du danger par le MEDCP.

Objectif 4 : Fournir un exemple de développement stratégique, associé à la gestion sécuritaire d'infrastructures, et dont la diffusion sera assurée aux différentes collectivités par les publications et présentations qui y seront reliées.

Le projet ParaChute est un exemple concret de développement stratégique, car les organismes participants (ArcelorMittal, MTMTDET et Université Laval) y ont partagé leurs intérêts dans un objectif de créer des outils visant à augmenter la gestion sécuritaire d'infrastructure. Le MEDCP vient offrir un outil de gestion accessible au public, par le biais de différentes publications et présentations. Le projet ParaChute a été présenté lors de congrès, avec et sans articles associés. Les diverses présentations sont énumérées au tableau 8.1. À ce moment-ci, les congrès ont été valorisés à cause de la rapidité avec laquelle nos travaux peuvent être diffusés.

Tableau 8-1. Présentations du projet ParaChute lors de divers congrès.

Événement	Lieu, date	Présentateur	Titre
GéoQuébec www.geoquebec2015.ca	Québec, 20-23 septembre 2015	Catherine Cloutier	An integrated management tool for rockfall evaluation along transportation corridors: description and objectives of the ParaChute research project
GéoQuébec www.geoquebec2015.ca	Québec, 20-23 septembre 2015	François Noël	L'aléa chutes de pierres: la modélisation préliminaire 3D des trajectoires en aide à la planification des travaux de terrain sur un vaste territoire
<i>Joint Technical Committee 1 TR3 Forum: Slope Safety Preparedness for Effects of Climate Change</i>	Naples, Italie, 17-18 novembre 2015	Catherine Cloutier	Potential Impacts of Climate Change on Landslides Occurrence in Canada
<i>2015 Railroad Ground Hazard Research Group Workshop</i>	Montréal, 8 décembre 2015	Catherine Cloutier	An integrated management tool for rockfall evaluation along transportation corridors: description and objectives of the ParaChute research project
Colloque de la sécurité civile et incendie 2016 www.securitepublique.gouv.qc.ca /securite-civile/activites- evenements/colloque- sci/2016/programme.html	Québec, 15 février 2016	Jacques Locat	Les mouvements de terrain et leurs conséquences : Survol et état d'avancement des projets du Laboratoire d'études sur les risques naturels, dont le projet ParaChute
Colloque 2016 du groupe TRAQ www.groupe-traq.com	Québec, 22 mars 2016	Jacques Locat et Catherine Cloutier	Projet ParaChute : Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long des voies ferrées : description et objectifs
General Assembly 2016 European Geoscience Union	Vienne, 17 au 22 avril 2016	Mélanie Mayers	An integrated management tool for rockfall evaluation along transportation corridors: the ParaChute research project
12 th International Symposium on Landslides	Naples, 12 au 19 juin 2016	Jacques Locat	Using Point Clouds as Topography Input for 3D Rockfall Modeling
Les défis du transport et des infrastructures ferroviaires, Colloque de l'AQtr	Montréal, 17 novembre 2016	Catherine Cloutier	Les nouvelles technologies en milieu ferroviaire : les drones et leur utilisation pour la création de modèles 3D de parois rocheuses
3rd North American Symposium on Landslides	Roanoke, Virginia, USA	Catherine Cloutier	Estimating the rock fall reach potential form natural cliffs along a transportation corridor
GeoOttawa	Ottawa, octobre 2017	Mélanie Mayers	Analyse de la susceptibilité aux chutes de pierres sur nuages de points de parois rocheuses

Objectif 5 : Augmenter la sécurité du réseau ferroviaire et diminuer les pertes économiques engendrées par des arrêts non planifiés en lien avec les chutes de pierres

Le MEDCP vient augmenter la sécurité du réseau ferroviaire et la réduction des pertes économiques, tout d'abord, par une meilleure connaissance du territoire et par l'identification des secteurs à prioriser pour réduire le danger de chutes de pierre. Ce sera par l'utilisation du MEDCP et le maintien de la mise à jour de la base de données qu'on pourra optimiser les mesures de mitigation qui visent soit à empêcher les pierres de tomber ou encore les faire tomber dans un contexte contrôlé, i.e. à une période où les impacts économiques sont moindres (e.g. écaillage). L'utilisation du MEDCP devrait donc réduire les périodes d'arrêt de la voie ferrée causées par des chutes de pierre imprévues.

Objectif 6 : Évaluer l'utilité des drones pour la photogrammétrie et lors de situations d'urgences

Nous avons utilisé le drone pour obtenir des informations sur les zones moins accessibles des parois rocheuses. Pour les falaises éloignées nous avons utilisé l'hélicoptère. Dans tous les cas, l'objectif final est de réaliser un modèle de terrain à partir de la photogrammétrie. Au cours du projet, nous avons réalisé que le type de drone que nous utilisons (moins de 2 kg) ne serait pas adapté à des situations d'urgence si la température n'est pas clémente, i.e. vent fort, pluie et obscurité. Par contre, pour le récent glissement de Saint-Luc-de-Vincennes, notre drone a pu être utilisé efficacement en appui à d'autres levés aériens incluant un drone de plus forte capacité. Ainsi le drone est très efficace pour créer des modèles de terrain pour la photogrammétrie, mais peut-être moins en cas d'urgence, selon les conditions météorologiques.

Objectif 7 : Étudier l'impact potentiel des changements climatiques sur les mouvements de terrain

Cet objectif a d'abord été réalisé via une réflexion générale au niveau international qui a culminée dans la rédaction d'un livre dans lequel nous avons contribué par la rédaction d'un chapitre portant sur la situation canadienne (Cloutier et al. 2016). Dans le cadre du projet ParaChute, Ouranos (Fournier et al. 2016) a présenté un rapport portant sur la situation dans la région d'étude. Toutes ces informations ont été présentées et discutées lors du 1^{er} Atelier québécois sur les impacts des changements climatiques sur les mouvements gravitaires tenu à Québec le 31 janvier 2017 et auquel ont participé au moins 50 personnes. Les principales conclusions seront, comme convenu dans le devis de recherche, présenté dans un rapport distinct.

8.2. Conclusion sur les objectifs particuliers

Objectif 8 : Établir la base de données géoscientifiques

Tel qu'il a été décrit dans la section portant sur la base de données, l'ensemble des données géoscientifiques du territoire a été rassemblé à l'intérieur d'un SIG afin d'en rendre l'accessibilité facile et efficace.

Objectif 9: Réaliser l'analyse cinématique semi-automatisée des différentes instabilités rocheuses à l'aide des données structurales analysées avec Coltop 3D et des données provenant du modèle numérique d'élévation

Les données provenant du LiDAR mobile, du LiDAR terrestre et de la photogrammétrie ont permis la définition des conditions structurales des diverses coupes rencontrées le long de la voie ferrée et cela à partir du logiciel Coltop. Tous les résultats sont directement accessibles dans la base de données intégrée au SIG. Cette réalisation a été faite tout d'abord avant d'aller sur le terrain afin d'optimiser le temps disponible aux observations et au bureau par la suite afin de préciser les analyses finales.

Objectif 10 : Produire la carte morphostructurale

La carte morphostructurale de l'ensemble du secteur a été réalisée et présentée sous la forme d'un atlas qui est aussi directement accessible dans le SIG développé pour le projet (Mayers et al. 2017). Sa réalisation a demandé un effort majeur et sa confection sera d'une grande utilité pour la gestion des risques naturels le long de la voie ferrée d'AcélorMittal. La méthodologie a été adaptée afin d'améliorer la technique d'élaboration et son affichage dans un environnement SIG. La méthodologie a été raffinée dans le cadre du projet ParaChute et pourra être utilisée pour d'autres régions.

Objectif 11 : Adapter les logiciels Rockyfor3D et Rock Fall Analyst 3D au contexte québécois comme outil d'évaluation de l'aléa chutes de pierres le long des infrastructures ferroviaires et routières du Québec

Après des analyses comparatives, nous avons adopté le logiciel Rockyfor3D pour la réalisation de la trajectométrie des falaises éloignées (Noël 2016). Cette application de simulations de trajectoires de chutes de pierres a permis une analyse systématique d'un large territoire pour permettre la reconnaissance des secteurs de parois éloignées dont les chutes de pierres pourraient atteindre la voie ferrée. Cette méthode (et les scripts associés) pourra être appliquée à toute autre région ayant des falaises rocheuses présentant un danger de chutes de pierres.

Objectif 12 : Développer l'utilisation des drones à l'analyse des falaises rocheuses et lors d'interventions en situation d'urgence

Pour ce qui est des situations d'urgence cela a été conclu avec l'objectif 6. Pour ce qui est des falaises rocheuses et des coupes de roc en particulier, le drone s'est avéré un outil très performant pour l'acquisition d'images permettant la réalisation de modèles de terrain qui s'intègrent à ceux réalisés par des outils parents (e.g. LiDAR mobile). Un élément important que le projet nous a fait réaliser est que le drone constitue aussi un outil très sécuritaire pour l'auscultation de données structurales de parois hautes et à fortes pentes au pied desquelles il peut être dangereux d'y travailler trop longtemps.

Objectif 13 : Développer une approche québécoise du Rockfall Hazard Rating System (RHRS) pour mettre au point la Méthode d'Évaluation du Danger de Chutes de Pierres (MEDCP)

Cet objectif reprend l'objectif 1 et a donc été réalisé avec le MEDCP. On pourrait juste souligner ici, que par rapport au RHRS, que le développement du MEDCP a permis de réduire sensiblement les incertitudes liées à ce type d'analyse, surtout en intégrant une façon plus rationnelle d'évaluer l'atteinte. L'atteinte de cet objectif s'est traduit par la mise au point des équations inspirées de l'analyse du risque.

Objectif 14 : Intégrer la classification du danger associé aux chutes de pierres (MEDCP-SIG) à celle de l'aléa défini par trajectométrie afin de produire des cartes de susceptibilité aux chutes de pierres le long des tracés linéaires.

Au final, nous avons plutôt intégré l'aléa défini par la probabilité d'atteinte à la susceptibilité aux chutes de pierres (potentiel de rupture) pour évaluer le danger (voir objectif 1 à la section 8.1). Le MEDCP vient donc introduire la définition des termes potentiels d'atteinte et de rupture pour les secteurs de parois éloignées (S_{SE} et A_{SE}) et pour les coupes de roc (S_{CR} et A_{CR}). Les modifications introduites aux abaques de Pierson et al. (2001) pour l'évaluation de l'efficacité des fossés de parois de 26 m et plus de hauteur par l'utilisation du concept de ligne d'énergie constituent une approche novatrice pour ce type d'analyse et qui vient aussi optimiser l'utilisation des modèles numériques de terrain à haute résolution.

8.3 Développements méthodologiques additionnels

Le projet *ParaChute* a aussi permis le développement de méthodologies particulières qui constituent des contributions importantes à l'atteinte des divers objectifs du projet :

- Mise au point d'un outil de caractérisation des parois éloignées et des coupes de rocs;
- Réalisation de techniques d'analyses pré-terrain, incluant la réalisation d'analyses structurales sur les scans laser mobile réalisés à partir d'un véhicule sur rail et de tests cinématiques pour déterminer les modes de ruptures possibles afin de venir appuyer les travaux de terrain (O3, O9);
- Détermination d'une méthode de classification préliminaire réalisée au bureau à partir du MNT et des photographies aériennes;
- Élaboration d'une méthode de caractérisation de la dimension des fossés, de l'inclinaison et de l'orientation des parois à partir des scans lasers mobiles;
- Confection d'un algorithme permettant de calculer la distance maximale de visibilité le long d'un tracé linéaire à partir du MNT.

8.4 Formation universitaire

Ce projet d'ampleur a permis de former quatre stagiaires (Alexandra Jasmin, Benoît McFadyen, Anthony Paré et Frédérique Tremblay-Auger) et deux projets de maîtrise ont porté sur des aspects du projet. Il s'agit de la maîtrise de François Noël (Noël 2016), dont les travaux ont permis de reconnaître les secteurs de parois éloignées par des simulations de trajectoires appliquées systématiquement à tout le territoire. Son mémoire s'intitule «*Cartographie semi-automatisée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires*». La détermination du potentiel d'atteinte des secteurs de parois éloignées découlent aussi de ses travaux, puisque l'approche développée est une adaptation de la méthodologie développée dans ses travaux. Les

travaux de maîtrise de Mélanie Mayers sont aussi réalisés à partir des données acquises du projet *ParaChute* et ont permis de développer l'usage du drone pour l'acquisition d'images pour la création de modèles photogrammétriques de parois rocheuses. Dans ses travaux, des tests cinématiques sont appliqués directement sur les nuages de points obtenus de la photogrammétrie et des scans lasers ce qui permet de prendre en considération les variations du profil de la pente ainsi que les ruptures qui se produisent en surplombs. Les travaux optimisent l'utilisation des nuages de points. Mme Mayers applique des équations points par points pour évaluer les modes de ruptures et un indice de la susceptibilité à la rupture sur les nuages de points de parois rocheuses. Ces travaux seront disponibles dans son mémoire dont la publication est prévue pour l'automne 2017.

8.5 Applications au territoire d'ArcelorMittal

La méthodologie développée dans le cadre du projet *ParaChute* a été faite en utilisant la voie ferrée d'ArcelorMittal comme site d'étude, où une quantité colossale de données a été acquise (2.3 To de données brutes) et les résultats sont remis à ArcelorMittal (Objectif 8). Deux jours de formation ont aussi été donnés au personnel de la compagnie afin qu'ils puissent utiliser les données et les analyses. Il s'agissait d'une formation sur les SIG en général, sur le logiciel Q-GIS en particulier et traitant des scans lasers, incluant un exercice d'acquisition de données avec un LiDAR terrestre. Les données brutes seront certes utiles à la gestion des parois rocheuses, mais les applications du MNT et des orthophographies sont beaucoup plus vastes et seront utiles à de nombreuses applications d'ingénieries, dont la gestion des ponceaux et des barrages de castors.

La base de données remises à ArcelorMittal comporte deux parties, l'une est un système d'information géoréférencé incorporant tous les résultats et les données de bases du MEDCP, alors que la seconde comprend les fichiers classés se rapportant aux coupes de roc et aux secteurs de parois éloignées. Toutes ces informations reflètent l'état actuel de la voie ferrée. Il s'agit d'une mine d'information qui pourra être consultée pour répondre à diverses questions. Par exemple, les coupes de roc ont été photographiées systématiquement. Ainsi, lors d'inspections futures, la base de données pourra être consultée pour constater l'évolution d'un bloc rocheux particulier ou la quantité de matériel dans le fossé. Ces photographies peuvent aussi permettent de comparer l'avant et l'après de travaux d'écaillage.

De plus, toutes les données servant à la réalisation des divers modèles de terrain (Lidar aéroporté, mobile et terrestre, etc.) constituent autant de données de référence qui seront d'un grand service dans le suivi de l'évolution de l'état de l'infrastructure et des travaux qui y seront menés. Les données de Lidar mobile dans les tunnels pourront aussi être éventuellement exploitées.

L'utilité du drone a été démontrée quant à la rapidité d'exécution et à la possibilité de couvrir l'étendue complète d'une paroi rocheuse. L'acquisition de vidéos, qui sont de très bonne qualité, peut limiter les besoins du personnel de gestion de se déplacer sur les lieux pour constater une situation repérée sur le terrain et ainsi, permettre une prise de décision plus rapide. Lors de demande de travaux, ces informations, qui sont classées de manière efficace dans la base de données, peuvent être extraites et communiquées aux tiers partis, ce qui leur assurera une préparation adéquate et donc, des travaux plus efficaces et adaptés.

Le résultat principal du projet *ParaChute* pour ArcelorMittal demeure le MEDCP, qui inclut l'inventaire, la caractérisation et la catégorisation des coupes de roc et des secteurs de parois éloignées. Au total, 425

coupes de roc et 73 secteurs de parois éloignées ont été inventoriés et catégorisés. Le MEDCP est un outil d'aide à la gestion des parois rocheuses et devrait appuyer efficacement ArcelorMittal dans le choix des parois à mitiger et à favoriser la diminution des coûts associés aux chutes de pierres. Plusieurs recommandations sont mentionnées pour l'application du système à la gestion des parois par ArcelorMittal dans le chapitre suivant.

8.6 Mot de la fin

À la lecture des diverses réalisations et des retombées indiquées au chapitre 3, il est raisonnable de penser que les objectifs du projet *ParaChute* ont été atteints et cela selon le temps imparti, le tout grâce à la collaboration de toutes et de tous. Le MEDCP, la carte morphostructurale et la structure du SIG qui l'accompagne devraient constituer un atout majeur dans la réduction du risque posé par les chutes de pierres au Québec. Le MEDCP et le projet *ParaChute* constituent un exemple d'innovation et d'intégration de technologies nouvelles qui devrait permettre une meilleure adaptation des infrastructures aux changements climatiques.

9. Recommandations

9.1. Scientifiques

- Utiliser la carte morphostructurale pour raffiner la détermination des coefficients de restitution des trajectoires de chutes de pierres;
- Entreprendre des travaux pour compléter la validation des abaques modifiés pour une application aux parois plus hautes (plus de ~25 m);
- Générer des guides pour aider les évaluateurs dans la sélection des critères permettant d'évaluer les potentiels de rupture des secteurs de parois éloignées et des coupes de roc;
- Utiliser les MNT pour évaluer les trempins et l'irrégularité des profils de pente plutôt que d'en faire une évaluation subjective sur le terrain;
- Réaliser l'analyse structurale sur les parois éloignées en utilisant les modèles photogrammétriques afin de pousser plus loin le concept de l'analyse de la susceptibilité aux chutes de pierres de parois rocheuses;
- Évaluation de l'efficacité des fossés par rapport aux autres modes de rupture et pour des volumes supérieurs à 5m³;
- Lors du développement du projet Charlevoix et celui complété ici du projet ParaChute, il a été reconnu que les coulées de débris devaient être le prochain type d'aléa qui devrait être étudié plus à fond au Québec. Il y aurait donc lieu de procéder au développement d'un tel projet de recherche, tel que proposé lors du 1^{er} Atelier québécois sur les impacts des changements climatiques sur les mouvements gravitaires.

9.2. Opérationnelles

- Les parois éloignées se situent hors de l'emprise de la voie ferrée et il s'agit souvent de falaises naturelles, où les chutes de pierres ne sont pas causées par les activités liées à la voie ferrée. Les gestionnaires devront élaborer une approche pour considérer les secteurs de parois éloignées;
- Accéder aux 30 secteurs de parois éloignés pour lesquels il n'y a pas de visuel sur les photographies afin de mieux évaluer leur potentiel de rupture. La majorité de ces parois est de faible hauteur et il est fort probable que certains des secteurs de catégorie 5 soient supprimés de l'inventaire suite à cette caractérisation;
- Intégrer à la gestion, les portions de voie ferrée qui peuvent être atteintes par différentes sources de chutes de pierres (tranchée, coupe de roc surplombée par un secteur de parois éloignées);
- À plusieurs endroits, les conditions favorables à des glissements impliquant des volumes importants ont été notées. Il serait opportun d'étudier plus en détails ces sites, et possible d'autres qui n'ont pu être inventoriés. Ces types d'instabilité exigent des analyses différentes, mais la banque de données devrait contribuer efficacement à de telles études;
- Les inspecteurs doivent comprendre et utiliser l'information contenue dans la base de données dans leur analyse pré-terrain et aussi sur le terrain. Donc, ils devraient être en mesure de consulter l'information lorsqu'ils sont sur la voie ferrée. Il faut donc s'assurer qu'ils aient des ordinateurs avec le logiciel Q-GIS. Il y aura aussi lieu d'inclure une période de formation au contrat de la compagnie qui réaliserait de tels travaux (e.g. inspection);

- Validation plus poussée de l'efficacité des fossés des parois de 26 m de haut et de la validité des abaques modifiés de Pierson et al (2001).

9.3. Pour l'application du MEDCP aux routes

- Adaptation de certaines méthodes puisque les scans laser mobiles ne seront pas disponibles pour tout le territoire.
- Parfois le MNT disponible ne couvre que l'emprise de la route et donc n'est pas suffisamment large pour avoir toute l'étendue des parois. Il faut donc voir comment étendre la reconnaissance des parois éloignées à un secteur sans MNT disponible.

10. Remerciements

Le projet ParaChute n'aurait pu être réalisé sans la volonté du MTMDET et d'ArcelorMittal de développer le MEDCP. Nous tenons ainsi à remercier Pierre Gionet d'ArcelorMittal ainsi que Chantal Jacob, Pierre Dorval, François Bossé, Pierre-Luc Deschênes et Michel Michaud du MTMDET. Ce projet a eu besoin d'assistance à différentes étapes de sa réalisation et nous voulons souligner l'aide précieuse d'Alexandra Jasmin, Benoît McFadyen, Anthony Paré, Frédérique Tremblay-Auger et Kevin Hébert. La gestion d'un tel projet demande du soutien administratif et nous voulons ici souligner l'aide reçue de ces personnes de l'Université Laval : Marcel Langlois, Marie Nadeau, Guylaine Gaumond, Caroline Bédard et Julia Lebreux du Département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval. Le projet ParaChute a exigé une quantité impressionnante de travaux de terrain et à cet effet nous tenons à remercier le Groupe Info Consult pour la réalisation des divers levés de terrain (LiDAR aéroporté et mobile et photographies aériennes). Finalement nous voulons remercier tous les opérateurs et le personnel des camps pour leur soutien lors de travaux de terrain.

11. Références

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, p. 80-97.

Agliardi, F. et Crosta, G.B., 2003, High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40:4, p. 455-471.

Alejano, L.R., Pons, B., Bastante, F.G., Alonso, E. et Stockhausen, H.W., 2007, Slope geometry design as a means for controlling rockfalls in quarries, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, p. 903-921.

Association des Transports du Canada, 2011, Guide canadien de conception des routes, Partie 1. 94 p.

Bilodeau C., Genois A., Demers D., Potvin J., Robitaille D. Dupuis C., 2004. Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles - Guide d'utilisation des cartes de zones de contraintes et d'application du cadre normatif. Gouvernement du Québec, 63 p (disponible en ligne à l'adresse www.msp.gouv.qc.ca/secivile/secivile.asp?txtSection=publications)

CANMET (Udd, J.E.), 1998, Inspection des coupes de roche sélectionnées à partir de Port-Cartier jusqu'à la gare de triage Love : du millage 0.0 au millage 170.0, travaux exécutés pour la compagnie de chemin de fer Québec Cartier et la compagnie minière Québec Cartier, août 1998, 190p.

CANMET (Udd, J.E. et Boyle, R.), 2004. Inspection des coupes de roche sélectionnées à partir de Port-Cartier jusqu'à la gare de triage Love : du millage 0.0 au millage 170.0, Projet 602 806, Rapport CANMET-LMSM 04-030(RC), travaux exécutés pour la compagnie de chemin de fer Québec Cartier et la compagnie minière Québec Cartier, août 2004, 316p.

Cloutier, C., 2014, Évaluation du comportement cinétique et du risque associé aux glissements de terrain rocheux actifs à l'aide de mesures de surveillance – le cas du glissement de Gascons, Gaspésie, Canada, Thèse de doctorat, Université Laval, 327p.

Cloutier, C., Locat, J. et Turmel, D., 2014, Rapport technique 01 : Données antérieures et récentes, Projet ParaChute : Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires, LERN-ParaChute-2014-03, Université Laval, 51 p.

Cloutier, C. et Locat, J., 2015, Rapport technique 02 : Planification des travaux de terrain de l'été 2015, Projet ParaChute : Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires, LERN-ParaChute-2015-02, Université Laval, Québec, 24p.

Cloutier, C. et Locat, J., 2016, Rapport technique 03 - Travaux réalisés à l'été 2015, Projet ParaChute : Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires, LERN-ParaChute-2015-04, Université Laval, 180p

Cloutier, C., Mayers, M., Turmel, D. et Locat, J., 2016, Rapport technique 04 – Utilisation du drone et photogrammétrie en terrain rocheux, Projet ParaChute : Développement d'un outil de gestion intégrée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires, LERN-ParaChute-2016-05, 116p.

Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P. et Lari, S., 2015, Key Issues in Rock Fall Modeling, Hazard and Risk Assessment for Rockfall Protection. In Lollino, G. et al. (eds), *Engineering Geology for Society and Territory* (Vol. 2). Springer International Publishing, p. 43-58.

Cruden, D.M. et Thomson, S., 1987, *Exercises in Terrain Analysis*, The Pica Pica Press, textbook division of The University of Alberta Press, 185p.

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, p. 719-735

Demers, D., Robitaille, D., Potvin, J., Bilodeau, C., et Dupis, C., 2008. La gestion des risques de glissements de terrain dans les sols argileux du Québec. In : J. Locat, D. Perret, D. Turmel, D. Demers et S. Leroueil, (2008). *Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion*. Presse de l'Université Laval, Québec, p. : 519-526.

Dorren, L.K.A., 2003, A review of rockfall mechanics and modelling approaches, *Progress in Physical Geography*, 27:1, p. 69-87.

Evans, S.G. et Hungr, O., 1993, The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes, *Canadian Geotechnical Journal*, 30:4, p. 620-636.

Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. et Leroi, E., 2005, A framework for landslide risk assessment and management, in Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), *Landslide Risk Management*, p. 3-25.

Ferrari, F., Giacomini, A., et Thoeni, K., 2016, Qualitative Rockfall Hazard Assessment: A Comprehensive Review of Current Practices. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2865-2922.

Fournier E., Rosu C., Bleau N. et Chaumont D. (2017). Scénarios de changements climatiques pour l'évaluation des vulnérabilités de glissement de terrain aux changements climatiques. [Rapport présenté au Département de géologie et de génie de l'Université Laval]. Montréal : Ouranos. 29 pages

Golder Associés. (Houle, J-S. et Pitman, W.), 2009. Rapport d'inspection des coupes de pierres et recommandations générales, Chemin de fer de Port-Cartier au Canton de Jig, Québec pour ArcelorMittal Mines Canada, Golder Associés, N° de projet : 09-1228-0070, 349p.

Hoek E. et Bray J.W., 1981, *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, London

ISSMGE TC32, 2004, Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms – Version 1

Jaboyedoff, M. et Labiouse, V., 2011, Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11:3, p. 819-828.

Jaboyedoff, M., Couture, R. et Locat, P., 2009, Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: toward a progressive failure, *Geomorphology*, 103, p. 5–16.

Lacasse, S., Eidsvig, U., Nadim, F., Hoeg, K. et Blikra, L.H., 2008, Event tree analysis of Aknes rock slide hazard, in *Proceedings of Geohazards IV*, Québec, Canada, 8p.

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, p. 26-36.

Lato, M., Quinn, P., McDougall, S., Strouth, A., Pritchard, M., et Sirois, D., 2016a, Probabilistic Rock Fall Assessment: Accounting for the Effects of Engineered Mitigation, In : Proceedings of the 69th Conference of the Canadian Geotechnical Society, 2-5 October 2016, Vancouver, BC, 8p.

Lato, M., Quinn, P., Pritchard, M., et Sirois, D., 2016b, Multi-geohazard risk assessment along railway corridors, In : Proceedings of the 69th Conference of the Canadian Geotechnical Society, 2-5 October 2016, Vancouver, BC, 6p.

Locat, J., Fontaine, A., Turmel, D., Noël, F., Lajeunesse, P., Joyal, G., Bernatchez, P., 2013a, Carte morphostructurale et mouvements de terrain le long de la façade maritime de Charlevoix : intégration des levés LiDAR, interférométriques et multifaisceaux, 66th Canadian Geotechnical Conference, GéoMontréal 2013, Montréal, Canada, 7pp.

Locat, J., Turmel, D., Bernatchez, P., Lajeunesse, P., Noël, F., Fontaine, A. et Joyal, G., 2013b, Projet Charlevoix : Rapport final, Rapport LERN-Charlevoix-13-03, 667 p.

Macciotta, R., Martin, C.D. et Cruden, D.M., 2015, Probabilistic estimation of rockfall height and kinetic energy based on a three-dimensional trajectory model and Monte Carlo simulation, *Landslides*, 12:4, p. 757-772.

Matasci, B. (2015). Rockfall susceptibility assessment and remote geological mapping with LiDAR point clouds (Thèse de doctorat). Université de Lausanne, Lausanne, Suisse.

Mayers, M. (2017, en préparation). Mémoire de maîtrise, Université Laval.

Mayers, M., Locat, J., Tremblay-Auger, F., 2017. Atlas des cartes morphostructurales du projet ParaChute, Laboratoire d'Études sur les risques naturels, Rapport ParaChute-LERN-17-01.

MRNF, 2004, Cartes numériques des dépôts de surface, Direction des inventaires forestiers, Ministère des ressources naturelles et faune du Québec, Cartes numériques au 1 :50000

New York State Department of Transportation. 2007. Rock Slope Rating Procedure. Geotechnical Engineering Manual 15, Revision #1. Geotechnical Engineering Bureau, Albany.

Noël, F., 2016, Cartographie semi-automatisée des chutes de pierres le long d'infrastructures linéaires, mémoire de maîtrise, Maîtrise interuniversitaire en Sciences de la Terre, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, 234 pp.

Noël, F., Turmel, D., Locat, J., 2013, Applications des outils RockyFor3D et Rockfall Analyst à une analyse préliminaire de chutes de blocs dans Charlevoix, Québec, Conférence 66th Canadian Geotechnical Conference, GéoMontréal 2013, Montréal, Canada, 6p.

Norrish, N.I. et Wyllie, D.C., 1996, Rock Slope Stability Analysis, in: Turner A.K. et Schuster R.L. (eds) Landslides, Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy Press, Washington, D.C., p 391-424.

Ouranos, 2014. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2014. Montréal, Québec : Ouranos, 79 p.

Pfeiffer, T.J. et Higgins, J.D., 1990, Rockfall hazard analysis using the Colorado rockfall simulation program. Transportation Research Record, n°1288, p. 117-126.

Pierson, L.A., 2012, Rockfall Hazard Rating Systems, in Turner, A.K. et Schuster, R.L. (Eds) Rockfall: Characterization and Control, Transportation Research Board, p. 56-71.

Pierson L.A., Gullixson C.F. et Chassie R.G., 2001, Rockfall catchment area design guide. Final report SPR-(032) Metric Edition. Oregon Dept Transp & FHWA (http://www.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/references/Rockfall_References/32_Pierson_Rockfall_Catchment_Area_Design_Guide.pdf), 284 p.

Pierson, L.A. and Van Vickle, R., 1993, Rockfall Hazard Rating System Participant's Manual, Publication FHWA SA-93-057. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., 112p.

Pierson, L.A. et Turner A.K., 2012, Implementation of Rock Slope Management Systems, In: A. K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Rockfall: Characterization and Control: Transportation Research of the National Academies Board, Washington D.C., pp. 72-110.

Pritchard, M., Porter, M., Savigny, W., Bruce, I., Oboni, F., Keegan, T., and Abbott, B., 2005, CN Rockfall Hazard Risk Management System: Experience, Enhancements, and Future Direction, unpublished work, 26p.

Rocsciencel (2016) *Logiciel RockFall* version 5

Russel, C.P., Santi, P. et Higgins J.D., 2008, Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System. Report No. CDOT-2008-7. Colorado Department of Transportation DTD Applied research and innovation branch and Colorado School of Mines, Golden, 139p.

Santi, P.M., Russel, C.P., Higgins, J.D., Spriet, J.I., 2009, Modification and statistical analysis of the Colorado Rockfall Hazard Rating System, *Engineering Geology*, 104:55-65.

Schenk, T., 2005, Introduction to Photogrammetry, Notes de cours, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. et Reynolds J.M., 2012, Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology*, 179, p. 300-314.

Wyllie, D.C. et Mah, C., 2004, Rock slope engineering. CRC Press.

Wyllie, D.C., 2014, Calibration of rock fall modeling parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, p. 170-180.

12. Annexes

Les annexes sont fournies numériquement. Il s'agit des fichiers pdf suivants :

Atteinte_Secteurs_Eloignes.pdf (146p)

Pour chacun des 73 secteurs de parois éloignées des figures montrant les simulations de chutes de pierres sont fournies et parfois, une photographie du secteur.

Categorisation_secteurs_eloignes.pdf (27p)

Séries de cartes présentant les résultats du MEDCP pour les secteurs de parois éloignées.

Coupes_de_roc_Cartographie.pdf (104p)

Séries de cartes présentant les résultats du MEDCP pour les coupes de roc.

Formulaires_secteurs_eloignes.pdf (146p)

Fiches récapitulatives des informations découlant du MEDCP pour chacun des 73 secteurs de parois éloignées.

Localisation_Secteurs_Eloignes.pdf (10p)

Série de carte présentant la localisation des secteurs de parois éloignées.

Metadonnees.pdf (10p)

Métadonnées d'acquisition des photographies aériennes, scans laser aéroporté et mobile par Groupe Info Consult en 2014 et 2015.

Rapport-GIC-ParaChute-7581_v2.pdf (19p)

Rapport produit par Groupe Info Consult par rapport à l'acquisition des photographies aériennes, scans laser aéroporté et mobile en 2014 et 2015.

Visibilite.pdf (22p)

Série de cartes présentant les résultats de l'évaluation de la distance de visibilité le long du chemin de fer à partir d'un script de calcul utilisant le MNT développé au LERN.